

Hartmut Dumke

ERNEUERBARE ENERGIEEN FÜR REGIONEN

Flächenbedarfe und Flächenkonkurrenzen



Academic Press

Hartmut Dumke
ERNEUERBARE ENERGIEN FÜR REGIONEN

Diese Dissertation hat den Rudolf-Wurzer-Anerkennungspreis (2018) der Fakultät für Architektur und Raumplanung und den Sixtus-Lanner-Preis (2019) in der Kategorie „Entwicklung des ländlichen Raumes“ gewonnen. Sie wurde von Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Sibylla Zech betreut und von ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Andreas Voigt und ao. Univ.-Prof. i. R. Dipl.-Ing. Dr. techn. Michael Narodoslawsky begutachtet. Dieses Printwerk hat Förderungen des Institutes für Raumplanung erhalten.

Hartmut Dumke

ERNEUERBARE ENERGIEN FÜR REGIONEN

Flächenbedarfe und Flächenkonkurrenzen



Academic Press

Zitiervorschlag:
Dumke, H. (2020). *Erneuerbare Energien für Regionen: Flächenbedarfe und Flächenkonkurrenzen*. TU Wien Academic Press. <https://doi.org/10.34727/2020/isbn.978-3-85448-041-9>

TU Wien Academic Press 2020

c/o TU Wien Bibliothek
TU Wien
Resselgasse 4, 1040 Wien
academicpress@tuwien.ac.at
www.tuwien.at/academicpress



Dieses Werk ist unter der Creative Commons Lizenz Namensnennung-Nicht kommerziell 4.0 International (CC BY-NC 4.0) lizenziert. <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.de>

ISBN (Printversion): 978-3-85448-040-2
ISBN (Onlineversion): 978-3-85448-041-9

Online verfügbar: <https://doi.org/10.34727/2020/isbn.978-3-85448-041-9>

Medieninhaber: TU Wien, Karlsplatz 13, 1040 Wien
Verleger: TU Wien Academic Press
Autor (für den Inhalt verantwortlich): Hartmut Dumke
Herstellung: Ferdinand Berger & Söhne GmbH

Lektorat: Bettina R. Algieri

Diese Publikation ist eine überarbeitete Fassung der an der TU Wien am 15.01.2018 von Hartmut Dumke verteidigten Dissertationsschrift „Erneuerbare Energien für Regionen – Flächenbedarfe und Flächenkonkurrenzen“. Die Dissertation wurde im Repositorium der TU Wien veröffentlicht: <https://permalink.catalogplus.tuwien.at/AC14539533>.

Für meine Eltern Rosemarie und Joachim

Sehr viel von dem, was ich heute bin, bin ich durch sie. Dafür habe ich meinen lieben Eltern sehr zu danken, denn Rose und Joachim haben meine kreativen Schübe stets voll unterstützt – selbst wenn Küche oder Keller hinterher manchmal eine gründliche Reinigung brauchten.

Danksagung

Große Teile dieser Arbeit sind durch wunderbare Menschen gelungen. Für das Leben und Arbeiten mit ihnen möchte ich mich hiermit sehr herzlich bedanken:

Martin Berger, Peter Biermayr, Peter Bleier, Thomas Brus, Jens Dangschat, Wolfgang Deschka, Thomas Dillinger, Fabian Dorner, Michael Eder, Stefan Geier, Michael Getzner, Rudolf Giffinger, Gregor Götzl, Alexander Hamedinger, Herbert Hemis, Petra Hirschler, Robert Kalasek, Lukas Kranzl, Daniel Latzer, Stephan Maier, Michael Malderle, Pia Nabielek, Michael Narodoslowsky, Markus Neuhaus, Bettina Pilsel, Johannes Prieler, Ernst Rainer, Hannes Schaffer, Rudolf Scheuvs, Andreas Voigt, Kurt Weninger, Sibylla Zech.

Bedanken möchte ich mich auch bei Silvia Ziemkendorf und Katarina Hribar (TU Wien Academic Press), Bettina R. Algieri (www.alceas.eu) und Marion Bräuer (www.derauer.at) für deren wunderbare Betreuung beim Lektorat und allen redaktionellen Arbeiten dieser Buchpublikation.

Kurzfassung

Jede menschliche Handlung benötigt Energie: Heizen, Kühlen, Warmwasser, Strom und Mobilität – in allem steckt viel Energie. Der Klimawandel aber erfordert eine Energiewende, das bedeutet einen immer weiter steigenden Bedarf an erneuerbaren Energien und in diesem Zusammenhang die Notwendigkeit der Reduktion von Kohlenstoffdioxid (CO₂). Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage nach dem Flächenbedarf: Welcher erneuerbare Energieträger benötigt wie viel Fläche pro Energiemenge und Jahr? Was verursacht dabei zusätzliche Versiegelungen und Flächeninanspruchnahme? Wie stark konkurrenziert die Gewinnung erneuerbarer Energie andere Land- und Flächennutzungen? Und was bedeutet das für die Raum- und Regionalplanung?

Diese Fragen werden in der vorliegenden Publikation anhand eines Kataloges für die Flächenbedarfe von Anlagen erneuerbarer Energieproduktion beantwortet. Die weiteren Forschungsbedarfe zeigen ergänzend, dass die größten Hürden auf dem Weg zur künftigen regionalen Energieraumplanung nicht (nur) energietechnisch überwunden werden müssen, sondern auch die weitere Erforschung von integrativen Planungs- und Beteiligungsprozessen notwendig wird. Der Kooperationsraum Region bietet dafür besondere Potenziale.

Redaktioneller Hinweis: In allen eigenen Darstellungen des Autors (Tabellen, Grafiken und im Fließtext) wird in europäischer Norm bei Zahlen der Punkt als Trennzeichen der Tausender-Stellen und das Komma als Trennzeichen zu den Dezimalstellen verwendet. In anderen nichteigenen Inhalten können auch andere Formatierungen bei Ziffern vorkommen.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	XV
Tabellenverzeichnis.....	XVII
Kartenverzeichnis	XIX
Abkürzungsverzeichnis.....	XXI
1 Einleitung	1
1.1 Zielsetzung und Forschungsfragen der Untersuchung	3
1.2 Herangehensweise und Aufbau der Untersuchung.....	3
1.3 Begriffserklärungen zur Thematik	4
2 Erneuerbare Energien und Energieraumplanung in Österreich.....	11
2.1 Erneuerbare Energieproduktion in Österreich	11
2.2 Begriffsgenese „Energieraumplanung“ in Österreich.....	13
2.3 Erneuerbare Energien, Energiesparziele, Energieeffizienz und Mobilität in österreichischen Energiestrategien.....	16
3 Katalog: Flächenbedarfe der Anlagen erneuerbarer Energieproduktion	23
3.1 Das Thema Energie in der Umweltverträglichkeitsprüfung.....	23
3.2 Erntefaktoren/Energy Returned of Energy Invested bei der Energiegewinnung	25
3.3 Der Index nachhaltiger Prozesse: Sustainable Process Index	28
3.4 Bauweise und Datenerfassungsmethode des Kataloges der Flächenbedarfe von Anlagen erneuerbarer Energieproduktion.....	29
3.4.1 „Katalogmethode“ der Datensammlung	29
3.4.2 Begründung zu Auswahl und Ausschluss bestimmter erneuerbarer Energieträger	32
3.5 Flächenbedarfe, Flächenkonkurrenzen und Umweltaspekte bei der Energiegewinnung aus Geothermie.....	32
3.5.1 Prozesskette der Energieumwandlung und Nutzenergieformen bei der Geothermie.....	33
3.5.2 Arten und Bauformen von Geothermieranlagen.....	36
3.5.3 Beispiele für Geothermieranlagen nach Lage und Typ	40
3.5.5 Lageunabhängige Ertragsunterschiede bei geothermischer Energiegewinnung	43
3.5.5 Lageabhängige Ertragsunterschiede bei geothermischer Energiegewinnung	45
3.5.6 Räumlich bedingte Potenzialunterschiede bei der Geothermiegewinnung in Österreich.....	49
3.5.7 Flächenbedarfe geothermischer Energieproduktion.....	53
3.5.8 Beispiele für Geothermieranlagen (nach Flächenertrag der Energieproduktion)	56
3.5.9 Regelenergiefähigkeit von Geothermie und ihre Eignung zur Grundlast.....	56
3.5.10 Skalierbarkeit der Energieleistung und -arbeit von Geothermieranlagen	57
3.5.11 Flächenkonkurrenzen bei geothermischer Energiegewinnung	59
3.5.12 Umweltwirkungen von geothermischer Energieproduktion.....	61
3.5.13 Zusammenfassende Erkenntnisse zum Flächenbedarf geothermischer Energie- anlagen (m ² /kWh/Jahr)	62
3.6 Flächenbedarfe, Flächenkonkurrenzen und Umweltaspekte bei der Gewinnung von Solarenergie	63
3.6.1 Prozesskette der Energieumwandlung und Nutzenergieformen der Solarenergie.....	63
3.6.2 Arten und Bauformen von Solarenergieanlagen	64
3.6.3 Beispiele für Solarenergieanlagen nach Lage und Typ.....	64
3.6.4 Lageunabhängige Ertragsunterschiede bei Solarenergiegewinnung	70
3.6.5 Lageabhängige Ertragsunterschiede bei Solarenergiegewinnung.....	74

3.6.6	Räumlich bedingte Potenzialertragsunterschiede von Solarenergiegewinnung in Österreich	76
3.6.7	Flächenbedarfe bei der Solarenergiegewinnung	79
3.6.8	Beispiele für Solarenergieanlagen (nach Flächenertrag der Energieproduktion).....	79
3.6.9	Regelenergiefähigkeit von Solarenergie und ihre Eignung zur Grundlast- und Spitzenlastversorgung	82
3.6.10	Skalierbarkeit der Energieleistung und -arbeit von Solarenergieanlagen.....	83
3.6.11	Flächenkonkurrenzen bei Solarenergiegewinnung	83
3.6.12	Umweltwirkungen der Solarenergieproduktion	87
3.6.13	Zusammenfassende Erkenntnisse zum Flächenbedarf von Solarenergieanlagen (m ² /kWh/Jahr)	88
3.7	Flächenbedarfe, Flächenkonkurrenzen und Umweltaspekte bei der Energiegewinnung aus Windkraft	89
3.7.1	Prozesskette der Energieumwandlung und Nutzenergieformen bei Windkraft	90
3.7.2	Anlagenarten und Bauformen von Windkraftanlagen	90
3.7.3	Beispiele für Windparkanlagen nach Lage und Typ	92
3.7.4	Lageunabhängige Ertragsunterschiede bei der Energiegewinnung durch Windkraft	97
3.7.5	Lageabhängige Ertragsunterschiede bei der Windenergiegewinnung	98
3.7.6	Räumlich bedingte Potenzialunterschiede bei der Energiegewinnung durch Windkraft in Österreich	100
3.7.7	Flächenbedarfe bei Windenergiegewinnung.....	105
3.7.8	Beispiele für Windkraftanlagen (nach Flächenertrag der Energieproduktion).....	106
3.7.9	Regelenergiefähigkeit von Windenergie und ihre Eignung zur Grundlast -und Spitzenversorgung.....	108
3.7.10	Skalierbarkeit der Energieleistung und -arbeit von Windenergieanlagen	109
3.7.11	Flächenkonkurrenzen bei Energiegewinnung durch Windkraft.....	111
3.7.12	Umweltwirkungen von Energiegewinnung durch Windkraft.....	115
3.7.13	Zusammenfassende Erkenntnisse zum Flächenbedarf von Windenergieanlagen (m ² /kWh/Jahr)	117
3.8	Flächenbedarfe, Flächenkonkurrenzen und Umweltaspekte bei der Energiegewinnung aus Biomasse	118
3.8.1	Prozesskette der Energieumwandlung und Nutzenergieformen von Biomasse	119
3.8.2	Arten und Bauformen von Biomasseanlagen.....	121
3.8.3	Beispiele für Biomasseanlagen nach Lage und Typ	122
3.8.4	Lageunabhängige Ertragsunterschiede bei Energiegewinnung durch Biomasse	125
3.8.5	Lageabhängige Ertragsunterschiede bei Energiegewinnung durch Biomasse	125
3.8.6	Räumlich bedingte Potenzialunterschiede bei der Energiegewinnung durch Biomasse in Österreich	126
3.8.7	Flächenbedarfe bei der Energieproduktion durch Biomasse.....	138
3.8.8	Beispiele für Biomasseanlagen (nach dem Flächenertrag der Energieproduktion)	141
3.8.9	Regelenergiefähigkeit von Energiegewinnung durch Biomasse und ihre Eignung zur Grundlast- und Spitzenlastversorgung.....	143
3.8.10	Skalierbarkeit der Energieleistung und -arbeit von Biomasseanlagen	143
3.8.11	Flächenkonkurrenzen bei der Energiegewinnung durch Biomasse.....	147
3.8.12	Umweltwirkungen von Energieproduktion aus Biomasse	149
3.8.13	Zusammenfassende Erkenntnisse zum Flächenbedarf von Biomasseanlagen (m ² /kWh/Jahr)	157

4	Ergebnisse: Erneuerbare Energieproduktion im Flächenvergleich	159
4.1	Vergleich der Katalogwerte kWh/m ² /a bei Anlagen mit erneuerbarer Energieproduktion....	159
4.2	Vergleich der Katalogwerte m ² /kWh/a bei Anlagen mit erneuerbarer Energieproduktion....	164
4.3	Vergleich der Flächenerträge, Flächenkonkurrenzen und Umweltwirkungen von Anlagen erneuerbarer Energiegewinnung.....	167
4.4	Größenvergleiche zwischen direkten Flächenbedarfen und Energiepotenzialflächen von Anlagen erneuerbarer Energiegewinnung.....	168
4.5	Vergleich der flächenspezifischen Energieerträge der Katalog-Records mit Werten aus der Fachliteratur.....	169
5	Schlussfolgerungen zur regionalen Energieraumplanung	173
5.1	Einordnung der empirischen Ergebnisse im Spektrum regionaler Energieraumplanung....	173
5.2	Räumliche Bezugssysteme für die regionale Energieraumplanung.....	174
5.3	Der Katalog im Praxischeck: Fallstudie Vorderland-Feldkirch.....	178
5.4	Reflexion und Ausbaumöglichkeiten des Flächenbedarfskatalogs der Anlagen erneuerbarer Energieproduktion	182
5.5	Weiterer Forschungsbedarf.....	183
5.5.1	Erforschung von Zusatzpotenzialen der in Österreich noch nicht hochausgebauten erneuerbaren Energien.....	183
5.5.2	Erforschung der Zusatzpotenziale von in Österreich bereits hochausgebauten erneuerbaren Energien.....	183
5.5.3	Erforschung von Etagenwirtschaften erneuerbarer Energien.....	184
5.5.4	Definition von neuen Energiebündnissen zwischen Stadt und Land	185
5.5.5	Erforschung der Kombinationen aus sozialwissenschaftlichen und energie-technischen Methoden für regionale Entscheidungsprozesse.....	185
5.5.6	Erneuerbare Energien als Kernelement in regionalen Energieraumplänen	185
	Literaturverzeichnis.....	189
	Bildnachweis	195
	Anhang.....	199

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Das Weltbild der Ökologischen Ökonomie	2
Abbildung 2:	Aufbau der vorliegenden Untersuchung	4
Abbildung 3:	„Angebotsbaum“ der erneuerbaren Energien.....	5
Abbildung 4:	Anteile erneuerbarer Energieträger in Österreich, 2016	11
Abbildung 5:	Anteil an erneuerbaren Energien und Bevölkerungsdichte in den EU-Mitgliedstaaten, 2013.....	12
Abbildung 6:	Anteile an erneuerbaren Energien, 2004 bis 2013	13
Abbildung 7:	Das Kriendendreieck der Energieraumplanung zwischen Ist und Soll	14
Abbildung 8:	Bruttoinlandsverbrauch erneuerbarer Energien pro Kopf in österreichischen Bundesländern, 2014	17
Abbildung 9:	Exemplarische Raum- und Wirkungsmatrix der österreichischen Steuerungsinstrumente mit Energierrelevanz.....	19
Abbildung 10:	Schema „Nachhaltige Raumordnung mit integrierter Energieleitplanung“.....	21
Abbildung 11:	Das System der deutschen Raumplanung	22
Abbildung 12:	Flächenbestandteile des Sustainable Process Index (SPI).....	28
Abbildung 13:	Schichtmodell zur Abgrenzung zwischen seichter und tiefer Geothermie	33
Abbildung 14:	Exemplarische Temperaturschwankungen seichter Geothermie nach Tiefen und Monaten	34
Abbildung 15:	Schaltschema einer Anlage zur geothermischen Stromerzeugung	36
Abbildung 16:	Anlagenarten seichter Geothermie.....	37
Abbildung 17:	Anlagenarten tiefer Geothermie	39
Abbildung 18:	Lagevarianten des geothermischen Temperaturgradienten	45
Abbildung 19:	Bohrpfad und Wasserdurchlässigkeitsklassen beim Geothermiewerk Unterhaching (Bayern)	46
Abbildung 20:	Horizontale und vertikale Kubaturlage bei verschiedenen Bauweisen seichter Geothermie	54
Abbildung 21:	Wärmepufferspeicher und Photovoltaikanlage in der Siedlung „Rosa Zukunft“ in Salzburg	55
Abbildung 22:	Energieertragseffizienz verschiedener Photovoltaiktechnologien im zeitlichen Verlauf.....	73
Abbildung 23:	Wirkungsgradunterschiede und Temperaturniveaus verschiedener Solarthermiekollektorarten	74
Abbildung 24:	Umwandlungskette von Windkraftkonvertern	90
Abbildung 25:	Windkraftkonverter in vier Bauweisen mit Vertikal- und Horizontalachsen.....	91
Abbildung 26:	Höhen- und Leistungsklassen von Windenergieanlagen, 1980 bis heute	92
Abbildung 27:	Abstandsregeln für Windparks mit (a) und ohne Hauptwindrichtung (b).....	97
Abbildung 28:	Leistungsszenarien der österreichischen Windkraft 2020 und 2030	103
Abbildung 29:	Detail- und Übersichtskarte der beiden leistungsstärksten Windkraftanlagen Österreichs in Potzneusiedl, Burgenland	106
Abbildung 30:	Stromverbrauch und -erzeugung im Burgenland.....	108
Abbildung 31:	Zeitliche Entwicklung verschiedener Leistungsklassen von Windkraftanlagen	111
Abbildung 32:	Wandlungsketten für Bioenergieträger	119
Abbildung 33:	Energiebereitstellungsmöglichkeiten aus Biomasse	120
Abbildung 34:	Leistungsentwicklung von Biomassefeuerungen, 1980–2015	121
Abbildung 35:	Bundesländerverteilung von Biomassekesseln bis 100 kW, 2014	122
Abbildung 36:	Anteile erneuerbarer Energieträger in Österreich, 2015	132

Abbildung 37: Gesamter Bruttoinlandsverbrauch an Energie sowie erneuerbarer Bruttoinlandsverbrauch pro Kopf in österreichischen Bundesländern, 2014	133
Abbildung 38: Tree Map von Anlagenbeispielen mit erneuerbarer Energieproduktion in Österreich (m ² /kWh/a).....	165
Abbildung 39: Beispiele für Rasterkarten (Corine Landcover, Erreichbarkeit von Volksschulen) ...	175
Abbildung 40: Beispielstrukturen innerer und äußerer Siedlungsstrukturen.....	176
Abbildung 41: Vier energieräumliche Siedlungstypen	177
Abbildung 42: Inhalte des Energierichtplanes Zürich, 2013	178
Abbildung 43: Ablaufdiagramm zur Szenarienbildung, Ist 2015 – Soll 2030	179
Abbildung 44: Spielbrett, Legende und Workshopfotos des Projekts „ERP_hoch3“.....	180
Abbildung 45: Fiktives Beispiel einer „energetischen“ Etagenwirtschaft.....	184

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Beispiele zur Flächenbedarfsermittlung von Anlagen erneuerbarer Energieproduktion ...	7
Tabelle 2:	Erneuerbare Energien im österreichischen UVP-Gesetz.....	23
Tabelle 3:	Erntefaktoren-Werte (EROI) für verschiedene Brennstoffquellen und Regionen	25
Tabelle 4:	Energierücklaufzeit, Anlagenlebensdauer und Erntefaktor verschiedener Stromerzeugungsanlagen.....	27
Tabelle 5:	Dateneingabemaske und Lagekarte zum Flächenbedarfskatalog der Anlagen erneuerbarer Energieproduktion.....	30
Tabelle 6:	Fünf Arten geothermischer Energievorkommen nach Bodentiefe und Potenzialstärke.....	35
Tabelle 7:	Varianten der Erschließung der Energie des flachen Untergrunds	38
Tabelle 8:	Geothermieanlagen nach Lage, Typ und Größe	40
Tabelle 9:	Spezifische Entzugsleistungen (Watt pro Sondenmeter) der Erdwärme, nach Bodenart und Feuchtigkeitsgehalt	44
Tabelle 10:	Die zehn leistungsstärksten Anlagen tiefer hydrothormaler geothermischer Wärmeproduktion in Fernwärmenetzen, Deutschland, 2017	48
Tabelle 11:	Anlagen der tiefen hydrothermalen Geothermie in Österreich, 2006.....	51
Tabelle 12:	Künftige Potenziale hydrothormaler Geothermie in Österreich nach unterschiedlichen Studien.....	52
Tabelle 13:	Beispiele für Geothermieanlagen nach dem Flächenertrag der Energieproduktion.....	58
Tabelle 14:	Qualitative Bewertung der Flächenkonkurrenzen zwischen der Energieerzeugung aus Geothermie und anderen lageidenten Flächenfunktionen.....	60
Tabelle 15:	Solarenergieanlagen nach Lage, Typ und Größe.....	65
Tabelle 16:	Ertragsvarianzen einer Photovoltaikanlage, Leistung 5 kW, Standort Wien	71
Tabelle 17:	Standortabhängige Ertragsvarianzen einer Photovoltaikanlage	76
Tabelle 18:	Beispiele für Photovoltaikanlagen nach dem Flächenertrag der Energieproduktion	80
Tabelle 19:	Beispiele für Solarthermieanlagen nach dem Flächenertrag der Energieproduktion ...	81
Tabelle 20:	Qualitative Bewertung der Flächenkonkurrenzen zwischen der Energieerzeugung aus Solarenergie (Betriebsphase) und anderen lageidenten Flächenfunktionen	86
Tabelle 21:	Windkraftanlagen nach Lage, Typ und Größe.....	93
Tabelle 22:	Rechtsgrundlagen, Widmungsarten und Abstandsregelungen zu Windkraftanlagen in den österreichischen Bundesländern	99
Tabelle 23:	Beispiele für Windkraftanlagen nach dem Flächenertrag der Energieproduktion	107
Tabelle 24:	Qualitative Bewertung der Flächenkonkurrenzen zwischen der Energieerzeugung aus Windkraft (Betriebsphase) und anderen lageidenten Flächenfunktionen	114
Tabelle 25:	Zusammenfassende Beurteilung der Umweltverträglichkeitserklärung für die Bau- und Betriebsphase des Windparks Andau/Halbthurn, Neusiedl am See, Österreich....	116
Tabelle 26:	Biomasseanlagen nach Lage, Typ und Größe	123
Tabelle 27:	Luftaufnahmen und Fotos von Biomassekraftwerken (Hackschnitzel, Stroh, Bioethanol)	139
Tabelle 28:	Jährlicher Flächenbedarf unterschiedlicher Biomasseanlagen	139
Tabelle 29:	Einzugsgebiete von Biobrennstoff für unterschiedliche Anlagengrößen.....	140
Tabelle 30:	Beispiele für Biomasseanlagen nach dem Flächenertrag der Energieproduktion	142
Tabelle 31:	Fernwärme-Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen nach Leistungsklassen und Brennstoffen, 2013	145
Tabelle 32:	Qualitative Bewertung der Flächenkonkurrenzen zwischen der Energieerzeugung aus Biomassen (Betriebsphase) und anderen lageidenten Flächenfunktionen	148
Tabelle 33:	Transportparameter von biogenen und fossilen Brennstoffen, 2008	150

Tabelle 34: Effizienz Aspekte nach Reichweiten netzgebundener Energieträger	151
Tabelle 35: Netzeigenschaften netzgebundener Energieträger.....	152
Tabelle 36: Musterrechnung zum CO ₂ -Gehalt eines Strohtransportes vs. das eingesparte CO ₂ durch fossile Wärmeerzeugung	153
Tabelle 37: Durchschnittliche und anlagenspezifische Emissionsfaktoren.....	154
Tabelle 38: Qualitative Bewertung der Umweltwirkungen durch Energieproduktion (Betriebsphase) aus Biomasse	156
Tabelle 39: Flächenertragswerte aus dem Katalog der Anlagen erneuerbarer Energieproduktion (Wärme).....	160
Tabelle 40: Flächenertragswerte aus dem Katalog der Anlagen erneuerbarer Energieproduktion (Elektrizität)	162
Tabelle 41: m ² /kWh/a und kWh/m ² /a von Anlagenbeispielen erneuerbarer Energieproduktion in Österreich.....	166
Tabelle 42: siehe nächste Seite; Energieertragseffizienz, Lageunabhängigkeit, Konkurrenzaspekte und Umweltwirkungen erneuerbarer Energie.....	167
Tabelle 43: Beispiele für Energieanlagen zum Verhältnis direkter Flächenbedarfe (Flächeninanspruchnahme) und der Potenzialertragsfläche	170
Tabelle 44: Vergleich der flächenspezifischen Energieerträge der Katalog-Records mit Werten aus der Fachliteratur	172
Tabelle 45: Steuerungshebel der Stadt- und Raumplanung, nach Ebenen differenziert.....	173
Tabelle 46: Entwurf zu einem regionalen Energieraumplan – Produkte und Verantwortungen zwischen Bundesland, Regionen und Gemeinden	187
Tabelle 47: Muster-Record aus dem Katalog der Flächenbedarfe von Anlagen erneuerbarer Energieproduktion.....	200

Kartenverzeichnis

Karte 1:	Lageübersicht der Records aus dem Katalog	31
Karte 2:	Geothermischer Wärmefluss in Europa (mW/m ²), 2002	47
Karte 3:	Bestand und Potenziale hydrothormaler Geothermie in Österreich, 2006	50
Karte 4:	Verteilung der Bodentemperatur (in 2 Metern Tiefe) nach besiedelten Rasterzellen Österreichs, 2010	53
Karte 5:	Unterschiede in der solaren Globalstrahlungsstärke weltweit	75
Karte 6:	Unterschiede in der solaren Globalstrahlungsstärke in Europa.....	75
Karte 7:	Siedlungsräume, besiedelbare und nichtbesiedelbare Räume in Österreich.....	77
Karte 8:	Solarthermiepotenziale im Szenario „Maxi 2020“, Projekt „REGIO Energy“	78
Karte 9:	Mittlere Jahreswindgeschwindigkeit in Metern pro Sekunde, 100 Meter über Grund, Österreich, 2011	100
Karte 10:	Windkraftanlagen in Österreich 2017	101
Karte 11:	Windkraftszenario „2020 maxi“ nach Bezirken Österreichs, Projekt „REGIO Energy“ ...	104
Karte 12:	Alters- und Leistungsklassen österreichischer Windkraftanlagen (1993–2016) und deren Lagen.....	110
Karte 13:	Biomassepotenziale Forst, „maxi 2020“, Projekt „REGIO Energy“	127
Karte 14:	Biomassepotenzial Acker, „maxi 2020“, Projekt „REGIO Energy“	128
Karte 15:	Biomassepotenziale Grünland-Viehwirtschaft, „maxi 2020“, Projekt „REGIO Energy“ ...	129
Karte 16:	Anteile verschiedener erneuerbarer Energiepotenziale zur Wärmenachfrage auf Bezirksebene, 2020.....	130
Karte 17:	Projekt „Austrian Heat Map“, Potenziale österreichischer Hauptregionen in Bezug auf Fernwärme.....	134
Karte 18:	Projekt „Austrian Heatmap“, Zoom Wärmebedarfsdichten 2012–2025	136
Karte 19:	Biogas-Einspeiseanlagen und ihre Lage zum Erdgasnetz, 2008	137
Karte 20:	Bioenergie in Österreich, 2016	144
Karte 21:	Kraftwerksleistungsklassen und -standorte (Biomasse und Abfall), 2013.....	146
Karte 22:	Kraftwerksleistungsklassen und -standorte (Erdgas, Öl und Kohle), 2013.....	147

Abkürzungsverzeichnis

AE	Fläche, die für die Bereitstellung von Prozessenergie inklusive Elektrizität notwendig ist
AI	Gesamtfläche aus Infrastrukturinstallationen
AID	direkter Landverbrauch
All	Fläche für Gebäude und Infrastrukturinstallationen
AP	Teilfläche zur Dissipation von Emissionen in Luft, Wasser und Boden
AR	für die Produktion von Rohstoffen benötigte Fläche
ARF	für die Produktion von fossilen Rohstoffen benötigte Fläche
ARN	für die Produktion von nichterneuerbaren Rohstoffen benötigte Fläche
ARR	für die Produktion von erneuerbaren Rohstoffen benötigte Fläche
AS	die für die Arbeitskraft benötigte Fläche
BHKW	Blockheizkraftwerk(e)
CdTe	Cadmiumtellurid
CIS	auch CIGS oder CIGSSe, Dünnschichttechnologie für Solarzellen, Abkürzung für die verwendeten Elemente Kupfer, Indium, Gallium, Schwefel und Selen
CH ₄	Formel für Methan (sowohl aus erneuerbaren als auch nicht-erneuerbaren Quellen)
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
C _x H _y	Kohlenwasserstoff(e)
CSP	Concentrated Solar Power
dB(A)	Dezibel in der A-Bewertung des Schallpegels
EGS	Enhanced Geothermal Systems
EROI/ERoEI	Erntefaktor/Energy Returned on Energy Invested
GIS	Geoinformationssystem(e)
GWh	Gigawattstunde(n)
GWh/a	Gigawattstunde(n) pro Jahr
GWh (el/a)	Gigawattstunde(n) elektrisch pro Jahr
GWh (th/a)	Gigawattstunde(n) thermisch pro Jahr
ha	Hektar
h/a	Stunden pro Jahr
HDPE	High-density polyethylene
Hz	Hertz
K/km	Veränderung der Bodentemperatur in Kelvin pro Kilometer Tiefe
kV	Kilovolt
kW	Kilowatt
kWh	Energie in Kilowattstunde(n)
kWh/a	Energie in Kilowattstunde(n) pro Jahr
kWh el/a	Energie in Kilowattstunde(n) elektrisch pro Jahr
kWh el/m ² /a	Energie in Kilowattstunde(n) elektrisch pro Quadratmeter und Jahr
kWh th/m ² /a	Energie in Kilowattstunde(n) thermisch pro Quadratmeter und Jahr
kWp	Kilowatt „peak“ (Spitzenleistung oder Nennleistung einer Photovoltaikanlage)
l/s	Liter pro Sekunde
m	Meter
m ²	Quadratmeter
m ² /kWh (th od. el)/a	Quadratmeter pro Fläche und Kilowattstunde (thermisch oder elektrisch) und Jahr, Kehrwert zu kWh/m ² /a
m ³	Kubikmeter

Mio.	Millionen
MW	Leistung in Megawatt
MW (el)	elektrische Leistung in Megawatt
MW (el/a)	elektrische Leistung in Megawatt pro Jahr
MW (th)	thermische Leistung in Megawatt
MW (th/a)	thermische Leistung in Megawatt pro Jahr
N ₂ O	Distickstoffoxid
NO _x	Stickoxide
ÖV	Öffentlicher Verkehr
ORC	Organic Rankine Cycling
P (el, th)	elektrische oder thermische Leistung in Watt
PV	Photovoltaik
PVGIS	Photovoltaic Geographical Information System
PVT	kombinierte Gewinnung von Elektrizität (photovoltaisch) und Warmwasser (solarthermisch)
ROG	Raumordnungsgesetz
SO _x	Schwefeloxide
SPI	Sustainable Process Index
ST	Solarthermie
t	Tonnen
t/a	Tonnen pro Jahr
TJ/a	Terajoule pro Jahr
UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung(en)
W/m	Watt pro Meter

„Zusammenkommen ist ein Beginn,
Zusammenbleiben ein Fortschritt,
Zusammenarbeiten ein Erfolg.“
(Henry Ford)

1 Einleitung

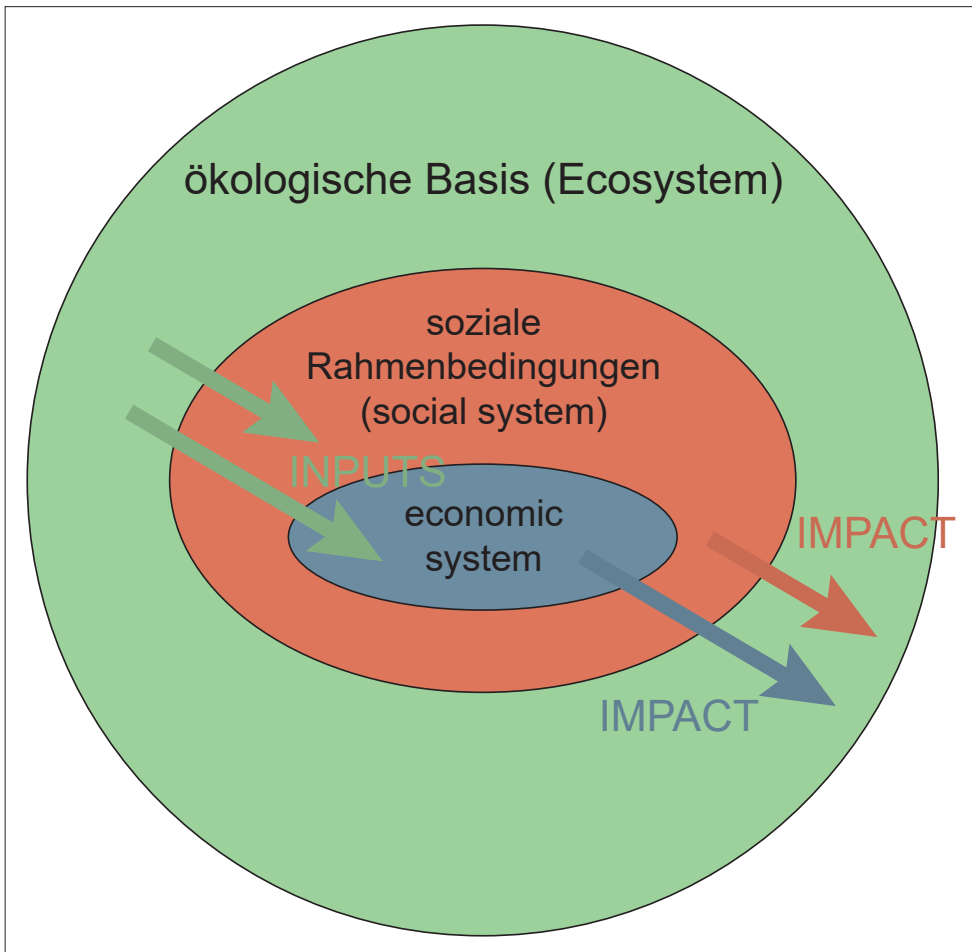
Jede menschliche Handlung benötigt Energie. Egal ob wir wohnen, pendeln, reisen, essen oder Produkte konsumieren, in allen Dingen und Dienstleistungen stecken Wärme- und Strombedarfe – und oft zusätzlich auch viele Transportkilometer. All dies soll auch künftig möglich sein, am besten ohne Komfortverlust. Fossile Brennstoffe werden immer knapper und teurer. Das macht es notwendig, dass die Produktionsanteile der erneuerbaren Energien gesteigert werden bzw. die fossilen Brennstoffe künftig zu größeren Anteilen ersetzt werden. Dies gilt nicht nur für die Energieerzeugung, sondern auch für viele stoffliche Basisprodukte, die derzeit noch zu großen Anteilen aus Rohöl gefertigt werden. Unter dem Schlagwort Energiewende zusammengefasst, sollen diese Veränderungen und die damit verbundenen einzelnen Projekterfolge wesentlich schneller, häufiger und umsetzungsstärker als bisher erfolgen.

An der Schnittstelle zwischen Raum- und Energieplanung wird dieser Wandel seit vielen Jahren über eine Vielzahl von Keywords diskutiert:

- Klimaneutralität der CO₂-Emissionen, Lebenszyklusbilanz eines Produktes oder einer Energiemenge;
- ökologischer Fußabdruck (Flächenbedarfe eines Lebensstils oder eines Prozesses wie der Wärme- und Elektrizitätserzeugung);
- erneuerbare Energien in der Gemeinde-, Regional- und Landesplanung;
- Energiesparen, Energieeffizienz, Energiesuffizienz;
- „Smarte“ Gemeinden, Städte, Regionen, Stadtregionen;
- nachhaltige Raumentwicklung;
- Energieraumplanung.

Diese Begriffe haben eines gemeinsam: Sie benötigen verschiedene Systemgrenzen für verschiedene Aussageebenen und -daten und beschäftigen sich mit den technischen und sozialen Interaktionen zwischen den beteiligten räumlichen Ebenen und den Akteurinnen und Akteuren, die bei diesen Veränderungsprozessen kooperieren müssen. Dazu zeigt eine Darstellung aus der Ökologischen Ökonomie (Abbildung 1), wie der soziale und der ökologische Raum bei der Gewinnung erneuerbarer Energien verwoben sind und wie daraus Einflüsse und Umweltwirkungen entstehen. Die Ökologische Ökonomie behandelt Ökologie und Ökonomie gleichwertig und transdisziplinärer als die Umweltökonomie, in der die Natur den ökonomischen Bedürfnissen eher untergeordnet ist und Umwelteffekte einfach als externe Effekte monetarisiert werden. Pointiert würde ein Ökologischer Ökonom zur Energieerzeugung fragen: „Wie viel Natur brauchen wir überhaupt?“, ein Umweltökonom dagegen: „Was kostet die Natur?“ (Institut für Philosophie und Wissenschaftstheorie 2017).

Abbildung 1: Das Weltbild der Ökologischen Ökonomie



Quelle: Institut für Philosophie und Wissenschaftstheorie (2017) nach Gowdy (2005, S. 219)

Die vorliegende Forschungsarbeit beschäftigt sich vor allem mit der Abschätzung der Flächenbedarfe von erneuerbarer Energieproduktion (Angebotsseite) und dem Umgang mit diesem Wissen auf der regionalen Planungsebene. Die regionale Perspektive wurde eingenommen, weil Energieszenarien im Sinne einer ausgeglichenen Bilanz zwischen (erneuerbarer) Energieproduktion und Energienachfrage wohl nur im seltenen Fall innerhalb von einzelnen Gemeinden realisierbar sind und daher ein Flächen- und Umsetzungsmanagement auf interkommunaler Ebene benötigen, um mit dem hohen Flächenbedarf der erneuerbaren Energieproduktion raumsparend, umweltschonend *und* ertragsoptimiert umgehen zu können. Dies ist sowohl für das Flächenmanagement im bebauten und unbebauten Raum, aber auch im sozialen Raum als Kooperationsaufgabe zwischen Akteurinnen und Akteuren der Energiewende eine mühevolle Aufgabe.

1.1 Zielsetzung und Forschungsfragen der Untersuchung

Zielsetzung dieser Untersuchung ist es, Hilfestellungen in der regionalen Planungspraxis anzubieten. Das Ergebnisprodukt ist ein Nachschlagewerk zum Flächenbedarf der erneuerbaren Energieproduktionsarten. Es sollen damit Positionen auf die Frage des renommierten Nachhaltigkeitsökonom Peter Bartelmus angeboten werden:

„Modelle mit unterschiedlichen Annahmen zu Umweltgrenzen lassen erkennen: Wir wissen nicht, wie viel Natur wir benötigen“ (Bartelmus 2014, S. 25).

In den Schlussfolgerungen werden Empfehlungen zum komplexen regionalen Setup angeboten, das benötigt wird, um nach der Abschätzung der Energieangebotsseite zu Energieszenarien zu gelangen. Die Forschungsfragen vorliegender Publikation lauten deshalb:

- Wie hoch ist der Flächenbedarf ($\text{m}^2/\text{kWh}/\text{Jahr}$) ausgewählter erneuerbarer Energien (Windkraft, Biomasse, Solarenergie, Geothermie) und was machen die standörtlichen Energieertragsvarianzen aus? Wie sind Flächenkonkurrenzen zu nichtenergetischen Landnutzungsarten sowie die Umweltwirkungen der erneuerbaren Energieproduktion einzustufen?
- Und wie sind vor diesem Hintergrund die Flächenbedarfe und -konkurrenzen der erneuerbaren Energieproduktion in der „regionalen Energieraumplanung“ einzuordnen?

1.2 Herangehensweise und Aufbau der Untersuchung

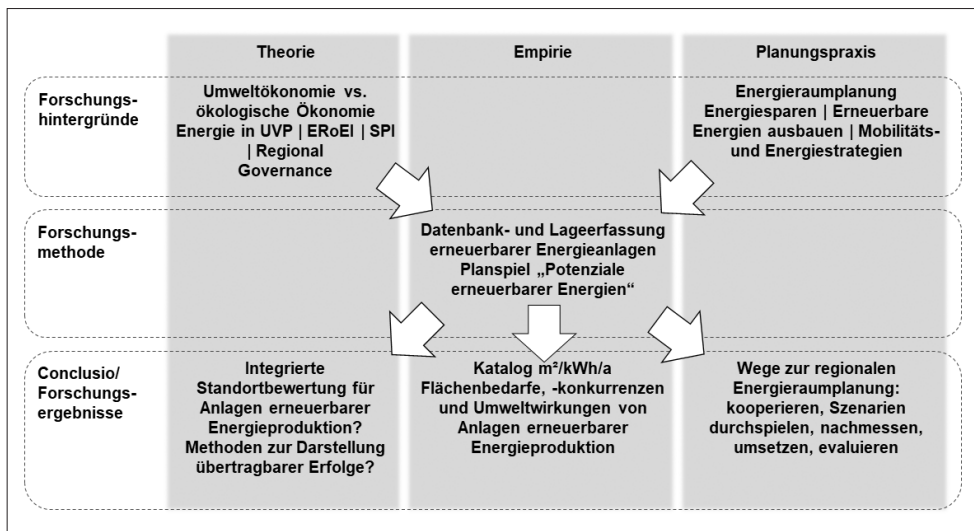
Die einleitenden Kapitel dieser Publikation widmen sich den erneuerbaren Energien in Österreich und insbesondere dem nicht neuen, aber inhaltlich noch unklaren Begriff „Energieraumplanung“.

Der empirische Teil mit dem Flächenbedarfskatalog der Anlagen erneuerbarer Energieproduktion (Kapitel 3) schildert zunächst flächen- und prozessrelevante Indizes zu den erneuerbaren Energien und zeigt auf, wie in der Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) mit dem „Energiethema“ umgegangen wird. Danach folgt der Katalog selbst, mit Daten zu Leistung, Jahresarbeit und zum Flächenbedarf bestehender Anlagen der erneuerbaren Energieproduktion, gegliedert nach den erneuerbaren Energietypen Geothermie, Solarenergie, Windkraft und Biomasse. Geografischer Schwerpunkt der in dem Katalog analysierten Anlagen ist Österreich, zum Vergleich werden jedoch auch Beispiele aus Europa, Asien und den USA angeführt.

Der Ergebnisteil der Untersuchung (Kapitel 4) vergleicht die einzelnen Katalogdatensätze energieträgerübergreifend unter den Aspekten Flächenbedarfe, Flächenkonkurrenzen und Umweltwirkungen. Abschließend werden Wege zur regionalen Energieraumplanung aufgezeigt, indem ein Empfehlungssetup zum Flächenmanagement zwischen Energieangebot und -nachfrage entworfen wird.

Die Schlussfolgerungen der Forschungsarbeit (Kapitel 5) listen den weiteren Forschungsbedarf auf. Der Fokus ist dabei sowohl auf die Flächenbedarfe der erneuerbaren Energien als auch auf den Umgang mit dem Flächenbedarfskatalog in der regionalen Kooperationsforschung gerichtet. Die folgende Abbildung 2 zeigt im Überblick den gesamten „Bauplan“ der vorliegenden Publikation, die zunächst einige Forschungsgründe erörtert, danach empirisch vorgeht, um abschließend Ergebnisse und den weiteren Forschungsbedarf zu formulieren.

Abbildung 2: Aufbau der vorliegenden Untersuchung



Quelle: eigene Darstellung

1.3 Begriffserklärungen zur Thematik

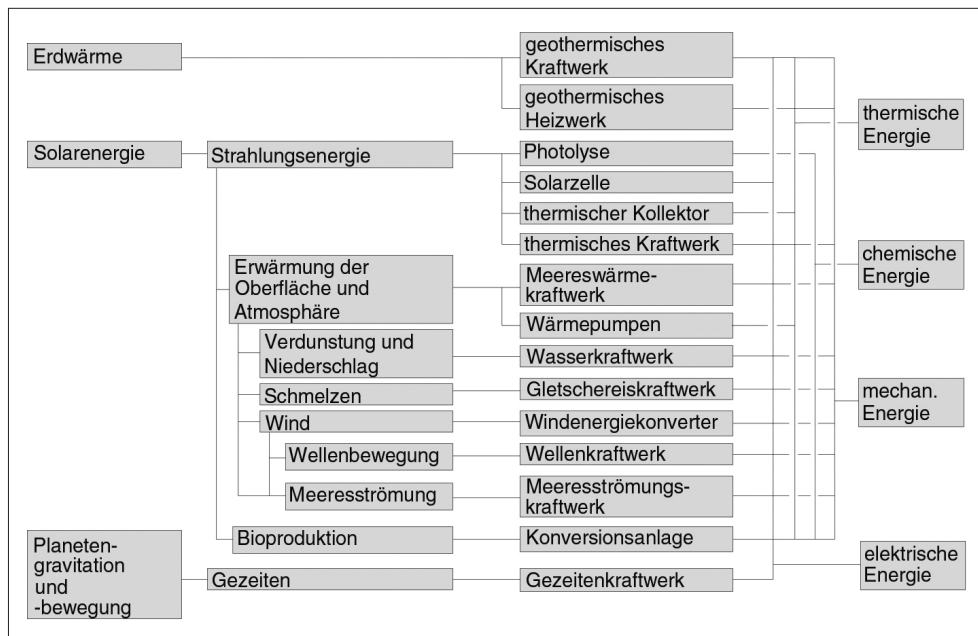
Im Folgenden erläutert ein Glossar die im Rahmen der Publikation verwendeten Begriffe und deren Bedeutung.

Energie: Jahresarbeit einer Anlage als Produkt von Leistung und Laufzeit ($E = P \cdot t$), Einheit: Wattstunden pro Jahr (Wh/a). Im Kontext der vorliegenden Forschungsarbeit kommen die Endenergieformen Wärme, Elektrizität und Treibstoffe vor.

Energieproduktion: Sehr weit verbreiteter, wenngleich physikalisch falscher Begriff. Nach den thermodynamischen Gesetzen gibt es weder Energiesparen noch Energieproduktion, sondern nur Umwandlungen zwischen verschiedenen Energieformen (etwa von Wärme oder kinetischer Energie in Elektrizität, von Biomasse in Treibstoffe, von Solarstrahlung in Wärme oder Elektrizität usw.). Im Sinne einer einfachen Verständlichkeit wird in dieser Publikation trotzdem der Begriff Energieproduktion im Sinne einer „Nutzbarmachung“ von Energie verwendet.

Erneuerbare Energieproduktion: Energiequellen, die innerhalb von „menschlichen Zeitdimensionen“ (Kaltschmitt, Streicher und Wiese 2006, S. 4) als unerschöpflich angesehen werden. Die vorliegende Forschungsarbeit widmet sich im empirischen Teil (Kapitel 3) verschiedenen Formen der Solarenergie, der Windkraft, der Geothermie und der Biomasse. Dargestellt werden Endenergiemengen ausgewählter Anlagen in Wattstunden pro Jahr (Wh/a), ohne Berücksichtigung ihrer kurz- oder längerfristigen zeitlichen Leistungs- und Arbeitsvarianz innerhalb eines Datenjahres. Erneuerbare Energien resultieren aus nur drei Primärquellen (siehe Abbildung 3): der Geothermie (Erdwärme), der Solarenergie und der Planetengravitation. Über mehrere Umwandlungsschritte, die über vier Prozessschritte zwischen Primär-, Sekundär-, End- und Nutzenergie (ebd., S. 3) jeweils Ertragsverluste bringen, entstehen verschiedene Energieformen: Wärme und Kälte als thermische Nutzenergieformen zur Raumkonditionierung und für die Warmwasserbereitung, Brennstoffe als Speicher chemischer, mechanischer und elektrischer Energie.

Abbildung 3: „Angebotsbaum“ der erneuerbaren Energien



Quelle: Kaltschmitt, Streicher und Wiese (2006, S. 12)

Leistung (der Energieproduktionsanlagen): Spitzenkapazitätsstärke einer Energieproduktionsanlage, Einheit: Watt (W). Beispiel für eine Photovoltaikanlage mit einer Leistung von 5 kW(p): das (p) steht für „peak“, d. h. die maximal mögliche Leistung.

Volllaststunden (rechnerisch): Stundenzahl pro Jahr, Einheit (h), Quotient der Arbeit durch die Leistung – nach der einfachen physikalischen Grundgleichung Energie: (Arbeit) = Leistung * Zeit. Der Maximalwert für die Volllaststunden einer Anlage im

Dauerbetrieb sind 8.760 Stunden (365 Tage * 24 h). Meist laufen Energieproduktionsanlagen nicht immer unter Volllast, deshalb ist die gesamte Laufzeit der Anlagen oft erheblich länger als der Wert der rechnerischen Volllaststunden (Beispiel: 30 % Volllast, 70 % Teillast).

Regelenergie bzw. Regelleistung: Die Fähigkeit einer erneuerbaren Energieanlage, schnell eine geringe oder auch starke Energienachfrageschwankung (etwa Raumwärme und -kühlung, aber auch Warmwasser- und Elektrizitätsmengen) über kürzere oder längere Zeiträume möglichst genau bedienen zu können. Unter den erneuerbaren Energieträgern haben die Biomasse und die Geothermie auch ohne Energiespeicher eine gute bis sehr gute Regelenergiefähigkeit, bei Windkraft und Photovoltaik ist sie ohne Energiespeicher nur sehr bedingt durch An- oder Abschaltung möglich. Stehen Energiespeicher (etwa Akkumulatoren oder Warmwassertanks) in ausreichend großer Kapazität als Speichermedien zur Verfügung, können auch die Photovoltaik und die Windkraft eine gute Regelenergiefähigkeit entfalten. Dies gilt allgemein auch für Elektrizitätspotenziale (egal ob aus erneuerbarer oder nichterneuerbarer Herkunft), die in Wasserkraft-Speicherkraftwerke oder in Erdwärme „einspeisen“ können.

Grund- und Spitzenlast: Hierbei handelt es sich um Spezialfälle von Regelenergiefällen. Grundlastleistungen treten meist über lange Zeiträume im kleinen Leistungsspektrum auf (Beispiel: Standby-Elektrizitätsbedarf eines Haushalts), Spitzenlasten über kurze Zeiträume im höheren Leistungsspektrum (Beispiel: Elektrizitätsbedarf eines Haushalts morgens, mittags, abends). Die Grund- und Spitzenlastprofile von industriellen Prozessen (Beispiel: Sachgüterproduktion) stellen sich völlig anders dar als die Energiebedarfsprofile der Haushalte.


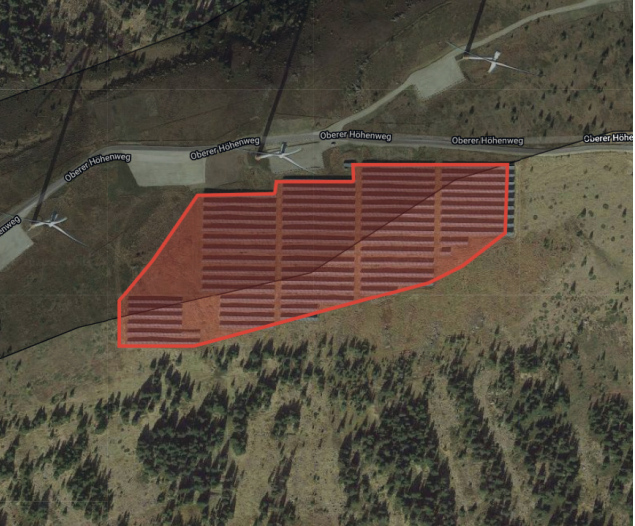
Umweltwirkungen der erneuerbaren Energieproduktion:

- Quantifizierbare Wirkungen:
 - Emissionen aus der Energieumwandlung, die sich nach den toxischen Gasen (u. a. Schwefeldioxid SO_2 und Stickstoffoxide NO_x), nach treibhauseffektrelevanten Gasen (u. a. Kohlendioxid CO_2 , Kohlenwasserstoffe C_xH_y wie z. B. Methan CH_4 , Distickstoffoxid N_2O) und nach Gasen mit Säurebildungspotenzial (SO_2 -Äquivalente) unterscheiden lassen (Kaltschmitt, Streicher und Wiese, 2006, S. 19–20)
 - Staub und Feinstaub
 - Lärm
- Qualitative Wirkungen:
 - zwei- und dreidimensionale visuelle Veränderung des Ortsbildes und/oder des Landschaftsbildes

Flächenbedarf der (erneuerbaren) Energieproduktion: Im Kontext der vorliegenden Forschungsarbeit handelt es sich ausschließlich um die zweidimensional horizontal von Energieanlagen benötigten unversiegelten und versiegelten Flächen in Hektar (ha): sowohl der „gebauten“ Energieproduktionsanlage selbst als auch der

Land- oder Gebäudeflächen der Energiepotenzialflächen (Waldfläche, Windpark, Ackerland, Solarkraftwerk, Erdreich). Zu diesen Flächenbedarfen sind in folgender Tabelle 1 Beispiele einiger bestehender Energieproduktionsanlagen angeführt.

Tabelle 1: Beispiele zur Flächenbedarfsermittlung von Anlagen erneuerbarer Energieproduktion

<p>Name, Lage: Windpark Neusiedl am See, Burgenland, Österreich Typ: Windkraft Untertyp: onshore, Cluster Info: 44 WKA, Nabenhöhe 100 m, Fertigstellung 2003 e_flaeche_ha: 785 p_el_mw: 79 e_el_mwha: 166.320</p>	
<p>Name, Lage: Solarpark Oberzeiring, Steiermark, Österreich Typ: Solarenergie Untertyp: Photovoltaik, Freiflächenanlage, aufgeständerte Kollektoren Info: 1.900 m Seehöhe e_flaeche_ha: 4,81 p_el_mw: 2 e_el_mwha: 2.500</p>	

<p>Name, Lage: Biomasse Heizwerk Rankweil, Österreich</p> <p>Typ: Biomasse</p> <p>Untertyp: Forst, Hackschnitzel, Wärme</p> <p>Info: Großabnehmer der Wärme sind das Krankenhaus Rankweil und öffentliche Gebäude der Marktgemeinde.</p> <p>Größe der Kraftwerksgelände- fläche ha: 0,7</p> <p>e_flaeche_ha: 580</p> <p>p_th_mw: 1,7</p> <p>e_th_mwha: 10.000</p>	
<p>Name, Lage: Geothermie ATRIO Shopping Center Villach, Österreich</p> <p>Typ: Geothermie</p> <p>Untertyp: seichte Geothermie, Wärme und Kälte, aktivierte Fundamentenergiepfähle</p> <p>Info: Heiz- und Kühlbetrieb ganzjährig</p> <p>e_flaeche_ha: 2,86</p> <p>e_el_mwha: 375</p> <p>p_th_mw: 14</p> <p>e_th_mwha: 1.220</p>	

Abkürzungen:

e_flaeche_ha: horizontaler Flächenbedarf der Energieproduktion in Hektar

p_th_mw bzw. p_el_mw: thermische oder elektrische Leistung der Anlage in Megawatt

e_th_mwha bzw. e_el_mwha: thermische oder elektrische Energie (Arbeit) in Megawattstunden pro Jahr

Quelle: Satellitenbildausschnitte (Google Maps, 2016) und eigene Darstellung (Abgrenzung der Energiepotenzialflächen)

Folgende Aspekte berücksichtigt die vorliegende Analyse, insbesondere der Flächenbedarfskatalog von Anlagen erneuerbarer Energieproduktion, nicht bzw. nur in einzelnen Fällen:

1. Umweltwirkungen und Flächenbedarfe, die der Produktionsphase zeitlich vor- oder nachgelagert sind, etwa Aufwände zur Anlagenherstellung und der Abbau- und Entsorgungsphase;
2. Anlagenbetriebsstörfälle;

3. Umweltwirkungen und Flächenbedarfe, die sich aus der Notwendigkeit der Speicherung und Verteilung der Energie ergeben (etwa Leitungen, Transformatoren und Umspannwerke, Zufahrtwege und -straßen außerhalb der Potenzialfläche).

Eine Ausnahme dieser Bearbeitungsregel bildet die Untersuchung der Flächenbedarfe für Biomasseanlagen: Hier wird auf die Umwelteffekte der Rohstofftransporte eingegangen, weil bei Biomassekraftwerken die Energiepotenzialflächen häufig nicht lageident sind – im Gegensatz zur Windkraft, Geothermie und Solarenergie.

Flächenkonkurrenz durch erneuerbare Energieproduktion: Die erneuerbare Energieproduktion steht in Konkurrenz zu anderen Funktionen, die auf den Potenzial- und Anlagenflächen stattfinden könnten. Es wird abgeschätzt, wie stark die erneuerbare Energieproduktion folgende andere Flächenfunktionen konkurrenziert:

- Wohnfunktion (Besiedlung durch den Menschen),
- Sachgüterproduktion (inklusive nachwachsender Rohstoffe) und Dienstleistungen,
- Naherholungsfunktion (kleinräumig),
- Tourismus (großräumig),
- Nahrungsmittelproduktion,
- Konkurrenz zu anderen erneuerbaren Energieformen, wobei hier auch Synergien und nicht nur Konkurrenzen möglich sind.

Region: Zusammenschluss von mindestens zwei Gemeinden im Sinne eines „Aktions- und Entscheidungsraumes“, in dem versucht wird, Probleme und Herausforderungen, die zur Lösung eine interkommunale Perspektive benötigen, gemeinsam und partizipativ zu behandeln. Zu solchen Herausforderungen gehört auch das Flächenmanagement der erneuerbaren Energiepotenziale. Zwei Drittel der gesamten österreichischen Fläche und etwa ein Drittel der gesamten Bevölkerung sind in Klima- und Energiemodellregionen organisiert (Dumke et al., 2017, S. 322; Kettner, Köppl und Streicher, 2015). Auch in der Mehrheit der LEADER-Regionen (LEADER ist ein Maßnahmenprogramm der Europäischen Union, mit dem seit 1991 modellhaft innovative Aktionen im ländlichen Raum gefördert werden), die über 90 Prozent der österreichischen Gesamtfläche und 55 Prozent der Bevölkerung repräsentieren, wird das Thema erneuerbare Energien häufig bearbeitet, weil es gemeinsam mit der Kooperation von Tourismus und Landwirtschaft, Qualifizierung und den neuen Technologien zu den vier „übergeordneten Themen“ des LEADER-Programmes gehört (Ministerium für ein lebenswertes Österreich, 2017).

Regionalplanung: Oberbegriff für Ziele, Instrumente und Maßnahmen, die Akteurinnen und Akteure in Regionen über partizipative Kooperationsprozesse interkommunal entwickeln, beschließen und umsetzen.

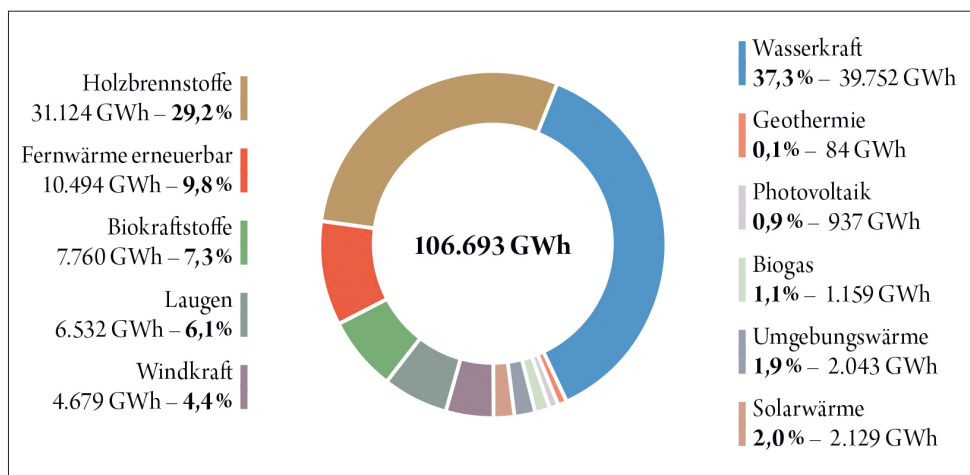
2 Erneuerbare Energien und Energieraumplanung in Österreich

Im folgenden Kapitel 2 werden die aktuelle Situation und die geschichtliche Entwicklung der Versorgungsanteile aus erneuerbaren Energien in Österreich und in europäischen Ländern diskutiert. Danach werden Inhalte und strategische Ausrichtungen des 2001 in Österreich erstmals konsensual definierten Begriffes „Energieraumplanung“ erläutert. Ergänzend werden Energiestrategien der österreichischen Bundesländer erörtert. Das Kapitel leitet von den Forschungsfragen zum empirischen Teil (dem Flächenbedarfskatalog der Anlagen erneuerbarer Energieproduktion) über.

2.1 Erneuerbare Energieproduktion in Österreich

Österreich hatte 2016 einen Anteil der erneuerbaren Energien von 32,8 Prozent am gesamten Endenergieeinsatz. Wie Abbildung 4 zeigt, kommen dabei die beiden größten Beiträge aus der Wasserkraft und aus verschiedenen biogenen Rohstoffen, alle anderen erneuerbaren Energieträger (Geothermie, Solarenergie, Umgebungswärme) leisten bisher erst kleine Anteile.

Abbildung 4: Anteile erneuerbarer Energieträger in Österreich, 2016

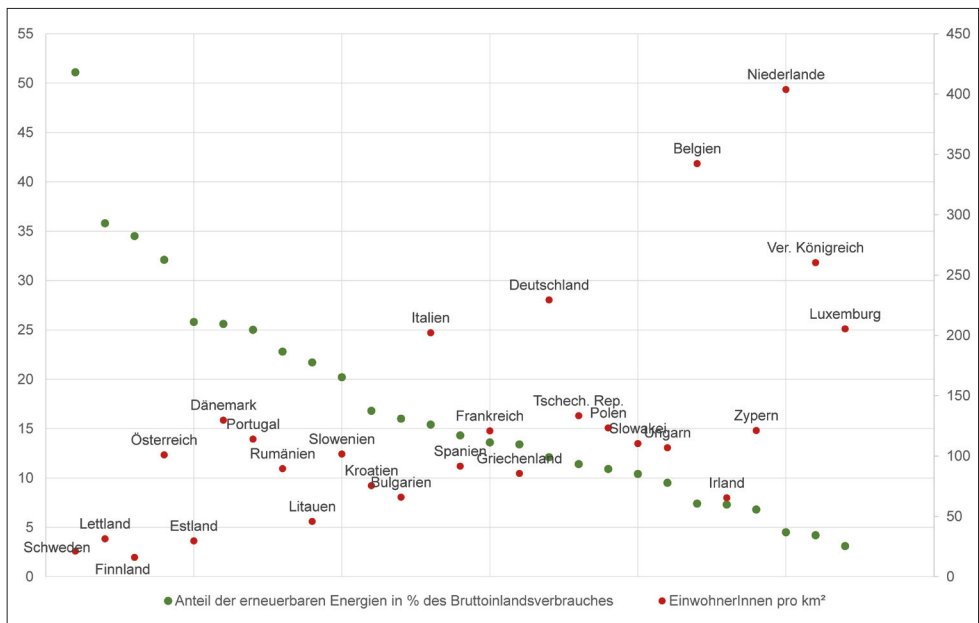


Quelle: Biermayr (2017, S. 14)

Da die erneuerbare Energieproduktion große Flächen sowohl für die Energiepotenziale als auch für die Energieanlagenflächen benötigt, sind Statistiken zum Zusammenhang zwischen der gesamten Landesfläche und der Bevölkerungsdichte auch im europäischen Vergleich interessant. Die folgende Abbildung 5 zeigt dazu, dass Länder mit

hohem erneuerbaren Energieanteil im Europavergleich eher geringe Bevölkerungsdichten haben. Österreich war bei einer Bevölkerungsdichte von 101 Personen/km² im Jahr 2013 europaweit auf Platz 4 beim Anteil erneuerbarer Energien. Die am dichtesten besiedelten Länder Deutschland, Belgien, Niederlande und das Vereinigte Königreich hatten 2013 erneuerbare Energieanteile zwischen 12 und 4 Prozent, bei Bevölkerungsdichten von 230 bis 404 Personen/km². Innerhalb des Clusters der Länder, die im Europavergleich bei relativ geringer Bevölkerungsdichte relativ hohe Anteile an erneuerbarer „Energieselbstversorgung“ haben, ist Österreich aber im oberen Bereich der Bevölkerungsdichte, zusammen mit Dänemark, Portugal, Rumänien und Slowenien.

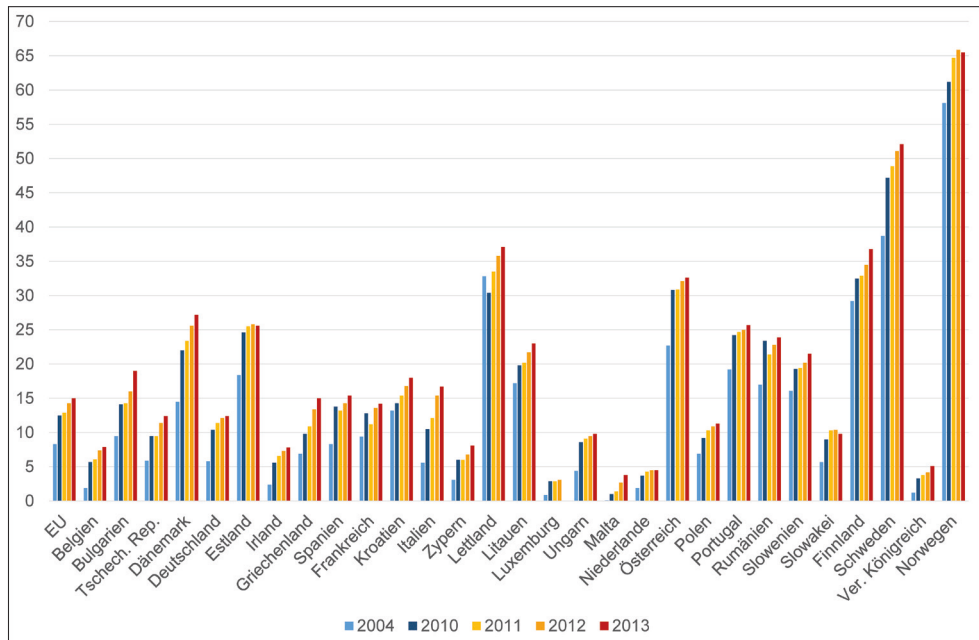
Abbildung 5: Anteil an erneuerbaren Energien und Bevölkerungsdichte in den EU-Mitgliedstaaten, 2013



Anmerkung: Bei der obigen Abbildung wurde aus Übersichtsgründen Malta ausgelassen (erneuerbarer Energieanteil 2,7 %, Bevölkerungsdichte 1.322 Personen/km²). Norwegen (kein EU-Mitglied) hatte 2013 einen erneuerbaren Energieanteil von 66 % bei einer Bevölkerungsdichte von 15,5 Personen/km².

Quelle: Eurostat (2013, S. 1)

Zusätzlich zum Gesamtanteil der erneuerbar geleisteten Energiebeiträge ist es für diese Analyse auch relevant, wie sich die zeitliche Entwicklung 2004 bis 2013 zeigt, dargestellt in Abbildung 6: Nach großen Zuwächsen ab 2004 hat sich die weitere Zunahme stark verlangsamt, in einigen Ländern gab es sogar Rückschritte. Österreich hatte 2016 einen Anteil von 32,8 Prozent erneuerbare Energien am Endenergieeinsatz (Biermayr, 2017, S. 12), aber in den letzten Jahren dabei kaum noch Zuwachs und liegt somit genau in diesem europäischen Trend.

Abbildung 6: Anteile an erneuerbaren Energien, 2004 bis 2013

Quelle: Eurostat (2013, S. 1)

Im folgenden Kapitel 2.2 wird beschrieben, welchen Stellenwert die erneuerbaren Energien zu anderen stark raum- und energierelevanten Themen wie der Mobilität und dem Energiesparen haben und wie dazu der Begriff „Energieraumplanung“ entstanden ist.

2.2 Begriffsgenese „Energieraumplanung“ in Österreich

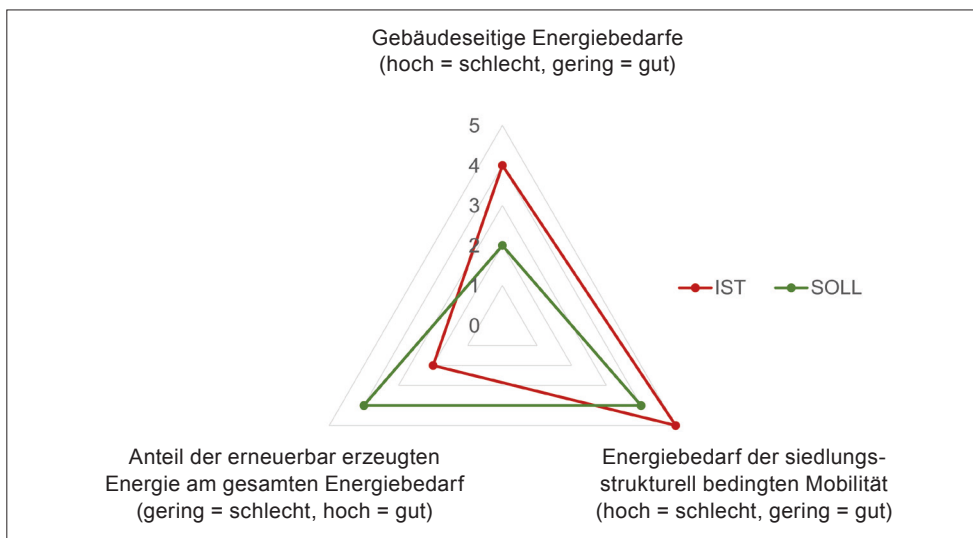
Im Einleitungskapitel wurde bereits geschildert, dass es nahezu keine menschliche Handlung gibt, die nicht energierelevant ist. Das macht die sogenannte Energieraumplanung zu einem besonders wichtigen, aber im Geiste von Schönwandt (2002) auch zu einem besonders „böartigen“ Planungsproblem: Im Raum stehen viele Akteurinnen und Akteure mit sehr heterogenen Erwartungshaltungen an raumrelevante Veränderungen und die Energiewende – und dazu noch eine thematisch sehr breite Vielfalt (etwa Wärme, Elektrizität, Mobilität und die jeweiligen räumlichen Planungshorizonte), beeinflusst von sich laufend und schnell verändernden Rahmenbedingungen.

Bei der Energieraumplanung sollte es um eine integrative Betrachtung der drei Zieldimensionen Energiesparen, Steigerung des erneuerbaren Energieanteils am Gesamtenergiebedarf und Mobilitätsaspekte gehen. „Integrativ“ bedeutet in der Energieraumplanung auch, die „klassischen“ Ziele der Raumplanung (sparsamer Flächeneinsatz, Erhalt vielfältiger und dezentraler Infrastrukturangebote, nachhaltige

Raumentwicklung etc.) im Einklang mit Zielen des Umwelt- und Landschaftsschutzes (Schutz des Landschaftsbildes, Schonung natürlicher Ressourcen, Emissionsvermeidung) umzusetzen. Abbildung 7 zeigt dazu, bewusst ohne konkrete Skalierungen, die drei wesentlichen, künftig integrativ strategisch zu verfolgenden „Veränderungsvektoren der Energieraumplanung“:

- deutliche Reduktion der Energiebedarfe, „Energiesparen“,
- deutliche Steigerung der Versorgungsbeiträge aus erneuerbaren Energien und
- Veränderung der Siedlungsstrukturen in der Weise, dass Mobilität weniger Energie benötigt.

Abbildung 7: Das Kriteriendreieck der Energieraumplanung zwischen Ist und Soll



Quelle: eigene Darstellung

Hinterfragt man die Ziele, die hinter diesen drei Vektoren stehen, so ist die hohe Artenverwandtschaft zwischen Energieraumplanung und den jahrzehntealten Grundsätzen der Raumplanungsgesetze sehr offensichtlich: sparsamer Umgang mit der Ressource Boden, Erhalt oder Verbesserung räumlicher Versorgungsfunktionen mit funktionsgemischten statt monofunktionalen Siedlungsstrukturen entlang der Daseinsgrundfunktionen Wohnen, Arbeiten und Freizeit. Diesen Zusammenhang zwischen Energie- und Raumplanung definiert Jilek (2001, S. 252) wie folgt:

„Die traditionelle Raumplanung befasst sich heute in erster Linie mit der Entwicklung der Siedlungsstrukturen, der Wirtschaftsentwicklung, der Entwicklung von Verkehr, Naturraum und Umwelt etc. und mit Standortentscheidungen für die Ver- und Entsorgungsinfrastruktur, unter die gelegentlich auch ein Energieprojekt fällt.“

Somit ist Energieraumplanung nur als Begriff neu, weil die Ziele der Raumplanung stets hoch energierelevant waren. Raumplanung war immer auch Energieraumplanung. Neu ist dagegen zudem der mediale Bedeutungszuwachs, den die erwähnten Sachthemen besonders ab dem Jahr 2010 genießen. Ein weiterer Meilenstein bei dieser Entwicklung war die nationale österreichische Energiestrategie (BMWFJ und BMLFUW, 2010), in der zusätzlich auch die Energieversorgungssicherheit und die ökologische und ökonomische „Stabilität“ der notwendigen Veränderungen im Sinne der Energiewende formuliert wurden. In der Schärfung des Begriffes „Energieraumplanung“ gab es im Rahmen der ÖREK-Partnerschaft Energieraumplanung (ÖREK = Österreichisches Raumentwicklungskonzept) als Konsensergebnis der beteiligten österreichischen Bundesländer 2014 eine konkrete, mit mehr Raumbezug als zuvor ausgestattete Definition für zwei Leitziele und eine allgemeine Definition:

„Ziel 1 (erneuerbare Energieträger): Die räumlichen Potenziale für die Gewinnung erneuerbarer Energie sind in ausreichendem und leistbarem Ausmaß zu erhalten und zu mobilisieren.

Ziel 2 (räumliche Strukturen): Die raumstrukturellen Potenziale für die Umsetzung energiesparender und energieeffizienter Lebensstile und Wirtschaftsformen sind zu erhalten und zu verbessern.

Energieraumplanung ist jener integrale Bestandteil der Raumplanung, die sich mit den räumlichen Dimensionen von Energieverbrauch und Energieversorgung umfassend beschäftigt“ (Stöglehner, Erker und Neugebauer, 2014, S. 12).

In der ÖREK-Partnerschaft Energieraumplanung (ebd.) wurden vier unterschiedliche Raumtypen genannt, die bei dieser Zielerreichung unterschiedliche miteinander verwobene Rollen einnehmen sollten: Kernstadt/urbaner Raum, suburbaner Raum, ländliche Kleinstadt, ländlicher Raum. In der steiermärkischen Energiestrategie 2025 werden dazu „konsensuale Entwicklungsprozesse“ genannt, die in der Energieraumplanung stattfinden sollten:

„Eine konsequente Energieraumplanung müsste die historisch vorhandenen Instrumentarien energiebewussten Bauens dazu nutzen, langfristige Planungsprozesse im Energie- und Umweltbereich ins Leben zu rufen und zu unterstützen (die derzeit gängige räumliche Entflechtung von Nutzungen und lockeren Bauformen erfordert einen extrem hohen Energieeinsatz). Sie hat gegenüber legislativen Rahmenbedingungen den Vorteil, dass Entwicklungsprozesse konsensual ablaufen können und damit größere Erfolge erzielbar sind“ (Amt der steiermärkischen Landesregierung, o. J., S. 27).

Das nächste Kapitel 2.3 gibt einen Überblick zu Begriffen und Keywords der strategischen Ziele der erneuerbaren Energien, des Energiesparens, der Energieeffizienz, der Mobilität und des Monitorings in den Energiestrategien der österreichischen Bundesländer.

2.3 Erneuerbare Energien, Energiesparziele, Energieeffizienz und Mobilität in österreichischen Energiestrategien

Zum künftigen Status der erneuerbaren Energien gibt es in den einzelnen Energiestrategien der österreichischen Bundesländer ein sehr unterschiedliches Spektrum, sowohl was die Zeiträume als auch die Titelbegriffe, unter denen die Veränderungen benannt werden, angeht. In Vorarlberg wird unter dem Begriff „Energieautonomie“ eine bis 2050 rechnerisch ausgeglichene Jahresbilanz zwischen der Energienachfrage für Wärme, Elektrizität und Mobilität und dem erneuerbaren Energieangebot verstanden (Vorarlberger Landesregierung, 2011, S. 16). Die niederösterreichische Energiestrategie nennt bereits bis 2020 ein Ziel von 50 Prozent für die Deckung des Gesamtenergiebedarfes aus erneuerbaren Energien (Amt der NÖ Landesregierung, 2019, S. 7 ff).

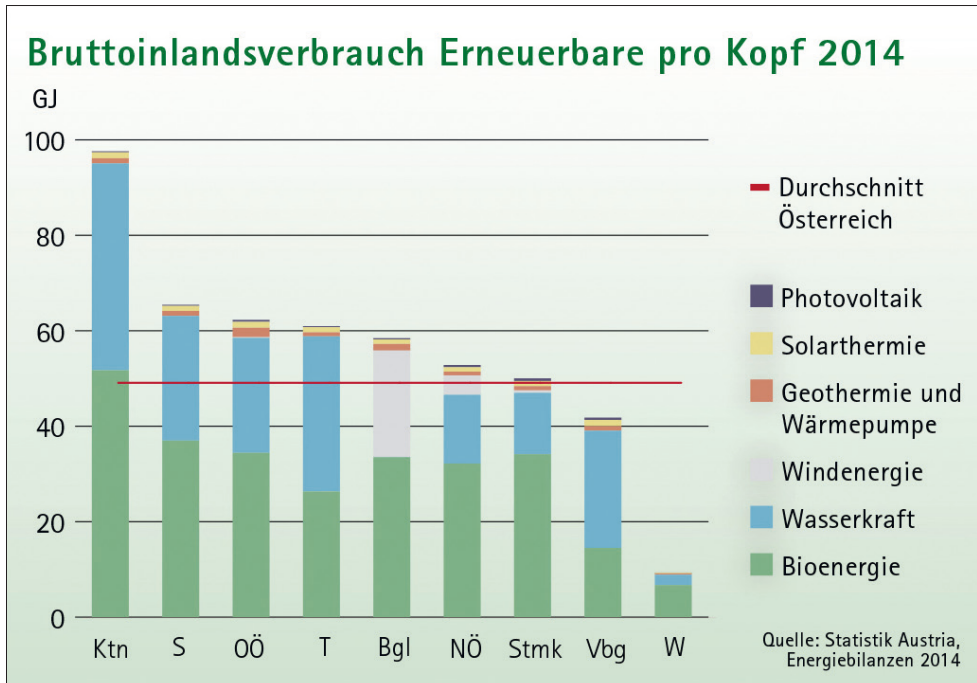
Noch ambitionierter nennt die „Energiestrategie Burgenland für 2020“ das Ziel einer „vollständigen Energieautarkie“ für den Strom-, Wärme- und Treibstoffverbrauch (TOB – Technologieoffensive Burgenland, 2013, S. 32). In Kärnten möchte man bis 2050 Heizöl und Erdgas „vollständig ersetzen“ (Faninger, 2013, S. 62).

Auch bei den Energiesparzielen sind die Pfade sehr unterschiedlich. In Vorarlberg soll bis 2050 zwar der Gebäudebestand des ganzen Landes „durchsaniert“ werden, aber mit nur geringen Reduktionen beim Energiebedarf der Industrie und des Gewerbes (Vorarlberger Landesregierung, 2011, S. 16). In Oberösterreich möchte man den Energieeinsatz pro Quadratmeter „klimabereinigt“ um 1 Prozent pro Jahr senken (Dell, 2017, S. 12), in Niederösterreich wird ebenfalls eine Halbierung des Endenergieeinsatzes von 62.000 auf 30.000 GWh/a für 2050 genannt (Amt der NÖ Landesregierung, 2019, S. 7 ff). In Wien soll der Energieverbrauch für Heizen, Kühlen und Warmwasser um 1 Prozent pro Jahr reduziert werden, im Weiteren wird eine Senkung des Primärenergieeinsatzes von aktuell 3.000 auf 2.000 Watt pro Person bis 2050 anvisiert (Vogl, 2017, S. 8).

Auch bei der Energieeffizienz sind die Begriffe und Zeiträume, die in den verschiedenen Strategien vorkommen, sehr unterschiedlich angesetzt. Die Energiestrategie Österreich spricht dazu von „freiwilligen Vereinbarungen“, nur wenn deren Zielpfade nicht erreicht werden, sollen „schrittweise verpflichtende Regelungen, wie die Leistung von Ausgleichszahlungen in einen Energieeffizienzfond, in Kraft gesetzt werden“ (BMWfJ und BMLFUW, 2010, S. 43). In Oberösterreich wird Energieeffizienz überhaupt als Verhältnis zwischen Endenergie und Bruttoregionalprodukt definiert (Dell, 2017, S. 12).

Bei den künftigen Zusatzpotenzialen erneuerbarer Energien setzen die Bundesländerstrategien auf die Entwicklung ihrer bereits aktiven Möglichkeiten. Abbildung 8 zeigt auf, dass der Grad des Ausbaus sowohl in absoluten Mengen als auch pro Kopf bei Solarenergie, Geothermie und Wärmepumpen sowie der Windkraft (mit Ausnahme des Burgenlands) noch sehr viel mehr Zusatzpotenzial hat als die in Österreich bereits viel höher ausgebauten erneuerbaren Energieträger Biomasse und Wasserkraft.

Abbildung 8: Bruttoinlandsverbrauch erneuerbarer Energien pro Kopf in österreichischen Bundesländern, 2014



Quelle: Pfmeter, Kahr und Liptay (2016, S. 26)

Zur Mobilität gibt es in den Energiestrategien der Länder nur wenige konkrete Zieldefinitionen: Der „NÖ Energiefahrplan 2030“ nennt dazu zwischen 2009 und 2050 ein Energiesparziel von –67 Prozent (Amt der NÖ Landesregierung, 2013, S. 5), im Burgenland wird dazu bis 2020 nur eine geringe Bedarfsreduktion von 11.000 auf 9.800 Terajoule pro Jahr (TJ/a) genannt (TOB – Technologieoffensive Burgenland, 2013, S. 61 f) genannt, in Wien soll bis 2050 der gesamte motorisierte Individualverkehr innerhalb der Stadtgrenzen ohne „konventionelle Antriebstechnologien“ auskommen und auch der Wirtschaftsverkehr mit Quelle und Ziel innerhalb der Stadtgrenzen bis 2030 weitestgehend CO₂-frei sein (Magistrat der Stadt Wien, MA 18, 2014, S. 32).







Die Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Energiestrategien beim Status erneuerbarer Energien, den Energiesparzielen und der Mobilität lassen sich im Überblick wie folgt zusammenfassen:

- die Zeithorizonte der gültigen Bundeslandstrategien variieren stark: zwischen 2020 und 2050;
- nur wenige Bundesländer (etwa Vorarlberg und Wien) erwähnen ausdrücklich die Energierelevanz der Mobilität sowie auch konkrete Veränderungsdimensionen für deren Dekarbonisierung;

- alle Strategien nennen mehr oder weniger konkrete Zielvorgaben für den Versorgungsanteil der erneuerbaren Energieträger (mit großen Detailunterschieden) und betonen Einsparungen und Effizienzsteigerungen;
- häufig verwendete Keywords sind Energieautonomie, Energieautarkie, Sanierungs-raten, Nachhaltigkeit, CO₂-Einsparungen, Versorgungssicherheit, Klimaschutz oder -mitigation;
- sehr selten finden konkrete räumliche Strategieempfehlungen für die Ausweisung von Eignungs- und Ausschlussflächen der erneuerbaren Energieproduktion oder für die Aktualisierung von Fernwärme-Vorranggebieten inklusive Potenzialanalysen zwischen Energiebedarf und regionalem Energieangebot wie in der steiermärkischen Energiestrategie Erwähnung (Amt der steiermärkischen Landesregierung, o. J., S. 22);
- selten sind Kartendarstellungen, die die Energie-Nachfragesituation für bestimmte Szenarienzeiträume als etwas Veränderliches zeigen (d. h. einen reduzierten Energiebedarf etwa auf grober Rasterbasis oder gar gebäudegenau in einem Ist- und Soll-Zustand) oder Zusammenhänge zwischen Energieangebot und -nachfrage visualisieren, angeführt;
- ebenfalls sehr selten sind Empfehlungen erwähnt, wie künftig bei den Aufgabenstellungen der Energieraumplanung die Rolle zwischen dem Staat Österreich, den Bundesländern, den Regionen und Gemeinden verteilt werden soll.

Zum letzten Punkt gibt es wenig vergleichende Grundlagenforschung und nur sehr wenige Studien, die überhaupt versucht haben, bundesländerübergreifend sowohl die Wirkungsweise als auch den Raumbezug von Planungsinstrumenten mit Energierrelevanz zu systematisieren. Abbildung 9 zeigt deshalb einen dieser seltenen Analysebefunde als Matrix der Steuerungsinstrumente, ihrer Raumbezüge und Wirkungsweisen.

Abbildung 9: Exemplarische Raum- und Wirkungsmatrix der österreichischen Steuerungsinstrumente mit Energierelevanz

Beschlussebene Bundesland	Raumordnungsgesetz	Landeskonzepte (Energie, Zukunft, Mobilität, Klimaschutz)	Förderungen: Wohnbau, Sanierungen, Produktion erneuerbarer Energien			
Beschlussebene Region, themen- und gemeinde-übergreifend		Regionale Energiekonzepte, Smart Regions, Mobilitätskonzepte				Entwicklung von Regionalentwicklungsmanagement und Interessensverbänden
Beschlussebene Stadt, Gemeinde	Flächenwidmungs- und Bauungspläne, örtliches Entwicklungskonzept	Kommunale Energieleitbilder, Energiekonzepte, Energiedeklarationen	Verträge Public-private-Partnership, Bodenfonds	Investorenwettbewerbe, Nutzungsbeiträge, Grundstücksaufschließung	Masterpläne, Stadtentwicklungspläne, Wärmenetzbetrieb, Energieproduktion	Etablierung von Beratungsstellen, Gebietsbetreuung, Mobilitätszentralen
Wirkungsebene und -art	regulativ 	kommunikativ, bewusstseinsbildend 	finanzierend 	marktaktivierend 	standortentwickelnd 	prozessessteuernd 

Quelle: Department für Raumplanung (2013)

In dem dieser Abbildung zugrunde liegenden Projekt „ENUR – Energie im urbanen Raum“ wurden in einem Governance-Forschungsmodul insgesamt 42 Planungsinstrumente aus den Bundesländern Vorarlberg, Oberösterreich und Wien analysiert. Die Systematik von drei indirekt raumverändernden Wirkungsweisen (regulativ, kommunikativ-bewusstseinsbildend, finanzierend), zwei direkt raumverändernden Wirkungsweisen (marktaktivierend und standortentwickelnd) und der prozessualen Wirkungsweise, welche sowohl direkte als auch indirekte Raumwirksamkeit entfalten kann, basiert auf dem Denkmodell von Klaus Selle (2005), wurde aber im Projekt „ENUR“ um drei spezifische Raumbezüge (Bundesländer, Regionen, Gemeinden) erweitert.

In der oben dargestellten Matrix ist ein Steuerungsvakuum auf regionaler Ebene deutlich erkennbar: Bei den Wirkungsweisen „regulativ“, „finanzierend“ und „marktaktivierend“ fehlen auf regionaler Beschlussebene Pendanten zu Steuerungsansätzen auf Bundesland- und Gemeindeebene – die Regionen sind (oft ohne konkrete oder gar institutionalisierte Zuständigkeit) lediglich „mitgemeint“. Daraus entstehen schwierige Steuerungsprobleme, die nur mit gründlichem Wissen zur Sachkompetenz der beteiligten Akteurinnen und Akteure und mit viel Verhandlungsgeschick angegangen werden können (Zech und Giffinger, 2013, S. 9).

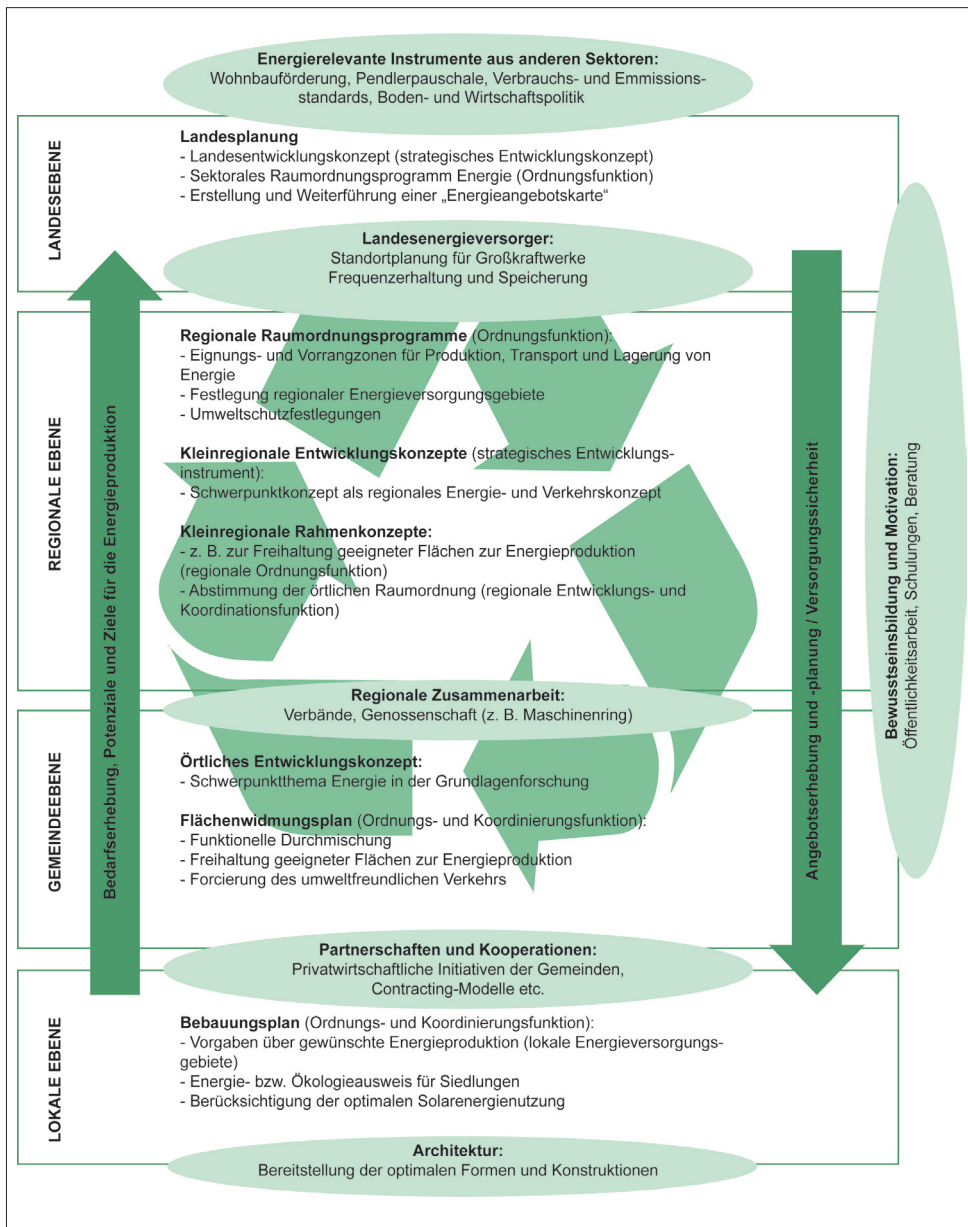
Zwar gelten Raumordnungsgesetze, Landeskonzepte und die vielfältigen Förderungsmechanismen „überall“, aber flächendeckend sind regional differenzierende Konzepte

(siehe oben in Abbildung 9 das Feld „Regionale E-Konzepte, Smart Regions und Mobilitätskonzepte“) nicht überall aktiv oder überhaupt auch nur existent. Und auch bei vorhandenen regionalen Steuerungsansätzen verbleibt häufig die schwierige verbindliche Verankerung und räumliche Verantwortung auf der kommunalen Ebene. Hier muss rechtlich vor allem über die „klassischen“ Instrumente des eigenen kommunalen Wirkungsbereiches (Flächenwidmungs- und Bebauungspläne, örtliche Entwicklungskonzepte) die Verbindlichkeit aus der regionalen Ebene „übersetzt“ werden.

Zum Verhältnis zwischen Ebenen der Akteurinnen und Akteure und den jeweiligen Sachthemen wurde für Niederösterreich ein Schema zur „integrierten Energieleitplanung“ entworfen (Geier, 2009). Die Empfehlungen sahen für die regionale Ebene u. a. einen Ausbau von Eignungs- und Vorrangzonen und die allgemeine Stärkung des Energiethemas in den in Niederösterreich bestehenden Steuerungsinstrumenten „kleinregionales Entwicklungskonzept“ und „kleinregionales Rahmenkonzept“ vor, wobei die kleinregionalen Rahmenkonzepte im Vergleich zu den zahlreicheren kleinregionalen Entwicklungskonzepten verbindlicher konzipiert sind. Die folgende Abbildung 10 zeigt einen ähnlichen Aufbau wie die vorhergehende Abbildung 9, geht aber über den Status quo derselben hinaus, weil auch zusätzliche, derzeit noch nicht vorhandene Ansätze angedacht sind.

Ein deutlich anderes Setup zwischen räumlichen Kompetenzen und der Steuerungsverantwortung zeigt sich im deutschen Planungssystem. Hier sind verbindliche Regionalpläne und regionale Flächenwidmungspläne viel stärker und bereits auch viel länger als in Österreich institutionalisiert. Dazu zeigt die folgende Abbildung 11, wie sich das in Deutschland auch in konkreten Planwerken manifestiert, die es in Österreich bisher nur selten gibt und häufig auch nicht konsistent raum- und kompetenzübergreifend „konstruiert“ sind.

Abbildung 10: Schema „Nachhaltige Raumordnung mit integrierter Energieleitplanung“



Quelle: Geier (2009, S. 102)

Abbildung 11: Das System der deutschen Raumplanung

Staatsaufbau	Planungsebenen	Rechtliche Grundlagen	Planungsinstrumente	Materielle Inhalte	
Bund	Raumordnung	Raumordnungsgesetz (ROG)	—	Grundsätze der Raumordnung	
Länder	Raumordnung in den Ländern (Landesplanung)	Raumordnungsgesetz und Landesplanungsgesetze	zusammenfassende, übergeordnete Pläne	→ Raumordnungsplan	Ziele der Raumordnung
	Regionalplanung			→ Regionalplan	
Gemeinden	Bauleitplanung	Baugesetzbuch (BauGB)	Bauleitpläne	→ Flächennutzungsplan	
				→ Bebauungsplan	Festsetzungen für die städtebauliche Ordnung

Leitbilder der räuml. Entwicklung

Quelle: Akademie für Raumforschung und Landesplanung (2005, S. 896)

Bei den künftigen Definitionen der Energieraumplanung scheint es darum zu gehen, differenziert nach verschiedenen Ebenen der Akteurinnen und Akteure und nach Raumbezügen der Szenarien festzulegen, wo durch welche Kooperationsergebnisse und Projekte was verändert wird – und bis wann. Diesen produktorientierten Zugang beschreibt auch das folgende Zitat dem Projekt „ERP_hoch3“ (Dumke et al., 2017, S. 369):

„Energieraumplanung muss künftig versuchen, sich in der gebauten und ungebauten Umwelt integrativ und nach verschiedenen Raumbezügen mit den Energie-Dimensionen Wärme, Kälte, Warmwasser, Strom (§ 2RIS des Bundes (XX), UVP-G 2000, BGBl. I Nr. 111/2017, 2020) und Mobilität auseinanderzusetzen. Dies benötigt die IST- und SOLL-Modellierung der jeweiligen Potenziale nach Nachfrage- und Produktionsmengen erneuerbarer und nichterneuerbarer Energie. Bei den Raumbezügen muss es dabei verstärkt um die ‚Zwischenebenen‘ gehen, weil diese derzeit noch häufig unter einem ‚Steuerungsvakuum‘ leiden. Solche Zwischenebenen sind insbesondere (Stadt-)Quartiere, Gebiete um ÖV-Haltestellen und die (Stadt-)Regionen.“

Die sehr unterschiedlichen Strategien und Zieldefinitionen der österreichischen Bundesländer (und auch auf nationaler Ebene) zum Ausbau der erneuerbaren Energien waren die Motivation, einen Flächenbedarfskatalog von Anlagen erneuerbarer Energieproduktion zu entwerfen. Dieser Katalog stellt den empirischen Hauptteil dieser Publikation dar (Kapitel 3). Der Katalog beinhaltet direkte Flächenbedarfe und Energiepotenzialflächen existierender Anlagen erneuerbarer Energieproduktion.

3 Katalog: Flächenbedarfe der Anlagen erneuerbarer Energieproduktion

Bevor die Bauweise des Kataloges erklärt wird, wird einleitend erläutert, wie das Thema Energie in der Umweltverträglichkeit vorkommt. Exemplarisch werden „Denkwelten“ genannt, bei denen die Idee entstand, einen „Katalogmethode“ für Anlagen erneuerbarer Energieproduktion zu entwickeln.

3.1 Das Thema Energie in der Umweltverträglichkeitsprüfung

Ein Einstieg zum Thema „Flächenbedarfe erneuerbarer Energieproduktion“ war eine Recherche darüber, welche der erneuerbaren Energien im Bundesgesetz über die Prüfung der Umweltverträglichkeit vorkommen und wie die Pflichten kategorisiert sind. Umweltverträglichkeitsprüfungen (UVP) bewerten die unmittelbaren und mittelbaren Auswirkungen von „Vorhaben“ auf Menschen, Tiere, Pflanzen und deren Lebensräume, auf Boden, Wasser, Luft und Klima, auf die Landschaft und auf Sach- und Kulturgüter (RIS des Bundes (XX), UVP-G 2000, BGBl. I Nr. 111/2017, 2020). Manche Vorhaben sind immer UVP-pflichtig, bei den Pflichten gibt es jedoch je nach Kategorie der Schutzgebiete, in dem ein Vorhaben umgesetzt werden soll, Unterschiede. Weitere Unterschiede in den Pflichten richten sich nach den zu erwartenden Dimensionen der Umweltwirkungen oder der Flächengröße. Dazu fasst die folgende Tabelle 2 zusammen, bei welchen Energieanlagen die „normale“ oder die vereinfachte UVP-Pflicht besteht.

Tabelle 2: Erneuerbare Energien im österreichischen UVP-Gesetz

Kategorie	UVP-Pflicht
Energieanlagen	Ab 200 MW Brennstoffwärmeleistung (nicht nach erneuerbaren oder nichterneuerbaren Brennstoffen unterschieden)
	Anlagen zur Abscheidung von Kohlenstoffdioxidströmen (geologische Speicherung)
	Anlagen mit CO ₂ -Abscheidungen ab 1,5 Mio. t jährlich
	Windenergieanlagen mit einer elektrischen Gesamtleistung von mindestens 20 MW oder mit mindestens 20 Konvertern mit einer Nennleistung von mindestens je 0,5 MW
	Wasserkraftanlagen (Talsperren, Flusstause, Ausleitungen) ab 15 MW Engpassleistung (oder je nach Rückstaulängen und Abständen für den Fischlebensraum auch ab 2 oder 10 MW); Stauwerke ab 10.000.000 m ³ Wasservolumen
	Umwandlung von Ödland oder naturnahen Flächen für Zwecke intensiver Landwirtschaftsnutzung ab 70 ha
	Rodungserweiterungen ab 20 ha Gesamtgröße bei zusätzlicher Flächeninanspruchnahme von mindestens 5 ha
	Anlagen zur Herstellung von Biotreibstoffen durch chemische Umwandlung ab 100.000 t/a
	Umwandlung von Ödland oder naturnahen Flächen für Zwecke der intensiven Landwirtschaftsnutzung mit einer Fläche von mindestens 70 ha

Schutzgebiets-kategorie	Vereinfachte UVP-Pflicht (vereinfachtes oder Einzelprüfverfahren mit weniger Prüfauf-lagen als bei regulärer UVP-Pflicht, s. o.)
A	Windenergieanlagen ab 10 MW Leistung oder mit mindestens 10 Konvertern zu je mindestens 0,5 MW Leistung; Umwandlung von Ödland oder naturnahen Flächen für Zwecke intensiver Landwirtschafts-nutzung ab 35 ha (Einzelfallprüfung); Rodungserweiterungen um +5 ha bzw. ab 10 ha (Einzelfallprüfung); Stauwerke ab 2.000.000 m³ Wasservolumen; Neuerrichtung von Anlagen für Tiefbohrungen im Zusammenhang mit der Wasserversorgung ab 1.000 m Teufe (kann bei Geothermie relevant sein); Umwandlung von Ödland oder naturnahen Flächen für Zwecke der intensiven Landwirtschafts-nutzung mit einer Fläche von mindestens 35 ha; Rodungen ab 10 ha oder ab +2,5 ha.
B	Keine Unterscheidung von energierelevanten Regelungen
C	Neuerrichtung von Anlagen für Tiefbohrungen im Zusammenhang mit der Wasserversorgung ab 1.000 m Teufe (kann bei Geothermie relevant sein)
D	Thermische Kraftwerke oder andere Feuerungsanlagen in schutzwürdigen Gebieten mit einer Brennstoffwärmeleistung von mindestens 100 MW
E	Keine Unterscheidung von energierelevanten Regelungen

Schutzkategorien

- A besonderes Schutzgebiet (Vogelschutzrichtlinie, Flora-Fauna-Habitat-Richtlinie, Bannwälder, Nationalparks, Naturschutzgebiete oder gleichartige kleinräumige Schutzgebiete oder ausgewiesene einzigartige Natur-gebilde, UNESCO-Welterbe)
- B Alpinregion (Beginn oberhalb des geschlossenen Baumbewuchses)
- C Wasserschutz- und schongebiet
- D belastetes Gebiet (Luft)
- E in oder nahe Siedlungsgebieten (300 m um ein Vorhaben)

Quelle: RIS des Bundes (XX) §2b, UVP-G 2000, BGBl. I Nr. 111/2017 (2020)

Diese UVP-pflichtigen Inhalte mit Energierrelevanz haben Fragen ausgelöst, die für die Entwicklung des Flächenbedarfskataloges erneuerbarer Energieproduktion, insbesondere auch bei den Untersuchungskriterien zu Flächenkonkurrenzen, motivierend waren, wie zum Beispiel:

- Warum werden weder Solarenergie- noch Geothermieanlagen explizit genannt?
- Warum liegt der Schwellenwert zwischen regulärer und vereinfachter UVP-Pflicht bei Windkraftanlagen und Rodungen „genau“ bei 2:1?
- Warum werden bei einer UVP keine Aufwände, die zeitlich vor der Energieerzeugungsphase liegen, berücksichtigt? Beispiele solcher Aufwände wären etwa die in den Materialien der Energieanlage enthaltenen Mengen „grauer Energie“, aber auch Energieaufwände, die zum Beispiel bei der Ernte, Aufbereitung und dem Transport von biogenen Rohstoffen entstehen?

Zum letzten Punkt werden nun zwei weitere „Denkwelten“, der Erntefaktor (Energy Returned on Energy Invested – EROI oder teils auch ERoEI) und der Sustainable Process Index (SPI), auf ihre flächenrelevanten Aspekte bei der erneuerbaren Energieerzeugung hin erörtert.

3.2 Erntefaktoren/Energy Returned of Energy Invested bei der Energiegewinnung

Der Faktor der EROI beschäftigt sich mit dem Verhältnis zwischen dem Material- und Aufbauaufwand und dem Energieertrag einer Anlage. Zu diesem Faktor gibt es verschiedene Definitionen: eine der gängigsten (Hall, Lambert und Balogh, 2014; Wikipedia, 2017) bildet diesen Indikator aus dem Verhältnis zwischen dem über den gesamten Lebenszyklus einer Anlage erwirtschafteten Energieertrag und der für den gesamten Umwandlungsaufwand der Anlage einzusetzenden Energiemengen (etwa die Betriebsenergie, aber auch die „graue Energie“ der Kraftwerksbauteile sowie die Wartungs- und Entsorgungsanteile nach Betriebsende). Grundsätzlich steht ein EROI-Faktor von über 1 für Wirtschaftlichkeit, weil mehr Energie erzeugt wird, als an Energieaufwand für Bau, Betrieb und Abbau einer Anlage nötig ist. Zum EROI muss aber ergänzt werden, dass er nicht als integrativer Indikator einzustufen ist, weil er meist keinerlei Emissions- oder Umweltbewertungen enthält. Erneuerbare Energieträger haben, bei erheblichen lagebedingten Verhältnisunterschieden, EROI-Indizes von über 100 (Wasserkraft), zwischen 25 und 80 (fossile Energieträger Kohle, Öl und Gas) oder auch nur zwischen 2 und 20 (Solarenergie, Geothermie, Windkraft). In der folgenden Tabelle 3 wird die große Bandbreite der EROI-Werte anhand von Beispielen weiter veranschaulicht.

Tabelle 3: Erntefaktoren-Werte (EROI) für verschiedene Brennstoffquellen und Regionen

Ressource	Jahr	Land	EROI (X:1) ¹	Referenz
Fossile Brennstoffe (Öl und Gas)				
Öl- und Gasproduktion	1999	global	35	Gagnon, 2009
Öl- und Gasproduktion	2006	global	18	Gagnon, 2009
Öl und Gas (Inland)	1970	USA	30	Cleveland et al., 1984; Hall et al., 1986
Öl und Gas (Inland)	2007	USA	11	Guilford et al., 2011
Öl und Gas (importiert)	2007	USA	12	Guilford et al., 2011
Öl- und Gasproduktion	1970	Kanada	65	Freise, 2011
Öl- und Gasproduktion	2010	Kanada	15	Freise, 2011
Öl-, Gas- und Teersandförderung	2010	Kanada	11	Poisson und Hall (i. E.)
Öl- und Gasproduktion	2008	Norwegen	40	Grandell, 2011
Ölproduktion	2008	Norwegen	21	Grandell, 2011
Öl- und Gasproduktion	2009	Mexiko	45	Ramirez (in Vorbereitung)
Öl- und Gasproduktion	2010	China	10	Hu et al., 2013

Fossile Brennstoffe (andere)				
Erdgas	2005	USA	67	Sell et al., 2011
Erdgas	1993	Kanada	38	Freise, 2011
Erdgas	2000	Kanada	26	Freise, 2011
Erdgas	2009	Kanada	20	Freise, 2011
Kohle (Grubenkraftwerk)	1950	USA	80	Cleveland et al., 1984
Kohle (Grubenkraftwerk)	2007	USA	60	Balogh et al. (unveröffentlicht)
Kohle (Grubenkraftwerk)	1995	China	35	Hu et al., 2013
Kohle (Grubenkraftwerk)	2010	China	27	Hu et al., 2013
Andere nichterneuerbare Energien				
Kernenergie	k. A.	USA	5 bis 15	Hall und Day, 2009; Lenzen, 2008
Erneuerbare Energien ²				
Wasserkraft	k. A.	k. A.	> 100	Cleveland et al., 1984
Windkraftanlage	k. A.	k. A.	18	Kubiszewski et al., 2010
Geothermie	k. A.	k. A.	k. A.	Gupta und Hall, 2011
Wellenenergie	k. A.	k. A.	k. A.	Gupta und Hall, 2011
Solarkollektoren ²				
Flachkollektoren	k. A.	k. A.	1,9	Cleveland et al., 1984
Brennspiegel-Kollektoren	k. A.	k. A.	1,6	Cleveland et al., 1984
Photovoltaik	k. A.	k. A.	6 bis 12	Kubiszewski et al., 2009
Passiv-Solar	k. A.	k. A.	k. A.	Cleveland et al., 1984
Biomasse				
Ethanol (Zuckerrohr)	k. A.	k. A.	0,8 bis 10	Goldemberg, 2007
Ethanol auf Maisbasis	k. A.	USA	0,8 bis 1,6	Patzek, 2004; Farrell et al., 2006
Biodiesel	k. A.	USA	1,3	Pimentel und Patzek, 2005

¹ Erntefaktoren-Werte (EROI) von mehr als 5:1 werden auf die nächste ganze Zahl gerundet.

² Es wird davon ausgegangen, dass die EROI-Werte je nach Geografie und Klima variieren und nicht einer bestimmten Region/Land zugeordnet werden.

Quelle: Hall et al. (2014, S. 145)

Auch in anderen EROI-Quellen als der soeben von Hall (2014) gezeigten, etwa in Wikipedia (2017), liegen die EROI-Erntefaktoren bei den erneuerbaren Energien deutlich unter denen der fossilen, aber es gibt stets lagebedingt große Bandbreiten bei den Werten zur Wasserkraft, Windkraft, Geothermie, Solarthermie (ST) und Photovoltaik (PV). Weil erst in der Zusammenschau von verschiedenen Bewertungskriterien wie dem Erntefaktor (EROI) oder der „energetischen Amortisation“ Unterschiede zwischen fossilen und erneuerbaren Energieträgern verständlich werden, sind in Tabelle 4 dazu Beispiele aufgeführt.

Tabelle 4: Energierücklaufzeit, Anlagenlebensdauer und Erntefaktor verschiedener Stromerzeugungsanlagen

Kraftwerkstechnologie	Energierücklaufzeit (Jahre)		Lebensdauer (Jahre)	Erntefaktor (Energie-Output/ Energie-Input)	
	untere Bandbreite	obere Bandbreite		untere Bandbreite	obere Bandbreite
Braunkohle, neu	1,9	3,7	30,0	2,0	5,4
Steinkohle, neu	0,5	3,6	30,0	2,5	20,0
Steinkohle, alt	1,0	2,6	30,0	2,9	10,1
Erdgas, fossil	1,9	3,9	30,0	1,9	5,6
Erdgas, Gas- und Dampfprozess	1,2	3,6	30,0	2,5	8,6
Schwerwasser-Atomreaktor	2,4	2,6	40,0	2,9	5,6
Leichtwasser-Atomreaktor	0,8	3,0	40,0	2,5	16,0
Photovoltaik	1,0	3,0	25,0	8,0	25,0
Solarthermie	0,7	7,5	25,0	1,0	10,3
Geothermie	0,6	3,6	30,0	2,5	14,0
Windkraft	0,1	1,5	25,0	5,0	40,0
Wasserkraft	0,1	3,5	70,0	6,0	280,0

Quelle: Österreichische Energieagentur (2017, S. 62)

Da im Zuge der Analyse mithilfe des EROI zwar das Verhältnis zwischen Input und Output an Energiemengen, nicht aber deren Flächenbedarfe behandelt wird, soll nun ein Index beschrieben werden, der genau das bilanziert. Das folgende Kapitel 3.3 erläutert dazu die Berechnungsbestandteile des Sustainable Process Index (SPI) über den kompletten Lebenszyklus einer Anlage zur Energiegewinnung, denn die Prozessphasen Errichtung, Betrieb und Recycling (nach der Betriebsphase) benötigen Flächen. Dabei war die „Formelbauweise“ des SPI bei der Entstehung dieses Flächenbedarfskataloges (siehe Kapitel 4) eine der wichtigsten Motivationen, anhand von bestehenden Anlagen insbesondere die Flächenbedarfe für die Energiegewinnung genauer zu überprüfen.

3.3 Der Index nachhaltiger Prozesse: Sustainable Process Index

Beim Sustainable Process Index (SPI) werden Flächen als funktionelle Einheit verwendet, da sie eine limitierte Ressource darstellen und Prozesse, die viel Fläche benötigen, aus ökologischer Sicht (siehe dazu Kapitel 4.3.) auch viel „kosten“. Ein niedriger SPI-Wert innerhalb einer bestimmten Systemgrenze steht für Nachhaltigkeit, weil die Summe der bewerteten Prozesse weniger Flächen erfordern, als regional pro Person und Jahr als „Angebot“ zur Verfügung stehen. Die folgende Abbildung 12 zeigt das Zusammenspiel und die Teil- und Gesamtsummen des SPI, der sämtliche Prozessschritte über den gesamten Lebenszyklus, vom Primärenergieaufwand der Energieproduktionsanlagen bis hin zum Abbau und des Recyclings all dieser Materialien, berücksichtigt.

Abbildung 12: Flächenbestandteile des Sustainable Process Index (SPI)

$$A_{tot} = AR + AE + AI + AS + AP$$

$$AR = ARR + ARF + ARN$$

$$AI = AID + AII$$

$$A_{tot} = (ARR + ARF + ARN) + AE + (AID + AII) + AS + AP$$

AR, die für die Produktion von Rohstoffen benötigte Fläche, berechnet sich aus der benötigten Fläche für erneuerbare Rohstoffe (ARR), für fossile Rohstoffe (ARF) und für nicht-erneuerbare Rohstoffe (ARN).

AE bezeichnet die Fläche, die für die Bereitstellung von Prozessenergie inklusive Elektrizität notwendig ist.

AI stellt die Gesamtfläche aus Infrastrukturinstallationen dar, die sich wiederum aus direktem Landverbrauch (AID) und der Fläche für Gebäude und Infrastrukturinstallationen (AII) zusammensetzt.

AS ist die Fläche, die für Arbeitskraft vorgesehen ist, und

AP bedeutet die Teilfläche zur Dissipation von Emissionen in Luft, Wasser und Boden.

Quelle: Narodoslawsky und Krotscheck (2013)

Der nun folgende Katalog für die Flächenbedarfe der Anlagen erneuerbarer Energieproduktion bezieht sich genau auf die oben als AI benannten Flächenanteile – aus den folgenden Gründen:

- Im regionalen Planungskontext geht es darum, große Flächen für die erneuerbaren Energiepotenziale nutzen zu wollen, wenn in der regionalen Energiebilanz deutliche Fortschritte beim Versorgungsanteil der erneuerbaren Energien am gesamten Endenergiebedarf gelingen sollen.
- Auch die Prozessanteile AI, AE, AS, AP sind für den SPI relevant, können aber durch regionale Standortentscheidungen kaum beeinflusst werden, weil Regionen sehr an ihr „Flächenportfolio“ und die daraus möglichen erneuerbaren Energiepotenziale gebunden sind.

Im Folgendem wird erklärt, wie aus den bisher beschriebenen „Denkwelten“ der Flächenbedarfskatalog entstanden ist und welche Eigenschaften und Fakten der einzelnen Anlagen in der Katalogdatenbank gesammelt erfasst wurden.

3.4 Bauweise und Datenerfassungsmethode des Kataloges der Flächenbedarfe von Anlagen erneuerbarer Energieproduktion

Der Flächenbedarfskatalog besteht aus Records zu bestehenden Anlagen der Geothermie, Solarenergie, Windkraft und Biomasse. Erfasst wurden vor allem die Energiepotenzialflächen, in einzelnen Fällen bzw. sofern aus den Datenquellen möglich, auch Flächenbedarfe der Kraftwerksgebäude. Lageschwerpunkt der Records war Österreich, aber zum Vergleich wurden auch Records aus anderen Ländern aufgenommen. Softwarebasis war Google Fusion Tables, ein Google-Webservice für Datenmanagement, weil dieses Tool Datenbankeigenschaften mit interaktiven Abfragemöglichkeiten und Kartendarstellungen in bedienungsfreundlicher Weise vereint.

3.4.1 „Katalogmethode“ der Datensammlung

Folgende vier Punkte bilden die Hauptrubriken der Datenbank, die das Kernstück des Katalogs darstellen:

- Name und Typ der Energieanlage
- Lage (Koordinaten)
- Flächen- und Energiedaten
- Quellendokumentation (Bilder und Zahlen)

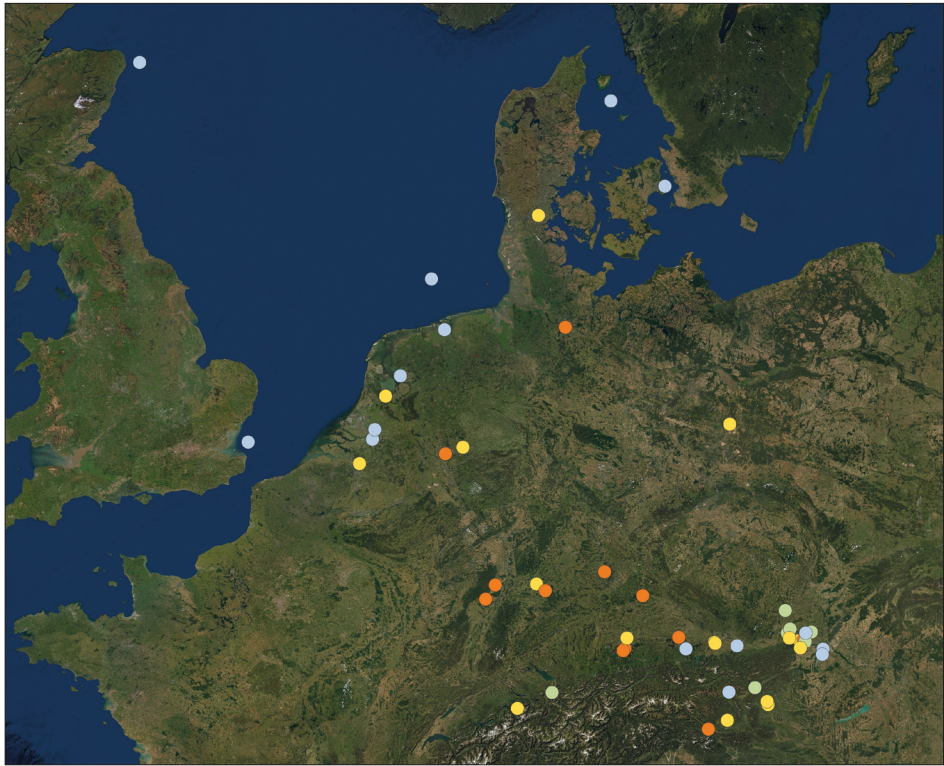
Tabelle 5: Dateneingabemaske und Lagekarte zum Flächenbedarfskatalog der Anlagen erneuerbarer Energieproduktion

<p>Name, Typ, Untertyp der Anlage</p> <p>Technische Informationen zur Anlage</p> <p>Bewertung des Bearbeitungsstandes und der Datenqualität</p> <p>Koordinaten</p> <p>Icon-Auswahl zur Unterscheidung in Kartenausgabeformen</p> <p>Energiepotenzialfläche</p> <p>Direkte Flächenbedarfe der Anlage</p> <p>Elektrische und/oder thermische Leistungs- und Arbeitswerte</p> <p>Errechnete Werte (thermisch, elektrisch): $m^2/kWh/a$ und $kWh/m^2/a$,</p> <p>Rechnerische Volllaststunden (= Arbeit/Leistung)</p> <p>Webadressen der Quellen (Bilder und Anlagendaten)</p>	<table border="1"> <tr> <td colspan="2">Name, Typ, Untertyp der Anlage</td> <td colspan="2">Edit row</td> </tr> <tr> <td>Row ID</td> <td>27025</td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td>Titel</td> <td>Windpark Munderfing, Oberostereich, Österreich</td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td>Typ</td> <td>Windkraft</td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td>Unter-Typ</td> <td>Onshore, Reihe, Bergkamm</td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td colspan="2">Technische Informationen zur Anlage</td> <td colspan="2">Info</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Bewertung des Bearbeitungsstandes und der Datenqualität</td> <td>record status</td> <td>fertig</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Koordinaten</td> <td>Datenqualität</td> <td>gut</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Icon-Auswahl zur Unterscheidung in Kartenausgabeformen</td> <td>lat</td> <td>48.0527767</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Energiepotenzialfläche</td> <td>long</td> <td>13.230147</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Direkte Flächenbedarfe der Anlage</td> <td>map_icon</td> <td>purple_blank</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Elektrische und/oder thermische Leistungs- und Arbeitswerte</td> <td>e_flaeche_ha</td> <td>150</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Errechnete Werte (thermisch, elektrisch): $m^2/kWh/a$ und $kWh/m^2/a$,</td> <td>e_xwanlage_flaesche_ha</td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="2">Rechnerische Volllaststunden (= Arbeit/Leistung)</td> <td>p_el_mmw</td> <td>15</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Webadressen der Quellen (Bilder und Anlagendaten)</td> <td>e_el_mwha</td> <td>15000</td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td>p_th_mmw</td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td>e_th_mwha</td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td>selektor_temp</td> <td>7</td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td>m2_kwh_el_a</td> <td>0.1</td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td>m2_kwh_th_a</td> <td>****</td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td>kwh_el_m2_a</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td>kwh_th_m2_a</td> <td>****</td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td>vollasth_a_el</td> <td>1000</td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td>vollasth_a_th</td> <td>****</td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td>Bild 1</td> <td>https://www.ewc-consulting.com/system/html/03-0078420.jpg</td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td>Bild 2</td> <td>http://www.munderfing.at/sites/munderfing/publicpool/files/styles/gallery_ostal_60_0xpublicimg_7436_xlein.jpg?</td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td>Bild 3</td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td>Daten-Quelle 1</td> <td>https://www.gwindkraft.at/?xmlval_id_K2Y03-1055</td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td>Daten-Quelle 2</td> <td>http://www.munderfing.at/windpark-munderfing-1</td> </tr> </table>	Name, Typ, Untertyp der Anlage		Edit row		Row ID	27025			Titel	Windpark Munderfing, Oberostereich, Österreich			Typ	Windkraft			Unter-Typ	Onshore, Reihe, Bergkamm			Technische Informationen zur Anlage		Info		Bewertung des Bearbeitungsstandes und der Datenqualität		record status	fertig	Koordinaten		Datenqualität	gut	Icon-Auswahl zur Unterscheidung in Kartenausgabeformen		lat	48.0527767	Energiepotenzialfläche		long	13.230147	Direkte Flächenbedarfe der Anlage		map_icon	purple_blank	Elektrische und/oder thermische Leistungs- und Arbeitswerte		e_flaeche_ha	150	Errechnete Werte (thermisch, elektrisch): $m^2/kWh/a$ und $kWh/m^2/a$,		e_xwanlage_flaesche_ha		Rechnerische Volllaststunden (= Arbeit/Leistung)		p_el_mmw	15	Webadressen der Quellen (Bilder und Anlagendaten)		e_el_mwha	15000			p_th_mmw				e_th_mwha				selektor_temp	7			m2_kwh_el_a	0.1			m2_kwh_th_a	****			kwh_el_m2_a	10			kwh_th_m2_a	****			vollasth_a_el	1000			vollasth_a_th	****			Bild 1	https://www.ewc-consulting.com/system/html/03-0078420.jpg			Bild 2	http://www.munderfing.at/sites/munderfing/publicpool/files/styles/gallery_ostal_60_0xpublicimg_7436_xlein.jpg?			Bild 3				Daten-Quelle 1	https://www.gwindkraft.at/?xmlval_id_K2Y03-1055			Daten-Quelle 2	http://www.munderfing.at/windpark-munderfing-1
Name, Typ, Untertyp der Anlage		Edit row																																																																																																																			
Row ID	27025																																																																																																																				
Titel	Windpark Munderfing, Oberostereich, Österreich																																																																																																																				
Typ	Windkraft																																																																																																																				
Unter-Typ	Onshore, Reihe, Bergkamm																																																																																																																				
Technische Informationen zur Anlage		Info																																																																																																																			
Bewertung des Bearbeitungsstandes und der Datenqualität		record status	fertig																																																																																																																		
Koordinaten		Datenqualität	gut																																																																																																																		
Icon-Auswahl zur Unterscheidung in Kartenausgabeformen		lat	48.0527767																																																																																																																		
Energiepotenzialfläche		long	13.230147																																																																																																																		
Direkte Flächenbedarfe der Anlage		map_icon	purple_blank																																																																																																																		
Elektrische und/oder thermische Leistungs- und Arbeitswerte		e_flaeche_ha	150																																																																																																																		
Errechnete Werte (thermisch, elektrisch): $m^2/kWh/a$ und $kWh/m^2/a$,		e_xwanlage_flaesche_ha																																																																																																																			
Rechnerische Volllaststunden (= Arbeit/Leistung)		p_el_mmw	15																																																																																																																		
Webadressen der Quellen (Bilder und Anlagendaten)		e_el_mwha	15000																																																																																																																		
		p_th_mmw																																																																																																																			
		e_th_mwha																																																																																																																			
		selektor_temp	7																																																																																																																		
		m2_kwh_el_a	0.1																																																																																																																		
		m2_kwh_th_a	****																																																																																																																		
		kwh_el_m2_a	10																																																																																																																		
		kwh_th_m2_a	****																																																																																																																		
		vollasth_a_el	1000																																																																																																																		
		vollasth_a_th	****																																																																																																																		
		Bild 1	https://www.ewc-consulting.com/system/html/03-0078420.jpg																																																																																																																		
		Bild 2	http://www.munderfing.at/sites/munderfing/publicpool/files/styles/gallery_ostal_60_0xpublicimg_7436_xlein.jpg?																																																																																																																		
		Bild 3																																																																																																																			
		Daten-Quelle 1	https://www.gwindkraft.at/?xmlval_id_K2Y03-1055																																																																																																																		
		Daten-Quelle 2	http://www.munderfing.at/windpark-munderfing-1																																																																																																																		

Quelle: eigene Darstellung

Zunächst war Österreich der räumliche Schwerpunkt der Datenbankrecords, aber im Laufe der Bearbeitung wurden zum Zweck der besseren Vergleichbarkeit auch Records aus europäischen (und einigen anderen) Ländern ergänzt. Die folgende Karte 1 zeigt dazu einen Europaausschnitt und die Gesamt- und Teilmengen der Anlagenrecords je erneuerbarem Energieträger.

Karte 1: Lageübersicht der Records aus dem Katalog



Übersicht der Records, nach Mengen, Typ und Subtypen

Geothermie	15 Records, seichte Geothermie (Tief- und Flachkollektorenfelder) und tiefe hydrothermale Geothermie, Endenergieformen Wärme und/oder Elektrizität
Biomasse	9 Records, Wärmeerzeugung aus Waldhackschnitzel, Biogas (Mais), Stroh, Kurzumtrieb (Pappeln)
Solarenergie	30 Records, gebäudeintegriert oder im Freiland, vollflächige oder aufgeständerte Kollektorenfelder, CSP (Concentrated Solar Power)-Anlagen, Endenergieformen Wärme oder Elektrizität
Windkraft	18 Records, Einzel-, Reihen- oder Clusterformation, Ebene, Bergkämme, nearshore, offshore, Endenergieform Elektrizität

Quelle: Basiskarte (Google Maps, 2016) und eigene Darstellung (Verortung der Energieanlagen)

3.4.2 Begründung zu Auswahl und Ausschluss bestimmter erneuerbarer Energieträger

Neben den Anlagenrecords (Haupt- und Untertypen) der Geothermie, Solarenergie, Windkraft und der Biomasse gibt es weitere Anlagentypen, die aus verschiedenen Gründen nicht in den Katalog aufgenommen werden konnten.

Bei der Wasserkraft wäre es anlagenspezifisch überaus schwierig gewesen, einen horizontalen Flächenbedarf inklusive der Kraftwerksanlagenanteile, aber auch der Ausgleichsflächen und Gewässerströme überhaupt zu ermitteln. Dies betrifft sowohl große Laufkraft- und Speicherkraftwerke, aber ebenso die ca. 3.100 österreichischen Kleinwasserkraftanlagen, die (laut Kleinwasserkraft Österreich, 2017) 10 Prozent des österreichischen Strombedarfes bzw. 1,7 Millionen Haushalte mit Strom versorgen. Außerdem wird in Österreich die Großwasserkraft als „zu mindestens 85 % ausgebaut“ eingestuft (Stanzer, Novak, Dumke et al., 2010). Zu diesen sehr geringen Ausbaupotenzialen kommen sehr gravierende, kaum oder nur mit sehr hohem Aufwand und Kosten rückbaubare, negative Umweltbeeinträchtigungen (Kaltschmitt, Streicher und Wiese, 2006, S. 381).

Ebenfalls nicht im Katalog enthalten sind Anlagen der Umgebungswärme, die Wärme aus der Luft oder aus industriellen Prozessen umwandeln. Auch bei diesen Anlagen wäre die Ermittlung eines horizontalen Flächenbedarfs für den Rahmen dieser Publikation zu komplex.

Nach den einleitenden Kapiteln zum Forschungshintergrund und der empirischen Forschungsmethode folgen nun Sachkapitel zu Geothermie (3.5), Solarenergie (3.6), Windkraft (3.7) und Biomasse (3.8). Diese Abschnitte enthalten Unterkapitel zu den Themen Prozesskette der Energieumwandlung, Anlagenarten und Bauformen, lageabhängige und -unabhängige Energieertragsunterschiede, räumlich bedingte Potenzialunterschiede in Österreich, Regelenergiefähigkeit, Eignung zur Grundlast- und Spitzenlastversorgung und zusammenfassende Erkenntnisse zu Flächenkonkurrenzen und Umweltwirkungen. Illustriert werden die Sachkapitel mit Anlagenbeispielen aus dem Flächenbedarfskatalog.

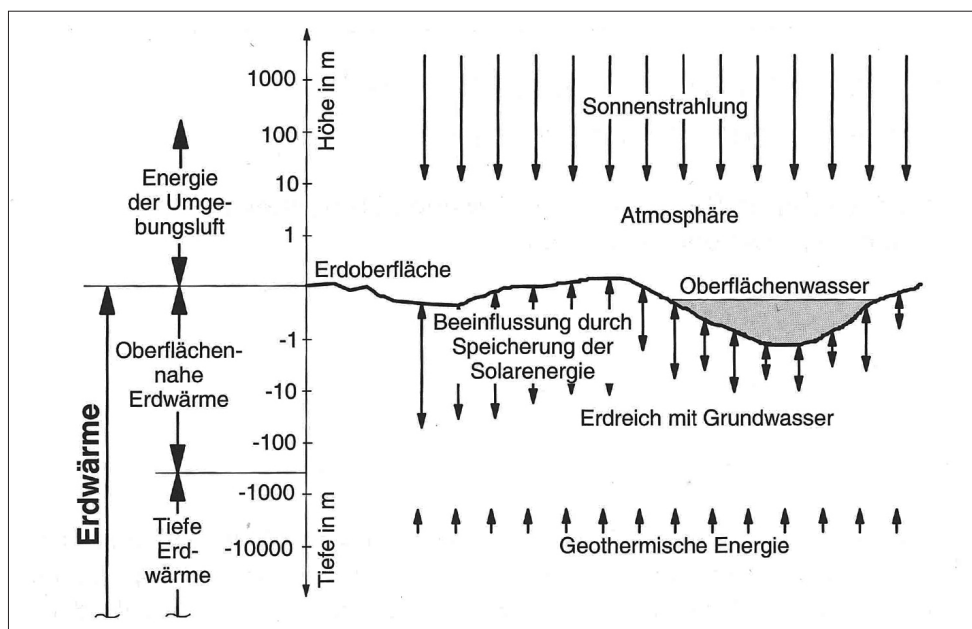
3.5 Flächenbedarfe, Flächenkonkurrenzen und Umweltaspekte bei der Energiegewinnung aus Geothermie

Dieses Kapitel behandelt die Prozesskette der Energieumwandlung, Anlagenarten, lageabhängige und -unabhängige Faktoren unterschiedlicher Energieerträge (Wärme) und im empirischen Teil Anlagenbeispiele der seichten und tiefen hydrothermalen Geothermie. Im Weiteren werden Flächenkonkurrenzen und Umweltwirkungen der Geothermie erörtert und abschließend reflektiert, welche Erkenntnisse zur Forschungsfrage nach dem Flächenbedarf dieser Art von Energieerzeugung ($\text{m}^2/\text{kWh/a}$) möglich sind.

3.5.1 Prozesskette der Energieumwandlung und Nutzenergieformen bei der Geothermie

Die seichte oder tiefe Geothermie (oft auch als „Erdwärme“ bezeichnet) nutzt sowohl die Strahlungsleistung der auf die Erdoberfläche einfallenden Sonnenstrahlen in das Erdreich als auch die „tiefe“ Erdwärme der heißen Erd-, Gesteins- und Wasserschichten. Bei der sogenannten seichten Geothermie spielen die Temperatur- und Klimaunterschiede des solaren oberirdischen Wärmeeintrags eine Rolle, mit zunehmender Bodentiefe werden diese Wärmeertragsunterschiede nach geografischer Lage deutlich kleiner. In der Fachliteratur gibt es zwischen seichter und tiefer Geothermie keine eindeutige, vertikal unterirdisch zu messende Grenztiefe in Metern. Die folgende Abbildung 13 nennt dafür als Schwellenwert etwa 400 Meter.

Abbildung 13: Schichtmodell zur Abgrenzung zwischen seichter und tiefer Geothermie

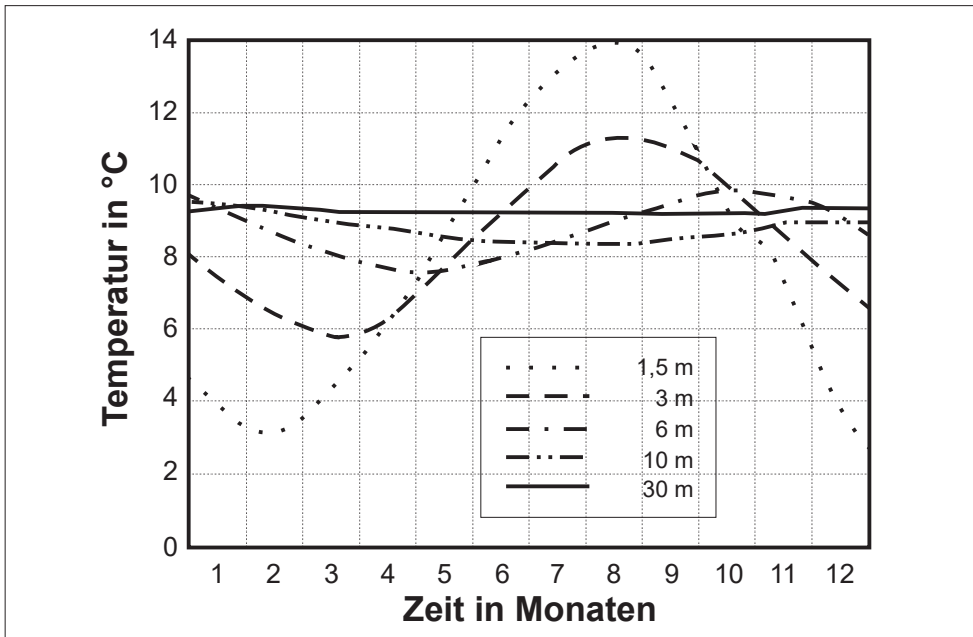


Quelle: Kaltschmitt, Streicher und Wiese (2014, S. 622)

In der Fachliteratur einheitlicher gehandhabt wird die Bestimmung der Bodentiefe. Die durch die solare Einstrahlung bedingten Temperaturunterschiede gehen gegen null, d. h., unterhalb dieser Tiefe gibt es kaum mehr klimatisch oder saisonal bedingte Ertragsunterschiede, weder beim Temperaturniveau saisonal zwischen Winter und Sommer noch lageabhängig (zwischen kalten und warmen Klimazonen). Auch die Wärmeentnahme ist unterhalb solcher Tiefen zeitlich nicht begrenzt und (falls von der Abnahmesituation her sinnvoll) bis zu einem 24/7-Betrieb technisch möglich.

Abbildung 14 benennt diesen Tiefenschwellenwert mit ca. 30 Metern: Je höher über diesem Wert die Wärmeentnahme erfolgt, umso größer sind die saisonalen und lagebedingten Wärmeertragsunterschiede.

Abbildung 14: Exemplarische Temperaturschwankungen seichter Geothermie nach Tiefen und Monaten



Quelle: Kaltschmitt, Streicher und Wiese (2006, S. 111)

Neben der Tiefe sind geothermische Energieerträge auch durch den Grad der Lageabhängigkeit und spezifische Bodeneigenschaften unterschiedlich. Vereinfacht gesagt steht eine fast lageunabhängige Potenzialsituation für ein großes zusätzliches Potenzial – und umgekehrt. Außerdem bedeuten große Bohrtiefen auch höhere Bohr- und Erschließungskosten. Tabelle 6 systematisiert diese Unterschiede und nennt dazu fünf verschiedene Geothermiearten.

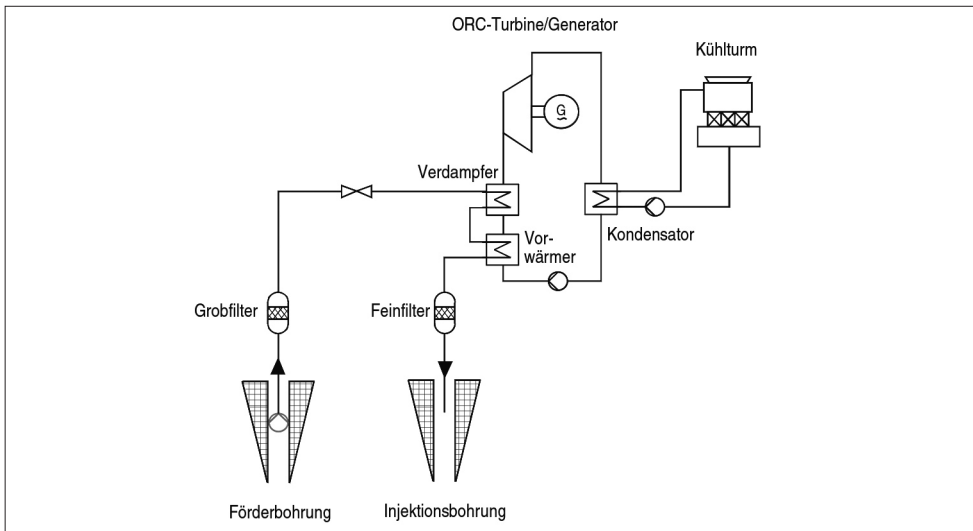
Tabelle 6: Fünf Arten geothermischer Energievorkommen nach Bodentiefe und Potenzialstärke

Art	Tiefe	Temperaturen	Temperaturbeeinflussung	Lageabhängigkeit des Energieertrages	Energieerzeugung	Künftig realisierbares Zusatzpotenzial
Oberste Erdschichten	bis ca. 400 m	bis ca. 20 °C	generell durch Wärmeleitfähigkeit des Bodens, bis 20 m durch solare Einstrahlung, darunter durch aufgeheizte Grundwässer	gering	Wärmetausch durch ein geschlossenes Rohrleitungssystem (Wärmeträgermedium in Schlingen oder Tiefsonden)	sehr groß
Hydrothermale Niederdrucklagerstätten	um ca. 3.000 m	Warm- und Heißwasservorkommen (100 °C bzw. über 100 °C), Heiß- und Trockendampf-vorkommen (über 150 °C)	Mächtigkeit der heißen Gesteins- und Wasserschicht	hoch	Entnahme und Rückinjektionsbohrung, Wärmetausch an der Oberfläche im Wärmetauscher	gering, wegen starker Lagerabhängigkeit
Hydrothermale Hochdrucklagerstätten	wie Niederdrucklagerstätten	wie Niederdrucklagerstätten	wie Niederdrucklagerstätten, aber heißes Wasser ist durch Gase (oft Methan) vorgespannt	hoch	wie Niederdrucklagerstätten (evtl. weniger Pumpleistung nötig)	wie Niederdrucklagerstätten
Heiße, trockene Gesteine	bis ca. 10.000 m	mehrere hundert Grad Celsius		gering	durch hohen Druck künstliches Einbringen von Wasser, danach Entnahme und Rückinjektion	nach gering, derzeitige seismische Risiken hoch, trotzdem höchstes technisch machbares Potenzial aller Geothermieformen
Magmavorkommen	3.000 bis 10.000 m	über 700 °C	Nähe von tektonisch aktiven Zonen und/oder Vulkanen	hoch	Entnahme/Wärmetausch der Fluidsysteme in Magmanähe	sehr gering, weil große technische Hürden

Quelle: eigene Zusammenfassung (Spalten „Lageabhängigkeit“ und „realisierbares Zusatzpotenzial“) nach Kaltschmitt, Streicher und Wiese (2006, S. 108 ff)

Als Nutzenergieformen der Geothermie sind sowohl Wärme und Kälte als auch Elektrizität sowie Kombinationen aus diesen Endenergieformen möglich. Die geothermische Elektrizitätserzeugung braucht üblicherweise ein erheblich höheres Temperaturniveau als die Wärme- und Kälteerzeugung, weil zum Betrieb des Stromgenerators mehr Hitze als zum Heizen und Kühlen gebraucht wird. Eine Ausnahme von dieser Regel sind die (bisher noch sehr teuren) ORC (Organic Rankine Cycling)-Turbinen, die mit dem Verdampfen organischer Flüssigkeiten wie u. a. Ammoniak arbeiten; dazu genügen auch niedrigere Siedetemperaturen als beim Wasser (ORC Fachverband e.V., 2017). In den wirtschaftlich machbaren Varianten ist die geothermische Elektrizitätserzeugung, die schematisch in Abbildung 15 gezeigt wird, also stärker abhängig von besonderen „heißen“ Potenzialgunstlagen als die Wärme- und Kältebereitung.

Abbildung 15: Schaltschema einer Anlage zur geothermischen Stromerzeugung



Quelle: Kaltschmitt, Streicher und Wiese (2006, S. 515)

Neben den energetischen Nutzformen (Wärme und/oder Kälte und/oder Elektrizität) wird die hydrothermale Geothermie seit Jahrtausenden auch „direkt“ zu Erholungszwecken in Thermalbädern benutzt. Diese Nutzungsform ist auch im Kombibetrieb mit der Wärmenutzung möglich. Andere Nutzungsformen sind ebenfalls kombiniert oder einzeln möglich, aber im Anlagenbetrieb erheblich seltener als die „rein“ energetischen Nutzformen: die Wärmenutzung in Gewächshäusern, in Aquakulturen, in der industriellen Nutzung (Prozesswärme) oder in landwirtschaftlichen Trocknungsprozessen (Bundesverband Geothermie, 2005).

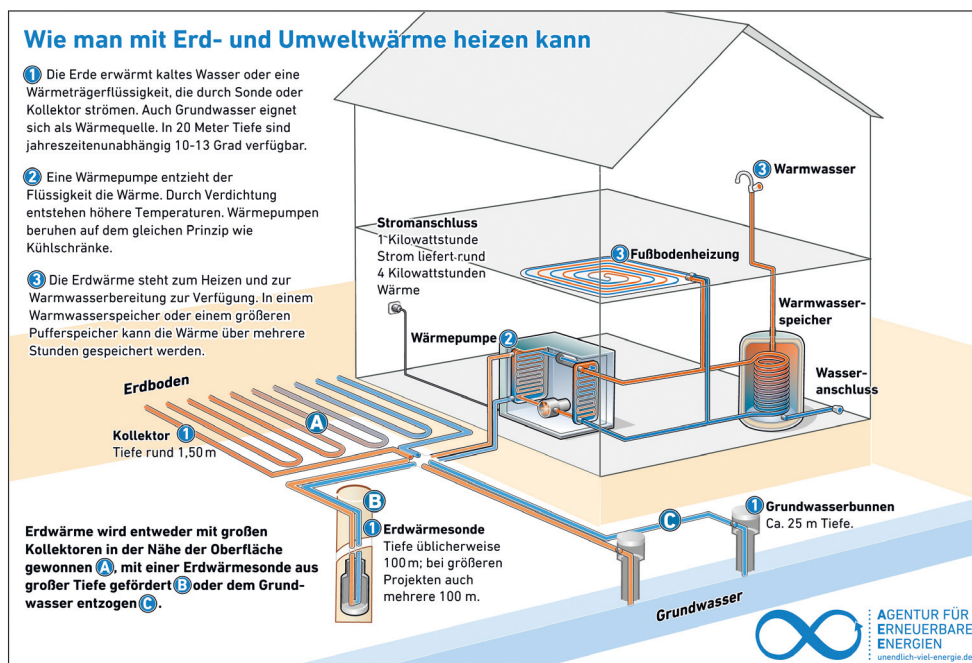
3.5.2 Arten und Bauformen von Geothermieranlagen

Es gibt zwei verschiedene Funktionsweisen bei geothermischer Energiegewinnung: Entweder es kreist zum Wärmetausch ein Übertragungsmedium in einem zum Erreich

oder im Grundwasserkörper geschlossenen Leitungssystem oder es wird heißes Tiefenwasser (hydrothermale Geothermie) an die Erdoberfläche gepumpt, um dort die Wärme mit einem Wärmetauscher zu entnehmen, an ein Wärmenetz abzugeben und danach das dann abgekühlte Wasser wieder zurück in den Boden zu injizieren.

Die geschlossenen Rohrleitungssysteme können sowohl flach, d. h. meist bis in nur wenige Meter Tiefe, oder in einem Tiefsondenfeld bis in Tiefen von einigen hundert Metern verlegt werden. Die Flachkollektoren sind bei den Errichtungskosten erheblich günstiger als die Tiefsonden, brauchen aber horizontal mehr Fläche pro Energieertrag als Tiefsondenfelder. Abbildung 16 zeigt schematisch die Unterschiede der Kollektorenarten seichter Geothermie in Bezug auf den Wärmespeicher (Erdreich und/oder Grundwasser) und die Bauform der Wärmekollektoren (Flach- oder Tiefkollektoren).

Abbildung 16: Anlagenarten seichter Geothermie



Quelle: Agentur für erneuerbare Energien (2016)

Die Abbildung zeigt auch einen weiteren Hauptunterschied der verschiedenen Wärmepumpensysteme: Horizontale oder vertikale Systeme können aus geschlossenen Leitungen, in denen ein Übertragungsmedium kreist, bestehen. Aber es gibt auch offene Systeme, die das oberflächennahe Grundwasser oder die Luft als Wärmeträger nutzen. Diese bautechnischen Unterschiede sind in der folgenden Tabelle 7 erklärt.

Tabelle 7: Varianten der Erschließung der Energie des flachen Untergrunds

	Tiefe	Wärmeträger	Bemerkungen
Geschlossene Systeme			
Erdwärmekollektoren (horizontal)	1,2–2,0 m	Sole ¹	Klimaeinfluss, große Fläche
Direktverdampfung (horizontal)	1,2 –2,0 m	Wärmepumpen-arbeitsmittel	Material Kupfer, ggf. beschichtet
Erdwärmesonden			
gerammt (vertikal oder schräg)	5–30 m	Sole ¹	Material Stahl, ggf. Kunststoff, nur in Lockergestein
gebohrt (vertikal)	25 –250 m	Sole ¹ , ggf. Wasser	Material HDPE (High-density polyethylene), ideal in Festgestein
Wärmeübertragungspfähle („Energiepfähle“, horizontal oder vertikal)	5–30 m	Wasser, ggf. Sole ¹	statische Funktion hat Vorrang, möglichst keine Frosttemperaturen
Offene Systeme			
Grundwasserbrunnen (Dublette)	4–100 m	Wasser	mind. 2 Brunnen (Förder- und Schluckbrunnen), Unterwasserpumpe
Sonstige Systeme			
Koaxialbrunnen (vertikal)	120–250 m	Wasser	hohe Bohrkosten, nicht überlastbar
Gruben-/Tunnelwasser		Wasser	Möglichkeiten lokal begrenzt
Luftvorheizung/-kühlung (horizontal)	1,2 –2,0 m	Luft	Rohre im Erdreich, durch welche Luft gesaugt wird

Die Tiefenangaben beziehen sich auf typische Mittelwerte.

¹ Wasser-Frostschutz-Gemisch (früher Salze, heute eher Alkohole oder Glykole)

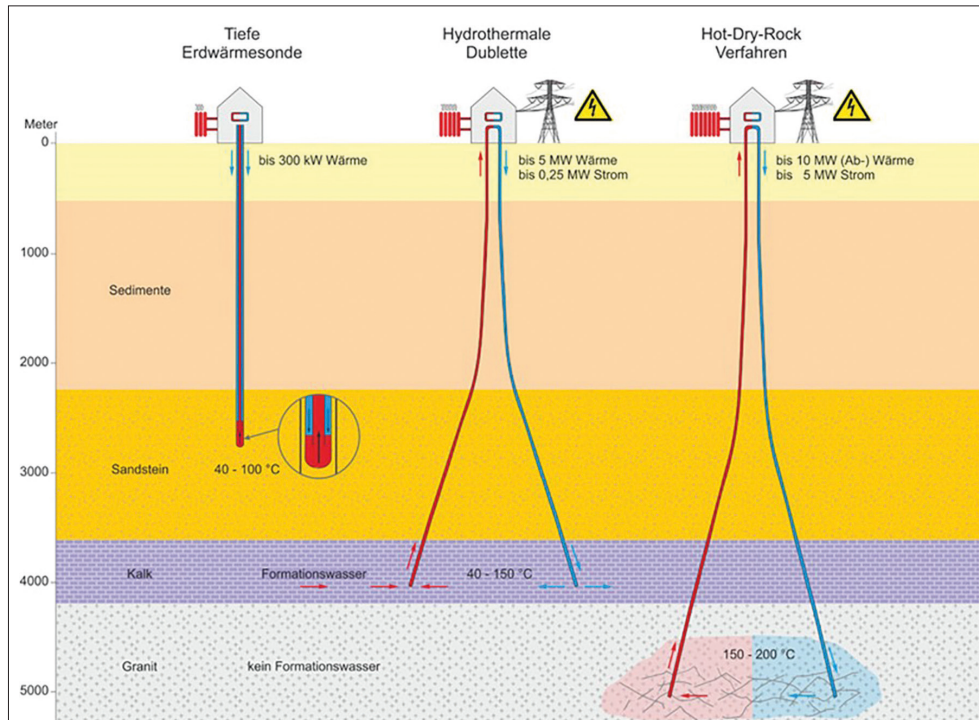
Quelle: Kaltschmitt, Streicher und Wiese (2006, S. 409)

Während die seichte Geothermie grundsätzlich „überall“ umsetzbar ist (wenngleich mit den erwähnten klimatisch bedingten Ertragsunterschieden), gilt dies für die tiefe hydrothermale Geothermie nicht. Sie benötigt für den wirtschaftlichen Betrieb eine Lage mit geologischen „Wärmeanomalien“, d. h. das nachgewiesene Vorkommen eines geeigneten Aquifers (wasserführende Bodenschicht) mit passendem Temperaturniveau und auch mit einer Mindestschüttung (Liter pro Sekunde, l/s) in Tiefen zwischen zwei und vier Kilometern.

Zur tiefen Geothermie gehört auch eine weitere Anlagenart, die aber (von wenigen aktiven Pilotanlagen abgesehen) im seriellen Energiesystembetrieb noch keine bedeutende Rolle spielt: Enhanced Geothermal Systems (EGS) ist ein Oberbegriff für das künstliche Einpressen von Wasser in große Tiefen und Gesteinsklüfte ab zwei Kilometern. Die Vorteile sind ein erheblich höheres Temperaturniveau und die Lage-unabhängigkeit von Aquiferen, die Nachteile liegen in den sehr hohen Bohrkosten und auch den seismischen Risiken dieser Anlagenform. Synonyme Begriffe zu den EGS sind Hot Dry Rock, Deep Heat Mining, Hot Wet Rock, Hot Fractured Rock oder

Stimulated Geothermal Systems. In der Umwandlungsart „Wasserentnahme mit Wärmetausch und Rückinjektion“ funktioniert diese Anlagenform gleich wie die tiefe hydrothermale Geothermie, aber beim Hot-Dry-Rock-Verfahren wird (im Gegensatz zum hydrothermalen Verfahren) künstlich Wasser in die tiefen Gesteinsschichten gepresst. Diese drei wesentlichen Bauweisen der hydrothermalen Geothermie sind in Abbildung 17 dargestellt.

Abbildung 17: Anlagenarten tiefer Geothermie



Quelle: KBB Underground Technologies (o. J.)

Aktuell am meisten verbreitet sind Anlagen der seichten Geothermie mit geringen Leistungen, die ein einzelnes oder einige wenige Gebäude mit Erdwärme versorgen können. Häufig wird die Erdwärme mit anderen erneuerbaren und nichterneuerbaren Energieproduktionsweisen kombiniert, etwa mit anderen Wärmepumpen (luft- und/oder grundwasserbasiert) oder auch mit Solarthermie und Photovoltaik.

Wesentlich seltener im aktiven Betrieb sind leistungsstarke Anlagen der tiefen hydrothermalen Geothermie, die in ein angeschlossenes Wärmenetz einspeisen und entweder alleine oder im Kombibetrieb mit anderen erneuerbaren oder nichterneuerbaren Energieträgern mehrere hunderte oder tausende Haushalte versorgen können.

3.5.3 Beispiele für Geothermieranlagen nach Lage und Typ

Die folgende Tabelle 8 zeigt Beispiele für die Leistungs- und Größenvielfalt der Geothermieranlagen aus dem Flächenbedarfskatalog, um die bisherigen Ausführungen anhand von in der Praxis besonders häufig vorkommenden Anlagenbeispielen zu ergänzen. Diese Beispiele sind aufsteigend nach dem Energieertrag sowie nach der Anlagenform sortiert. Die unter dem Punkt „Fläche“ genannten Werte nennen die horizontale Größe der Fläche, der Wärme entzogen wird. In den hier gezeigten Records ist diese Fläche lageident mit den Gebäuden der Kraftwerksanlagen, weil diese direkt über dem Wärmeentzugsgebiet (Erdreich) stehen.

Tabelle 8: Geothermieranlagen nach Lage, Typ und Größe

Seichte Geothermie, Flachkollektoren	
 <p>Foto: Kluge, J. (2014)</p>	<p>Name, Lage: Geothermie „Agrothermie“ Wüstenrot, Baden-Württemberg, Deutschland</p> <p>Untertyp: seichte Geothermie, Flachkollektoren</p> <p>Info: Agrothermie-Flächen, Flachkollektor-Ringleitungen in ca. 2 m Tiefe in landwirtschaftlich genutzten Böden verlegt. Wärmeertrag speist in das lokale Kaltwärmenetz (synonym für Niedrigtemperaturversorgung) ein, welches auch Kühlprozessabwärme (geplant vom REWE-Supermarkt) und Biomasse (Hackschnitzel) nutzt. Die Größe der Agrothermie-Fläche wurde unter der Annahme der unteren Wärmeentzugsleistung auf den Wärmebedarf der 25 bereits angeschlossenen Wohngebäude inklusive der zusätzlichen künftigen Gebäude optimiert.</p> <p>Fläche (ha): 1,5</p> <p>Leistung (MW th/a): 0,3</p> <p>Energie (MWh th/a): 600</p>
<p>Kein Foto vorhanden</p>	<p>Name, Lage: Geothermische Einfamilienhausanlage, Musterrechnung für Österreich (trockener Lehmboden)</p> <p>Untertyp: seichte Geothermie, Flachkollektoren</p> <p>Fläche (ha): 0,03 (300 m²)</p> <p>Leistung (MW th/a): 0,006</p> <p>Energie (MWh th/a): 10,8</p>

Tiefe Geothermie, hydrothermal	
	<p>Name, Lage: Geothermie Landau, oberrheinischer Tiefgraben, Deutschland</p> <p>Untertyp: tiefe Geothermie, hydrothermal</p> <p>Info: Wärme (aus Tiefenwasser-Wärmetausch) und Elektrizität (ORC-Turbine), Betriebsstart 2007, Bohrteufe 3.000 m, Wassertemperatur 159 °C, Schüttung 70 l/s. Derzeit ungewisse Zukunft, auch wegen Bebenproblemen (2,4–2,7 Magnitudenwert nach Richter) mit „wahrscheinlichem“ kausalem Zusammenhang zum Kraftwerk – eine Bürgerinitiative ist in Gegnerschaft aktiv.</p> <p>Fläche (ha): 2.890</p> <p>Leistung (MW th/a): 2,01</p> <p>Energie (MWh th/a): 15.300</p>
	<p>Name, Lage: Geothermie Braunau-Simbach, Deutschland/Österreich</p> <p>Untertyp: tiefe Geothermie, hydrothermal</p> <p>Info: Wärme mit Fernwärmenetzanbindung, Förder-temperatur 80 °C, Schüttung 90 l/s. Sonstige Wärmeerzeugung: Biogas BHKW (1 GWh/a), Erdgas Spitzenkessel (17 GWh/a), Fernwärmenetz Wärmeverkauf 55 GWh/a. Anschlussleistung 43 MW, Netzlänge 38 km, 760 Kundenanschlüsse.</p> <p>Fläche (ha): 8.611</p> <p>Leistung (MW th/a): 9,4</p> <p>Energie (MWh th/a): 46.500</p>
	<p>Name, Lage: Geothermie Grünwald (Laufzorn), Bayern, Deutschland</p> <p>Untertyp: tiefe Geothermie, hydrothermal</p> <p>Info: Wärme (aus Tiefenwasser-Wärmetausch) und Elektrizität (ORC-Turbine), Betriebsstart 2011, Schüttung 132 l/s, Wassertemperatur 135 °C. Fernwärme-Verbund mit Unterhaching.</p> <p>Fläche (ha): 2.809</p> <p>Leistung (MW th/a): 40</p> <p>Energie (MWh th/a): 59.580</p>

Foto: Geox GmbH (2015)

Foto: Geothermie Wärmegesellschaft Braunau-Simbach mbH – GBS (2015)

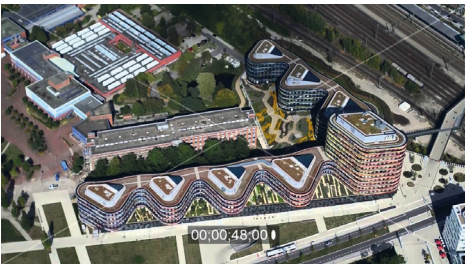

Foto: Süddeutsche Zeitung (2016)

Seichte Geothermie, Tiefsondenfelder	
	<p>Name, Lage: Geothermie Panalpina Logistikhalle, Nürnberg, Deutschland</p> <p>Untertyp: seichte Geothermie, Tiefsondenfeld</p> <p>Info: Baujahr 2008, L-förmiger Bürokomplex (ca. 1.700 m² Fläche) im Industriegebiet von Nürnberg, Grundstücksgröße 1,04 ha. Unter der Bodenplatte der Halle befindet sich das geothermische Sondenfeld. Bohrtiefenbegrenzung von 75 m, um das Grundwasserstockwerk ab 85 m Tiefe zu schützen.</p> <p>Fläche (ha): 1,04</p> <p>Leistung (MW th/a): 0,558</p> <p>Energie (MWh th/a): 670</p>
	<p>Name, Lage: Geothermie, Zentrum für berufliche Bildung und Weiterbildung in Duisburg, Deutschland</p> <p>Untertyp: seichte Geothermie, Tiefsondenfeld</p> <p>Info: Baujahr 2011. Drei Berufsschulen für insgesamt mehr als 5.000 SchülerInnen. Im zentralen Bereich des Gebäudekomplexes sind eine Aula, die Mensa und eine 4-Feld-Sporthalle mit Besuchertribüne integriert. Geothermisches Sondenfeld zur Beheizung, aus 180 Bohrungen, die sich zum großen Teil unter der Bodenplatte befinden. Vor der Umsetzung wurden Thermal-Response-Tests durchgeführt, um die Wärmekapazität genau dimensionieren zu können.</p> <p>Fläche (ha): 1,04</p> <p>Leistung (MW th/a): 1,476</p> <p>Energie (MWh th/a): 1.395</p>
	<p>Name, Lage: Geothermie des Nordbahnhof-Areals, Wien, Österreich (Projektplanung)</p> <p>Untertyp: seichte Geothermie, Tiefsondenfeld</p> <p>Info: geschlossene Wärmetauschersysteme, Projektdaten 2014 im Rahmen der Studie „Vorstudie zum Fachkonzept Energie-Raum-Planung“: Feld mit 2.375 Sonden (je 100 m tief) auf einer Fläche von 0.47 km².</p> <p>Fläche (ha): 46,56</p> <p>Leistung (MW th/a): 6,172</p> <p>Energie (MWh th/a): 14.196</p>

Foto: Verein repowermap.org (2015)

Foto: geoENERGIE Konzept GmbH (2015)

Foto: Magistrat der Stadt Wien, Magistratsabteilung 21 – Stadtteilplanung und Flächennutzung (2014)

Seichte Geothermie, Tiefsondenfelder, Fundamentpfähle	
 <p>Foto: BSU Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt, Hamburg-Wilhelmsburg © LGV (2015)</p>	<p>Name, Lage: Geothermie BSU Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt, Hamburg-Wilhelmsburg, Deutschland</p> <p>Untertyp: seichte Geothermie, Tiefsondenfeld, Fundamentpfähle</p> <p>Info: Baujahr 2013, damals Deutschlands größte Energiepfahlanlage (950 Sonden), mit der Erdwärme werden die Büros von 1.500 Mitarbeitern beheizt und gekühlt.</p> <p>Fläche (ha): 1,18</p> <p>Leistung (MW th/a): 0,65</p> <p>Energie (MWh th/a): 858</p>
 <p>Foto: ATRIO Shopping Center GmbH (2007)</p>	<p>Name, Lage: Geothermie ATRIO Shopping Center Villach, Kärnten, Österreich</p> <p>Untertyp: seichte Geothermie, Tiefsondenfeld, Fundamentpfähle</p> <p>Info: Wärme und Kälte, aktivierte Fundamentenergiepfähle. Winter: Heizen mit Wärmepumpen; Sommer: Kühlen mit Kältemaschinen (Ableitung der Kälteproduktionskondensatoren in das Erdreich) oder im Free-cooling-Betrieb (Direktnutzung der Erdkälte über das Medium Wasser/Umwälzpumpen). Baustart 2005, Energy-Globe Award Kärnten 2007. Thermoaktive Fundamente/Erdpendelspeicher in 652 von 80 Betonpfählen, die 33 bis 70 m tief liegen.</p> <p>Fläche (ha): 2,86</p> <p>Leistung (MW th/a): 14</p> <p>Energie (MWh th/a): 1.220</p>

Quelle: eigene Darstellung

3.5.5 Lageunabhängige Ertragsunterschiede bei geothermischer Energiegewinnung

Unabhängig vom Temperaturniveau nach Bodentiefe und solarer Einstrahlung hat die Beschaffenheit und der Feuchtigkeitsgehalt des Bodens viel Einfluss auf die möglichen Wärmeentzugsleistungen. Vereinfacht gesagt bringt ein hoher Feuchtigkeitsgehalt und eine hohe Dichte des Gesteins einen potenziell höheren Energieertrag als trockene und lockere Böden. In Tabelle 9 sind die dafür typische Entzugsleistungen entlang dieser Unterschiede nach Bodenarten und -feuchtigkeit für Kleinanlagen der seichten Geothermie aufgeführt.

Tabelle 9: Spezifische Entzugsleistungen (Watt pro Sondenmeter) der Erdwärme, nach Bodenart und Feuchtigkeitsgehalt

	1.800 h/a Entzugsleistungen in W/m	2.400 h/a Entzugsleistungen in W/m
Allgemeine Richtwerte		
schlechter Untergrund (trockene Lockergesteine)	25	20
Festgesteinsuntergrund, wassergesättigte Lockergesteine	60	50
Festgestein mit hoher Wärmeleitfähigkeit	84	70
Einzelne Gesteine		
Kies, Sand, trocken	< 25	< 20
Kies, Sand, wasserführend	65–80	55–65
Kies, Sand, starker Grundwasserfluss, für Einzelanlagen	80–100	80–100
Ton, Lehm, feucht	35–50	30–40
Kalkstein (massiv)	55–70	45–60
Sandstein	65–80	55–65
saure Magmatite (z. B. Granit)	65–85	55–70
basische Magmatite (z. B. Basalt)	40–65	35–55
Gneis	70–85	60–70

Quelle: Kaltschmitt, Streicher und Wiese (2014, S. 647)

Neben der Bodenbeschaffenheit gibt es beim Wärmetausch und dem resultierenden Ertrag auch zwei wichtige Kennzahlen, die lageunabhängig sind, weil sie mit der technischen Umwandlungseffizienz der Wärmepumpe selbst zu tun haben: die Leistungszahl (auch „Wirkungsgrad“) und die Jahresarbeitszahl. Die Leistungszahl beschreibt das Verhältnis zwischen abgegebener Wärmeleistung und der dafür aufgenommenen elektrischen Antriebsleistung – zu einem bestimmten Arbeitspunkt. Wesentlich aussagekräftiger ist die Jahresarbeitszahl, die dasselbe aussagt, aber im ganzjährigen Durchschnitt. Wärmepumpen auf dem Stand der Technik haben eine Jahresarbeitszahl von drei oder höher (Boos, o. J.).

Ein grundsätzlich ebenfalls lageunabhängiges Wärmeertragskriterium ist der geothermische Temperaturgradient, der besagt, dass die Temperatur der äußeren Erdkruste im globalen Mittel um 30 Kelvin pro Kilometer Tiefe (K/km) zunimmt (entspricht +3 °C pro 100 Meter; Kaltschmitt, Streicher und Wiese, 2014, S. 124). Allerdings gibt es zu diesem Durchschnittswert erhebliche Lageunterschiede (s. dazu nächstes Kapitel 3.5.5), die zwischen 10 K/km und 200 K/km variieren.

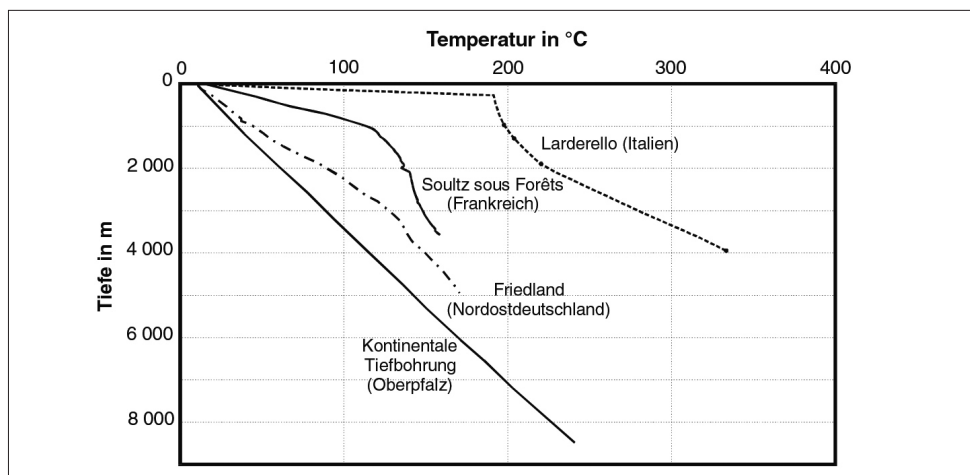
Die nutzbare Wärmekapazität richtet sich zusätzlich auch nach zwei weiteren Anlageneigenschaften: der Kapazität des nutzbaren Wärmespeichers und der Charakteristik der

Wärmenachfrage (für Warmwasser und Raumwärme). Optimal ist es, wie auch später in Kapitel 3.6 für die Solarenergie beschrieben wird, wenn Energienachfrage und -angebot täglich, über mehrere Tage oder saisonal möglichst genau übereinstimmen.

3.5.5 Lageabhängige Ertragsunterschiede bei geothermischer Energiegewinnung

Der geothermische Wärmestrom als Mittelwert hat sowohl klein- als auch großräumig eine hohe Varianz. Die folgende Abbildung 18 zeigt, dass in „jungen Krustengebieten“ und tektonisch aktiven und damit für die Geothermie günstigen Gebieten wie Island, Japan, Larderello in der Toskana (Italien) und im Rheingraben zwischen Deutschland und Frankreich diese Werte zwischen 100 bis 200 K/km liegen, dagegen in „alten“ Kontinentalgebieten wie Kanada, Indien oder Südafrika dieser Wert nur um 10 K/km beträgt (Kaltschmitt, Streicher und Wiese, 2014, S. 124), was bedeutet, dass man dort erheblich tiefer bohren müsste, um zum selben Temperaturniveau wie bei den „attraktiven“ Geothermielagen vorzudringen.

Abbildung 18: Lagevarianten des geothermischen Temperaturgradienten

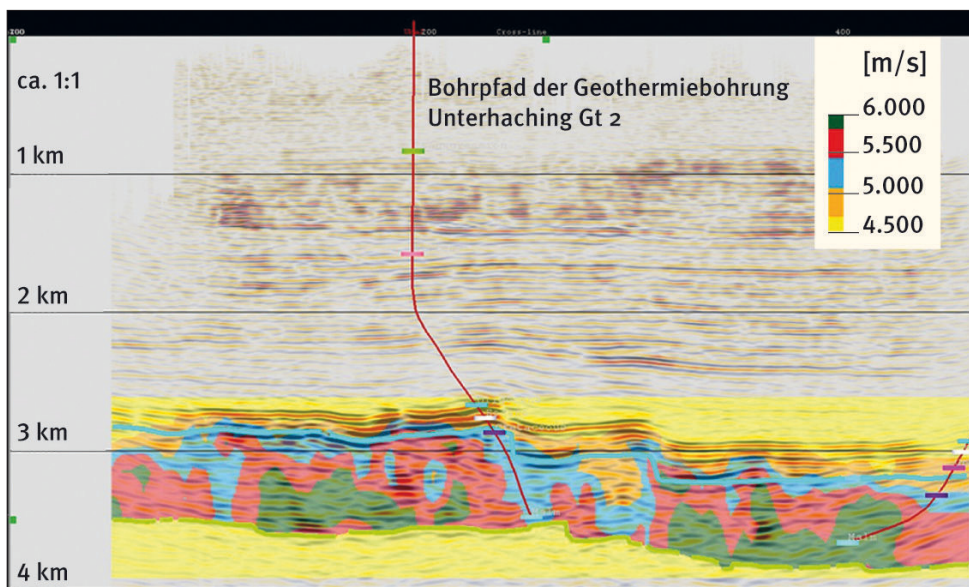


Quelle: Kaltschmitt, Streicher und Wiese (2006, S. 105)

Larderello und Island sind auch auf der später angeführten europaweiten Karte 2 als „Hotspots“ erkennbar, weitere gibt es in Griechenland und der Türkei. Trotzdem ist stets zu bedenken, dass gerade bei der tiefen Geothermie die realen Wärmebedingungen (Temperaturniveau, Schüttung in l/s) nicht so homogen sind, wie es aus flächigen Karten zum geothermischen Wärmestrom erscheint. Vielmehr ist unbedingt eine genaue seismische Voruntersuchung nötig, um das Wärmepotenzial, welches in den tiefen wasserführenden Erdschichten am höchsten ist, realitätsnah prognostizieren zu können. Hierbei werden Vibrationsfahrzeuge eingesetzt und das Echo der Bodenschallwellen genau aufgezeichnet (Wien Energie et al., 2017). Zur Veranschaulichung,

mit welcher fast „chirurgischen Präzision“ zwecks optimalen Wärmeertrags solche Bohrungen gesetzt werden müssen, zeigt die folgende Abbildung 19 ein Profil der Geothermiebohrung in Unterhaching (Bayern). Ziel solcher Bohrungen ist nicht nur ein Aquifer mit möglichst hohem Temperaturniveau, sondern auch mit einer horizontal möglichst weitreichenden Durchlässigkeit der Wasserschichten (im Profil von Abbildung 19 blau markiert). Erst die Kombination dieser beiden Faktoren sichert einen konstanten und großen Heißwasser- und Wärmeertrag.

Abbildung 19: Bohrfad und Wasserdurchlässigkeitsklassen beim Geothermiewerk Unterhaching (Bayern)



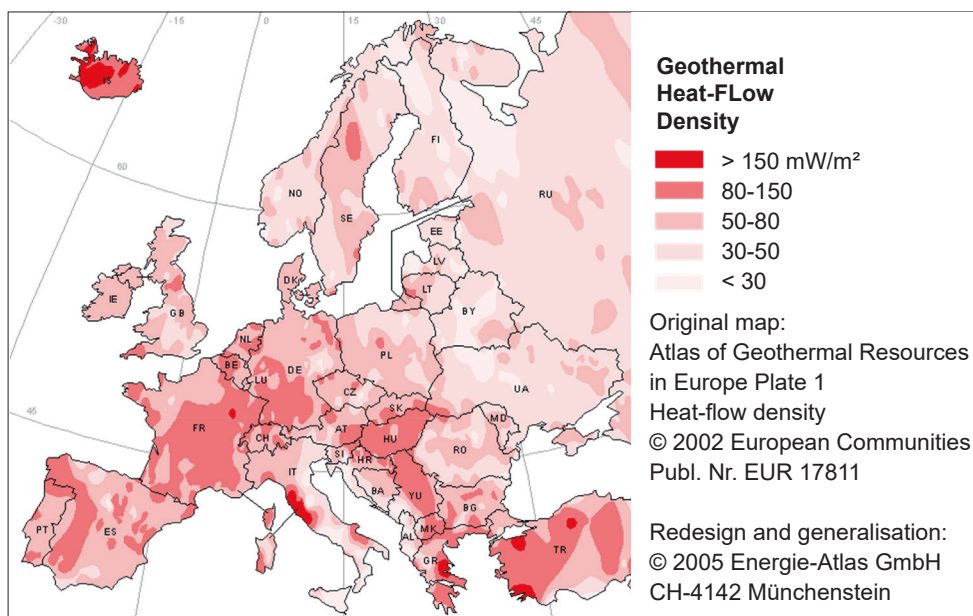
Quelle: Leibniz-Institut für Informationsinfrastruktur (2013)

Ob seismische Voruntersuchungen stattfinden, ist je nach der Arbeitspraxis eines Landes sehr unterschiedlich. In Deutschland sind Projekte der tiefen Geothermie ohne vorab stattfindende 2D- und 3D-Seismiken seit vielen Jahren nicht mehr genehmigungsfähig (Bundesverband Geothermie, 2005), im Geothermieprojekt der Seestadt Aspern (Wien) wurde vor dem Bohrstart keine Seismik vorgenommen, was einer der Gründe für das Scheitern des Projektes wegen zu geringer „Schüttung“ der heißen Tiefenwässer war (David-Freihsl, 2012). Um solche Fehlplanungen künftig zu vermeiden, wurde 2017 das Projekt „GeoTief Wien“ gestartet, das u. a. eine genaue seismische Grundlagenerhebung des Wiener Untergrundes, speziell im Potenzialgebiet des östlichen Wiener Beckens, anstrebt (Wien Energie et al., 2017).

Die lageabhängigen Ertragsunterschiede hängen bei der tiefen hydrothermalen Geothermie auch von Eigenschaften der Tiefenwässer ab, insbesondere von der Schüttung je Standort, d. h. vom Volumenstrom des heißen Wassers in Litern pro Sekunde sowie

der Temperatur dieser Wässer. Die folgende Tabelle 10 zeigt dazu Anlagenkennwerte der zehn leistungsstärksten Fernwärmanlagen der tiefen hydrothermalen Geothermie in Bayern (Deutschland). Für die Fernwärmeproduktion sind Schüttungen ab 60 Litern pro Sekunden bei Temperaturen von mindestens 60 °C wirtschaftlich interessant. Für die zusätzliche Stromerzeugung sind deutliche höhere Volumina und Temperaturen nötig, die in Europa nur selten vorkommen. Benötigt wird eine Heißwasser- oder Dampftemperatur von mindestens 100 °C und eine gute „Fließrate“ des Gesteins. Nur wenn diese Bedingungen eines Aquifers erfüllt sind, ist eine wirtschaftliche Stromerzeugung möglich (Kaltschmitt, Streicher und Wiese, 2006, S. 503). Tabelle 10 zeigt, dass nur zwei der zehn leistungsstärksten deutschen Anlagen diese Bedingungen erfüllen und damit als „Nebennutzung“ der Wärmeerzeugung auch wirtschaftlich Strom erzeugen können.

Karte 2: Geothermischer Wärmefluss in Europa (mW/m^2), 2002



Quelle: Blatter (2014)

Tabelle 10: Die zehn leistungsstärksten Anlagen tiefer hydrothormaler geothermischer Wärmeproduktion in Fernwärmenetzen, Deutschland, 2017

Name	Hauptnutzung	Nebennutzung	Temperatur °C	Fließrate l/s	Teufe (Bohrtiefe) m	Geothermie MW (th)	Gesamt MW (th)	Jahres- produktion GWh (th/a)	Gesamt MW (el)	Jahres- produktion GWh (e/a)
Grünwald (Laufzorn)	Fernwärme	Stromerzeugung	135	140	3755,2	40	71	94,42	4,3	16,89
Kirchweidach	Fernwärme	Gewächshaus	127	105	kein Eintrag	30,6	30,6	86,34	0,68	0
Unterhaching	Fernwärme	Stromerzeugung	123,7	140	3.350	38	83	85	3,36	9,22
München Riem	Fernwärme	kein Eintrag	98,4	90	2.747	13	45	62,46	0	0
Aschheim	Fernwärme	kein Eintrag	87,1	88,5	2.630	10,7	44,5	60,94	0	0
Pullach	Fernwärme	kein Eintrag	107	110	3.443	15,5	32,5	57,3	0	0
Simbach-Braunau	Fernwärme	kein Eintrag	81,7	90	1.942	9	44,1	50,25	0	0
Unterschleißheim	Fernwärme	kein Eintrag	80	100	1.960	7,98	23,78	42,2	0	0
Poing	Fernwärme	kein Eintrag	85	100	3.014	9	39	39,4	0	0
Unterföhring	Fernwärme	kein Eintrag	87	75	2.124	10	30	33,8	0	0

MW (th) bzw. (el) = Wärmeleistung der Geothermieanlage thermisch (Wärmeproduktion) bzw. elektrisch (Stromproduktion); /a = pro Jahr

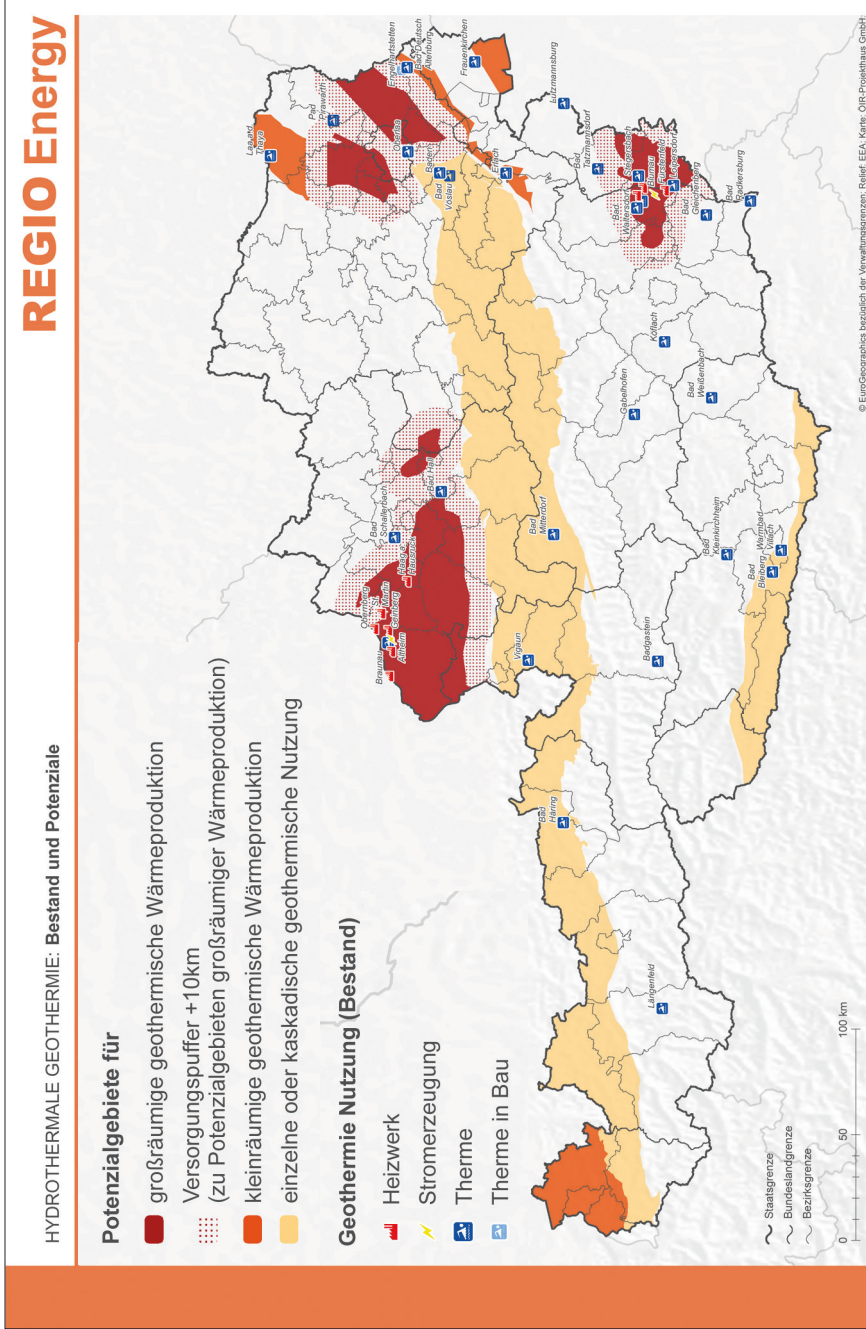
Quelle: Agemar et al. (2017)

Ein weiteres, sehr lageabhängiges Wirtschaftlichkeitskriterium ist die Nähe zwischen dem seichten und/oder tiefen Geothermiepotenzial und der wärme konsumierenden Siedlungsstruktur. Tiefe Geothermie sollte zwecks Wirtschaftlichkeit ein bereits vorhandenes Wärmenetz nutzen, seichte Geothermie benötigt dagegen große unversiegelte Frei-, Grünland- oder Ackerflächen, um die Kollektoren kostengünstig flach vergraben und verlegen oder in Tiefsondenfeldern organisiert anlegen zu können. Flach- und Tiefkollektorenfelder der seichten Geothermie sind technisch auch unter versiegelten Flächen und unter bebauten Flächen ausführbar, allerdings mit erheblich höheren Kosten und Arbeitsaufwand als unter unversiegeltem Boden. Zu Beispielen der jeweiligen Flächenbedarfe je Energieertrag und Jahr siehe Kapitel 3.5.8.

3.5.6 Räumlich bedingte Potenzialunterschiede bei der Geothermiegewinnung in Österreich

Die folgende Karte 3 zeigt, dass es bei der tiefen hydrothermalen Geothermie in Österreich 2006 einen Anlagenbestand von elf Heizwerken gab, die alle in geologischen Wärmegunstlagen stehen: in der sich nach Bayern forstsetzenden oberösterreichischen Molassezone, der Tiefscholle des Wiener Beckens (nordöstlich von Wien), der südlichen Waschbergzone (nördlich von Wien) Richtung Laa an der Thaya und in Teilen des Steirischen Beckens.

Karte 3: Bestand und Potenziale hydrothormaler Geothermie in Österreich, 2006



Quelle: Stanzer, Novak, Dumke et al. (2010, S. 101)

In dem Forschungsbericht „REGIO Energy“ werden diese Lagen als „Potenzialgebiete für großräumige geothermische Wärmeproduktion“ bezeichnet, die beiden ertragschwächeren Kategorien haben Potenziale für kleinräumige und einzelne kaskadische geothermische Nutzungen. Das aktive hydrothermale Potenzial betrug 2006 laut „REGIO Energy“ 93 MW thermische Leistung und 139 GWh thermische Arbeit. Tabelle 11 zeigt dazu die Aufschlüsselung nach Lage und Leistung der Geothermieanlagen, Karte 3 oben zeigt die Standorte in Österreich, an denen sich diese Anlagen befinden.

Tabelle 11: Anlagen der tiefen hydrothermalen Geothermie in Österreich, 2006

Anlage	Thermische Leistung MW	Thermische Arbeit GWh/a	Baujahr
Bad Waltersdorf	3,5	4	1980
Geinberg	6,2	16,23	1982
Bad Schallerbach	3,4	4	1986
Altheim	10,6	16,7	1990
Bad Radkersburg	4	5	1993
Haag	3,9	4,55	1995
Obernberg	4,2	5	1996
St. Martin/Innkreis	8,5	16	2000
Blumau	10	14,6	2000
Fürstenfeld	8	10	2000
Braunau-Simbach	31	43	2001
GESAMT	93,3	139,08	

Quelle: Stanzer, Novak, Dumke et al. (2010, S. 101)

Auch neuere Datenquellen, wie etwa bei Biermayr (2017, S. 9), nennen ein aktives hydrothermales Leistungs- und Energiepotenzial in derselben Größenordnung wie in Tabelle 11 in der Zeile „GESAMT“. Einige Datenquellen nennen aber auch etwas geringere Wärmeerträge, weil in diesen die Wärmemengen für Thermalwässer aus dem Wert der gesamten Wärmemenge abgezogen wurden.

Bezüglich der künftigen Potenziale tiefer hydrothermalen Geothermie gibt es in verschiedenen Grundlagenstudien unterschiedliche Zugänge und auch Szenarienerträge, was an den zugrunde liegenden unterschiedlichen Methoden und Modellen liegt. Die folgende Tabelle 12 bietet dazu eine Übersicht, die zwar Unterschiede in den potenziellen Ertragswerten und dem Szenariojahr, nicht aber bezüglich ihrer Lage zeigt (eindeutige Kerngebiete in Ober- und Niederösterreich, kleinere Potenziale auch in der Steiermark und in Salzburg).

Tabelle 12: Künftige Potenziale hydrothermalen Geothermie in Österreich nach unterschiedlichen Studien

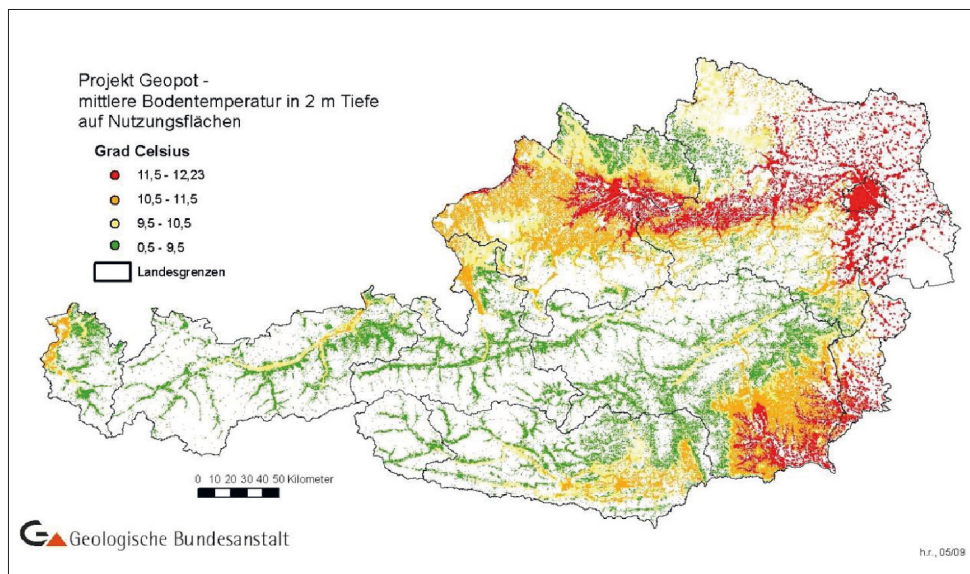
Studie	Quelle	Szenarieneigenschaften	Potenzial Leistung (MW) pro Jahr	Potenzial Arbeit (GW h/a) pro Jahr
Energetische Nutzung der Geothermie	Goldbrunner und Novak (1991)	„Sofort erschließbares wirtschaftliches Potenzial“ (nach Potenzialstärke)	350 („sofort“, d. h. 1991)	400 (1991) ¹
Geothermie in Österreich	Götzl (2007)		600 (o. J.)	894 (o. J.) ¹
REGIO Energy	Stanzer, Novak, Dumke et al. (2010)	Lineare Zuwachsratenfortschreibung ab dem Basisjahr 2008	k. A.	813 (2020)
GeoEnergie 2050	Joanneum Research, Geoteam und Energie AG oberösterreichische Wärme (2014)	Lage- und Qualitätseigenschaften der Potenzialgebiete ähnlich wie bei Stanzer, Novak, Dumke et al. (2010) sowie Goldbrunner und Novak (1991)	k. A.	k. A.

¹ Interpolation Arbeit = Leistung * Zeit (aus österreichischen durchschnittlichen Laufzeiten bestimmter Anlagen)

Quelle: eigene Darstellung nach den angegebenen Quellen

Zur Potenzialabschätzung der seichten Geothermie gibt es ebenso wie bei der tiefen Geothermie für ganz Österreich nur wenige Grundlagenstudien, in denen versucht wird, Aussagen für ganz Österreich zu treffen. Das Projekt „GeoPot“ (Ostermann et al., 2010) hat hierbei ein Rastermodell entwickelt (siehe im Folgenden Karte 4), das nicht nur die für die seichte Geothermie relevanten Klimaunterschiede des solaren Eintrages in die oberen Erdschichten, sondern auch die Nachfragesituation im Dauer-siedlungsraum, genauer gesagt in „besiedelten Rasterzellen“, berücksichtigt.

Karte 4: Verteilung der Bodentemperatur (in 2 Metern Tiefe) nach besiedelten Rasterzellen Österreichs, 2010



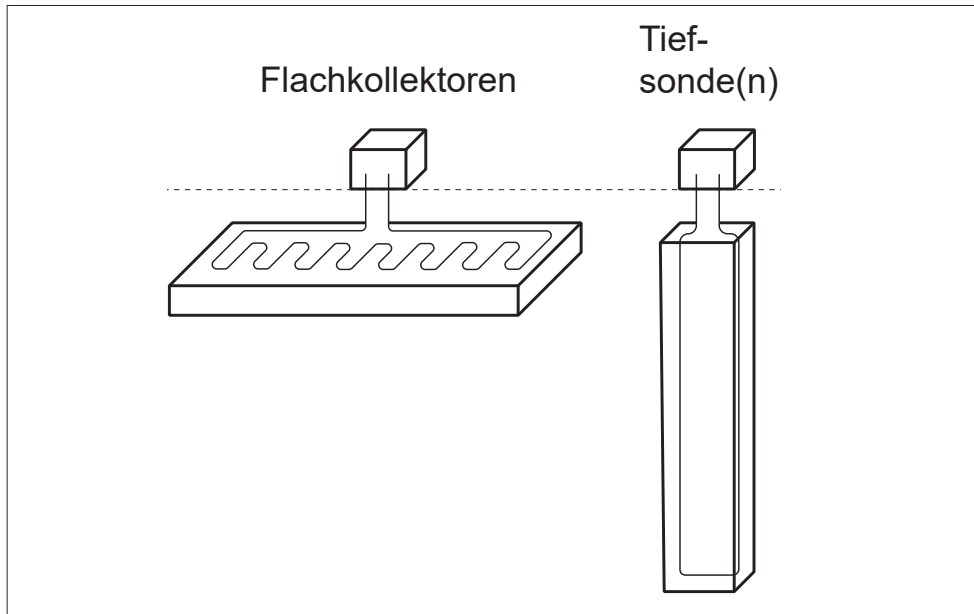
Quelle: Ostermann et al. (2010, S. 21)

Ostermann et al. (2010) kommen zur Schlussfolgerung, dass es zwar technisch möglich ist, den gesamten österreichischen Wärmebedarf (Raumwärme und Warmwasser) mit Wärmepumpen aus seichter Geothermie zu decken (ebd., S. 131), aber die wirtschaftliche Erschließung vor allem in den in der obigen Karte rot und gelb markierten Lagen sinnvoll ist. Hier deckt sich eine relativ hohe Bodentemperatur der oberen Erdschichten mit einer relativ hohen Wärmenachfragedichte im Dauersiedlungsraum.

3.5.7 Flächenbedarfe geothermischer Energieproduktion

Die Flächenbedarfe der geothermischen Energieerzeugungsanlagen sind nach den oberirdischen und unterirdischen Anteilen zu unterscheiden. Die Wärme „steckt“ unterirdisch dabei nicht in einer Fläche, sondern immer in einem Volumen. Bei der seichten Geothermie enthält die Erdkubatur die Flachkollektoren oder die Tiefsonden als verlegte Bauteile sowie einen Wärmeeinzugsbereich um diese Rohre. Die folgende Abbildung 20 zeigt dazu, wie die Wärme aus einer Kubatur, nicht aus einer Fläche kommt, was bedeutet, dass bei der Bauweise der seichten Geothermie mit Flachkollektoren horizontal etwa doppelt so viel Fläche pro Energiemenge (unter der Annahme der gleichen Lage, Bodenbeschaffenheit und Bodenfeuchtigkeit bei beiden Beispielen) benötigt wird als mit der Tiefsondenbauweise.

Abbildung 20: Horizontale und vertikale Kubaturlage bei verschiedenen Bauweisen seichter Geothermie



Quelle: eigene Darstellung

Auch die tiefe hydrothermale Geothermie hat einen horizontal messbaren Flächenbedarf, der nicht nur die horizontale Fläche der Erd- und Gesteinskubatur betrifft, sondern auch Abstandsflächen zum jeweils nächsten Kraftwerk beinhaltet, damit mehrere Kraftwerke in ihrem Wärmeentzug nicht konkurrenzieren.

Für sämtliche Bauweisen der Geothermie gilt, dass es bei der genauen Dimensionierung der horizontalen Flächenbedarfe und -abstandsbereiche noch zu wenige Flächenmodelle und bisher auch sehr wenige gründlich überprüfte „Standardwerte“ oder Tools für die Abschätzung potenzieller Energieerträge gibt. Die optimale Dimensionierung zwischen einem bestimmten Wärmeertrag, unter der Bedingung eines konstanten Temperaturniveaus ohne dauerhafter Auskühlung des Bodens (dies wäre eine nichtnachhaltige Nutzungsform), ist deswegen nur mit einer lokalen Bestandsaufnahme durch erfahrene Experten oder Expertinnen möglich.

Oberirdisch entstehen Flächenbedarfe durch die Anlagenbestandteile: Betriebsgelände mit Kraftwerk und Wärmetauschanlage, Pumpanlagen und je nach Größe der Anlage kürzere oder längere Rohrleitungs- oder Wärmenetzleitungen zu den Gebäuden. Der oberirdische Teil des Thermalwasserkreislaufes besteht also aus den Bauteilen zur Weiterleitung und Wärmeübertragung an ein Sekundärsystem, bei der hydrothermalen Bauweise zusätzlich aus den Komponenten zur Aufbereitung des Injektionswassers durch Druckerhöhung und -injektion (Kaltschmitt, Streicher und Wiese, 2006, S. 462).

Sehr häufig wird die Geothermie auch mit anderen Wärmeträgern (fossil wie erneuerbar) „mehervalent“ kombiniert – um auch Spitzenlasten (für deren Bedienung die Geothermie häufig nicht optimal geeignet ist, s. nächstes Kapitel 3.5.8) bedienen zu können. Dies ist für die Anlagenbauteile und deren Flächenbedarf innerhalb oder außerhalb von Gebäuden relevant, monovalente Systeme benötigen dabei weniger Fläche als mehrvalente.

Bei kleinen Anlagen für einzelne (oder einige wenige) Gebäude entsteht ein Flächenbedarf durch den Wärmespeicher, der wie bei der Solarthermie meist ein sehr gut isolierter Wassertank mit einigen hundert oder tausend Litern Volumen ist. Es existieren aber auch größere Anlagen wie in der Salzburger Siedlung „Rosa Zukunft“ (s. folgende Abbildung 21). Hier ist ein Erdwärme-Tiefsondenfeld mit der lokalen (fossil befeuerten) Fernwärme sowie zusätzlich einem kleinen, siedlungsintegrierten Biomasse-Blockheizkraftwerk und mit Solarthermie und Photovoltaik auf den Gebäudedächern gekoppelt. Der Wärmespeicher ist in dieser Siedlung bewusst sichtbar über die volle Gebäudefassadenhöhe (9 Meter) integriert worden – in der folgenden Abbildung links als brauner „Fassadenstreifen“ sichtbar. Der Wärmepuffer hat ein Volumen von 90.000 Litern (hiltech, 2014).

Abbildung 21: Wärmepufferspeicher und Photovoltaikanlage in der Siedlung „Rosa Zukunft“ in Salzburg



Quelle: hiltech (2014)

3.5.8 Beispiele für Geothermieranlagen (nach Flächenertrag der Energieproduktion)

Die folgende Tabelle 13 zeigt Zahlenwerte zu den in diesem Kapitel genannten Flächenbedarfen und den jeweiligen thermischen Energieerträgen verschiedener Geothermieranlagen. Die Records sind absteigend nach dem Energieertrag pro Fläche sortiert. Die in der Spalte „Fläche“ genannten Werte nennen die horizontale Größe der Fläche, der Wärme entzogen wird. In den hier gezeigten Records ist diese Fläche lageident mit den Gebäuden der Kraftwerksanlagen, weil diese direkt über dem Wärmeentzugsgebiet (Erdreich) stehen. In Kapitel 5.4 (Reflexion und Ausbaumöglichkeiten des Flächenbedarfskatalogs der Anlagen erneuerbarer Energieproduktion) werden ergänzend Anlagen nach ihrem Verhältnis zwischen den Gebäudeanteilen und der Wärmeentzugsfläche veranschaulicht.

3.5.9 Regelenergiefähigkeit von Geothermie und ihre Eignung zur Grundlast

Ob die seichte und/oder tiefe Geothermie mit anderen Energieträgern kombiniert werden muss, hängt nicht nur von der Anlagenertragsleistung, sondern auch nachfrageseitig vom benötigten Energiebedarf, der bedient werden muss, ab. Einzelne thermisch hocheffiziente Gebäude (etwa ab der Energiekennzahl B oder besser) können im ganzjährigen Heizbetrieb ausschließlich mit seichter Geothermie auskommen – ob das Energieniveau sowohl bei der Spitzenleistung als auch beim gesamten jährlich gewinnbaren Wärmeertrag auch für die Warmwasserbereitung und für mehrere Gebäude ausreicht, hängt von deren Energienachfrage sowie den lokalen Wärmespeichermöglichkeiten und der Flächenverfügbarkeit für die Erdsonden oder Flachkollektoren ab.

In Kapitel 3.5.4 zu lageunabhängigen Ertragsunterschieden wurde bereits geschildert, dass Geothermieranlagen, die Wärmepotenziale unterhalb einer gewissen Tiefe nutzen (je nach Klimazone unterschiedlich tief), keinerlei Energieertragsschwankungen unterliegen, sondern technisch bis zum 24/7-Vollbetrieb genutzt werden können. Diese Lage- und Saisonunabhängigkeit der Wärmebereitung, gemeinsam mit der technisch sehr einfachen Möglichkeit des An- und Abschaltens, macht die ausgezeichnete Regel- und Grundlastfähigkeit der Geothermie aus – dies aber eben nur bis zu einem bestimmten Leistungsniveau, über dem andere Energieträger „zugeschaltet“ werden müssen (in diesem Fall übernimmt die Geothermie „nur“ das Vorwärmen).

Die gewünschte Wärmenachfrage kann sowohl zu Zwecken der Energieertragsvarianzen als auch der Reaktion auf sich verändernde Speichereigenschaften mit einer Drehzahlregelung des Pumpenmotors gesteuert werden. Grundsätzlich aber laufen Anlagen der tiefen Geothermie am wirtschaftlichsten in einem bei thermischer Arbeit und Leistung sehr konstant geführtem Grundlastbetrieb (Kaltschmitt, Streicher und Wiese, 2006, S. 464).

3.5.10 Skalierbarkeit der Energieleistung und -arbeit von Geothermieranlagen

Die Skalierbarkeit geothermischer Anlagenstärken ist je nach Bauweise unterschiedlich. Technisch sind sehr viele verschiedene Leistungs- und Arbeitsstärken machbar, aber räumlich und nachfrageseitig gibt es je nach Bauweise verschiedene Einschränkungen.

Bei der seichten Geothermie in Flachkollektorenbauweise ist die Zugänglichkeit, Verfügbarkeit und Größe von unversiegelten Bodenflächen in der Nähe der wärmenachfragenden Siedlungsstrukturen ein klar limitierender Faktor für die Auslegung der Wärmeversorgungsleistung (s. oben Karte 4 zur Lage von GeoPot-Rasterzellen). In dieser Bauform sollte das mit den Erdkollektoren bestückte Erdreich auch nicht überbaut werden, um die Zugänglichkeit im Reparatur- und Wartungsfall der Kollektorschläuche zu gewährleisten. Bei der seichten Geothermiegewinnung in der Bauweise mit Tiefsonden wird die Skalierbarkeit der Anlagenleistung in der Praxis oft durch die Bohrkosten limitiert, die ab Tiefen von über ca. 300 Metern manchmal aufgrund von unerwartet harten Gesteinsschichten stark zunehmen können.

Eine noch geringere Varianz in der Anlagenskalierbarkeit haben schließlich Anlagen der tiefen hydrothermalen Geothermie, weil die Energieertragsleistung und -arbeit sehr lagespezifisch von lokalen Bedingungen abhängt, insbesondere der erreichbaren Wassertemperatur und Schüttung (l/s, s. Kapitel 3.5.5 zu lageabhängigen Ertragsunterschieden). Somit ist die Maximalleistung bei der tiefen hydrothermalen Geothermie klar durch diese angebotsseitigen Faktoren limitiert.

Tabelle 13: Beispiele für Geothermieanlagen nach dem Flächenenertrag der Energieproduktion

Name, Lage	Untertyp	Datenqualität	Fläche (ha)	Leistung MW (th)	Energie MWh (th/a)	m ² /kWh (th/a)	kWh (th/m ² /a)	Rechnerische Volllaststunden (h/a)
Zentrum für berufliche Bildung und Weiterbildung in Duisburg, Nordrhein-Westfalen, Deutschland	seichte Geothermie, Tiefsondenfeld	fragwürdig (übermäßig hoher Energieertragswert)	1,04	1,476	1.395	0,00746	134	945
BSU Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt, Hamburg-Wilhelmsburg, Deutschland	seichte Geothermie, Tiefsondenfeld, Fundamentpfähle	gut	1,18	0,65	858	0,01375	73	1.320
Panaipina Logistikhalle, Nürnberg, Bayern, Deutschland	seichte Geothermie, Tiefsondenfeld	gut	1,04	0,558	670	0,01552	64	1.201
ATRIO Shopping Center Villach, Kärnten, Österreich	seichte Geothermie, Tiefsondenfeld, Fundamentpfähle	fragwürdig (sehr geringe Volllaststundenzahl)	2,86	14	1.220	0,0234	43	87
„Agrothermie“ Wüstenrot, Baden-Württemberg, Deutschland	seichte Geothermie, Flachkollektoren	gut	1,5	0,3	600	0,025	40	2.000
Einfamilienhausanlage, Musterrechnung für Österreich (trockener Lehmbooden)	seichte Geothermie, Flachkollektoren	gut	0,03	6	10,8	0,02777	36	1.800
Nordbahnhofareal, Wien, Österreich (Projektplanung)	seichte Geothermie, Tiefsondenfeld	gut	46,56	6,172	14,196	0,0328	30	2.300
Geothermie Ganghofersiedlung, Regensburg, Bayern, Deutschland	seichte Geothermie, Tiefsondenfeld	fragwürdig (Wärmeentzugsfläche = gesamtes Siedlungsgebiet?)	25,4	1,4	2.590	0,09807	10	1.850
Geothermie Unterhaching, Bayern, Deutschland	tiefe Geothermie, hydrothermal	fragwürdig (Wärmeentzugsfläche?)	2,809	70	85,947	0,32683	0,30597	1.228
Geothermie Grünwald (Laufzorn), Bayern, Deutschland	tiefe Geothermie, hydrothermal	fragwürdig (Wärmeentzugsfläche?)	2,809	40	59,580	0,47147	2,121	1.490
Geothermie Braunau-Simbach, Deutschland/Österreich	tiefe Geothermie, hydrothermal	fragwürdig (Wärmeentzugsfläche?)	8,611	9,4	46,500	1,85183	0,54001	4,947
Geothermie Landau, ober-rheinischer Tiefgraben, Rheinland-Pfalz, Deutschland	tiefe Geothermie, hydrothermal	fragwürdig (Wärmeentzugsfläche?)	2,890	2,01	15,300	1,8888	0,52941	7,612

Quelle: eigene Darstellung

3.5.11 Flächenkonkurrenzen bei geothermischer Energiegewinnung

Da oberirdische Flächenkonkurrenzen nur auf Flächen entstehen, die durch oberirdische Bauteile von geothermischen Energieerzeugungsanlagen belegt sind, kann die Beeinflussung des Orts- und Landschaftsbildes als „sehr gering“ bis „keine“ eingestuft werden. Dadurch ist ebenfalls auch die Konkurrenzierung von Naherholungs- und Tourismusfunktionen in der Nähe von Geothermieanlagen als „sehr gering“ bis „keine“ einzustufen (bei Windkraft- und Solaranlagen ist der visuelle Impact erheblich größer als bei einem Geothermiekraftwerk). Durch den emissionsfreien Wärmeerzeugungsbetrieb sind Geothermieanlagen auch mitten in Wohn- und Gewerbegebieten raumverträglich. Flächenkonkurrenzen zwischen der geothermischen Wärmeenergiegewinnung und der Nutzung für Wohn- und Gewerbebezüge bestehen lediglich auf den durch die Kraftwerksbauteile versiegelten horizontalen Flächen.

In der Bauform der Flachkollektoren besteht unterirdisch allerdings hohe Konkurrenz zur Wohnfunktion, weil die Flächen, in denen die Kollektoren verlegt sind, nicht überbaut werden sollten. Dies würde im Reparaturfall die Zugänglichkeit der Kollektoren verhindern.

Unterirdisch gibt es Flächenkonkurrenzen nur im Sinne maximaler Wärmeentzugsmengen, insbesondere zwischen den Energieerträgen verschiedener benachbarter Geothermieanlagen, unabhängig davon, ob es sich um seichte oder tiefe Geothermie oder um geschlossene oder offene Rohrsysteme mit und ohne Rückinjektion handelt: Wenn die Wärmeentnahme das Niveau überschreitet, das durch das Temperaturregime des Bodens innerhalb weniger Tage wieder regeneriert werden kann, kommt es zu einer Bodenabkühlung. Vermutlich könnte das, wenn es sich um Flachkollektoren unter landwirtschaftlich genutzten Böden handelt, die Ertragsleistung der Feldfrüchte reduzieren, was eine Konkurrenzierung und Beeinträchtigung dieser Nahrungsmittelfunktion darstellt.

Durch den geringen oberirdischen Flächenbedarf besteht auch keine Konkurrenzierung mit anderen erneuerbaren Energieträgern. Vielmehr kann hier von einer Flächensynergie gesprochen werden, weil der „Etagenbetrieb“ etwa in Kombination mit Biomasseerzeugung (egal ob für die Nahrungsmittel- oder die Energieerzeugung) oder Solar- und Windenergie sehr gut möglich ist. Die folgende Tabelle 14 fasst dazu die Konkurrenzgrade der verschiedenen Geothermiearten zusammen.

Tabelle 14: Qualitative Bewertung der Flächenkonkurrenzen zwischen der Energieerzeugung aus Geothermie und anderen lageidenten Flächenfunktionen

Art erneuerbarer Energie und Endenergieform	Wohnfunktion	Orts- und Landschaftsbildfunktion	Naherholungsfunktion	Großräumige Tourismusfunktion	Sachgüter- und Dienstleistungsfunktion	Nahrungsmittelproduktion	Andere erneuerbare Energieproduktion
Seichte Geothermie, Flachkollektoren	Kollektorenflächen: Überbaubarkeit kritisch	keine	keine	keine	oberirdische Kraftwerksbauteile	gering (Ertragsminderung durch Wärmeentzug möglich)	keine
Seichte Geothermie, Tiefsonden	gebäudeintegriert/ unter Gebäuden	keine	keine	keine	oberirdische Kraftwerksbauteile	keine	keine
Tiefe hydrothermale Geothermie	Kraftwerksgebiete	oberirdische Kraftwerksbauteile	keine	keine	Kraftwerksgebiete	keine	keine

Konkurrenzgrad:



Indifferent: Der Konkurrenzgrad kann verschiedene Ausprägungen (von „kein“ bis „hoch“) einnehmen.

Quelle: eigene Darstellung

3.5.12 Umweltwirkungen von geothermischer Energieproduktion

Die negativen Umwelteffekte lassen sich bei Wärmepumpen, die in allen Bauformen der Geothermie eingesetzt werden, nach den Phasen Herstellung, Betrieb, Störfall und Betriebsende unterscheiden. Bei Herstellung und Betrieb sind insbesondere die Arbeitsmittel (aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung) für den Treibhauseffekt hochrelevant, im Störfall kann auch der Grundwasserkörper geschädigt werden, allerdings ist dieser Effekt bei korrektem Anlagenbetrieb sehr gut eingrenz- und kontrollierbar bzw. bei neueren Arbeitsmedien vernachlässigbar. Im Betrieb kann es zu einer Abkühlung des Bodens kommen, bei lageangepasster Dimensionierung (ohne Überlast der Entnahme) ist auch dieser Effekt kontrollierbar, weil sich langfristig das Temperaturgleichgewicht wieder regeneriert (Kaltschmitt, Streicher und Wiese, 2006, S. 449).

Bohrungen, die zur Nutzung hydrothormaler Energie notwendig sind, erzeugen in der meist kurzen Bohrphase Lärm und ein geringes Risiko des Wasseraustausches von Grundwasserschichten in verschiedenen Tiefen im Boden. Theoretisch möglich, aber bisher sehr selten beobachtet worden ist eine chemische und/oder physikalische Störung des Wasserhaushaltes im Untergrund inklusive mikroseismischen Erscheinungen. Nach dem Betriebsende ist es wichtig, die Bohrung komplett abzudichten, um Schadstoffeinträge zu verhindern. Die Umweltrisiken der Materialentsorgung geothermischer Anlagen entsprechen denen anderer Gebäude derselben Größe oder Kubatur und sind demgegenüber nicht spezifisch unterschiedlich (ebd., S. 483–486).

Anlagen der Bauform Enhanced Geothermal Systems (EGS; s. Kapitel 3.5.2 zu Arten und Bauformen von Geothermieanlagen) haben nicht nur in der Bohrphase, sondern auch wenn Wasser künstlich in die Bodenklüfte eingepresst wird, ein erhebliches seismisches Risiko. Dies hat unter anderem in einer der noch sehr seltenen Pilotanlagen, der Deep-Heat-Mining-Anlage in Basel, zum sofortigen Einstellen des Probetriebes geführt (Schweizerischer Erdbebendienst SED, 2017).

Nach Betriebsende sind negative Umwelteinflüsse nur durch nicht ordnungsgemäß abgedichtete Bohrungen und Leitungen denkbar; auch die Entsorgung oder das Recycling der Anlagenkomponenten hat keine bekannten negativen Umweltwirkungen (Kaltschmitt, Streicher und Wiese, 2006, S. 449).

Zu den positiven Umweltwirkungen der Geothermie (unabhängig von der Bauweise) gehört der emissionsfreie Betrieb. Maßeinheit dafür wären die Emissionsmengen, die gegenüber einer Erzeugung aus nichterneuerbaren fossilen Ressourcen (Gas, Kohle, Öl) eingespart werden können. Im Heizbetrieb gibt es keine direkte Freisetzung von Stoffen, Gasen oder Partikeln, daher kann der Betrieb als emissionsfrei bezeichnet werden (ebd., S. 483–486). Ebenfalls zu den positiven Umweltwirkungen kann die sehr geringe Beeinflussung des Orts- und Landschaftsbildes durch geothermische Anlagen gerechnet werden, denn die oberirdischen Bauteile belegen nur einen sehr kleinen Teil der gesamten Potenzialfläche, die weit größeren, aber „unsichtbaren“ Flächenanteile benötigt die Kubatur des Erdreiches, dem die Wärme entzogen wird.

3.5.13 Zusammenfassende Erkenntnisse zum Flächenbedarf geothermischer Energieanlagen ($\text{m}^2/\text{kWh}/\text{Jahr}$)

Die eingangs gestellte Forschungsfrage nach dem Flächenbedarf ($\text{m}^2/\text{kWh}/\text{Jahr}$) ausgewählter erneuerbarer Energieträger (Windkraft, diverse Biomasse, Solarenergie, Geothermie) und den standörtlichen Energieertragsvarianzen kann durch Beispiele von Geothermieanlagen nur ansatzweise und nicht sehr zufriedenstellend beantwortet werden. Die Gründe lassen sich wie folgt darlegen:

- Die in den Records verwendeten Datenquellen dokumentieren häufig nicht die von Tief- oder Flachkollektoren tatsächlich belegte horizontale Fläche. Um trotzdem zu spezifischen Werten zu gelangen, wurde bei den Records der seichten Geothermie (egal ob bei Flach- oder Tiefkollektoren) die sichtbare Grundstücksgrenze als Flächengrenze angenommen und ausgemessen.
- Bei der tiefen hydrothermalen Geothermie gibt es noch weniger Anhaltspunkte zum horizontalen Flächenbedarf. Aus diesem Grunde wurde entweder mit flächenspezifischen Energieertragswerten aus der Fachliteratur interpoliert oder (wenn mehrere gleichartige Anlagen benachbart waren) die Annahme getroffen, dass diese Anlagen nicht gegenseitig im Wärmeentzug konkurrenzieren. Daraus konnten Abstände und Flächen zugeteilt werden.
- Unter den mit „guter Datenqualität“ eingestuften Records der Geothermieanlagen bewegen sich die flächenspezifischen Energieerträge zwischen 30 und 70 $\text{kWh}/\text{m}^2/\text{a}$.
- Auffällig ist, dass die Energieerträge der Anlagen mit Tiefsondenfeldern nahezu lageunabhängig gleich sind, weil die oberirdischen Einflüsse der Solarenergie nur bis in eine Tiefe von etwa 30 Metern überhaupt einen Einfluss auf das Wärmepotenzial haben (darunter nicht).
- Dabei hat sich (s. Kapitel 3.5.8 Beispiele für Geothermieanlagen) auch bestätigt, dass die Bauweise mit Tiefsondenfeldern gegenüber den Flachkollektoren horizontal pro Energieertrag etwas weniger Fläche benötigt. Die Records der Tiefkollektorenbauweise zeigen durchwegs Ertragswerte im oberen Bereich (zwischen 45 und 70 $\text{kWh}/\text{m}^2/\text{a}$), die Bauweise mit Flachsondenfeldern lag im unteren Bereich zwischen 30 und 50 $\text{kWh}/\text{m}^2/\text{a}$. Die Anlagen der tiefen Geothermie zeigen nochmals deutlich geringe flächenspezifische Werte, wobei hierbei leider die Datenqualität der Flächenermittlung als fragwürdig eingestuft werden muss.
- Aus dem Vergleich und den Benchmarks der Records haben sich interessante künftige Forschungsbedarfe gezeigt:
 - Wie ist der horizontale Flächenbedarf für Anlagen der tiefen hydrothermalen Geothermie besser abschätzbar?
 - Wie verhält sich der Flächenbedarf im geothermischen Mehrfachbetrieb, wenn der Heiz- und Kühlbetrieb mit kurz- oder langfristiger Speicherung der jeweiligen Potenziale im Erdreich erfolgt? Hierzu konnten leider ebenfalls keine Records gefunden werden. Ein Beispiel für eine solche Mehrfachnutzung wären Anergienetze: Dabei handelt es sich um Niedrigtemperaturnetze, die nicht nur die Geothermie nutzen, sondern bei denen Wärme zusätzlich auch aus anderen

- Wärmequellen (solar, industrielle Abwärme ...) in das Wärmenetz eingespeist und entnommen wird.
- Geothermie hat eine sehr gute Grundlastfähigkeit, aber eine eher schlechte Spitzenlastfähigkeit. Wie lässt sich daraus ihr Stellenwert im Ensemble mit anderen erneuerbaren und nichterneuerbaren Energieträgern in einem regionalen „klugen Netz“ („smart grid“) modellieren?

3.6 Flächenbedarfe, Flächenkonkurrenzen und Umweltaspekte bei der Gewinnung von Solarenergie

In diesem Kapitel wird die Prozesskette der Energieumwandlung, Anlagenarten, lageabhängige und lageunabhängige Faktoren unterschiedlicher Energieerträge (Wärme und Elektrizität) behandelt. Im Weiteren werden im empirischen Teil Anlagenbeispiele zur Solarthermie (Wärmebereitstellung zur Warmwasseraufbereitung oder Heizungsunterstützung), zur Photovoltaik (Stromproduktion) sowie zur Bauweise der „Concentrated Solar Power“ (CSP) angeführt und im Anschluss Flächenkonkurrenzen und Umweltwirkungen der Solarenergie erörtert sowie abschließend reflektiert, welche Erkenntnisse zur Forschungsfrage nach dem Flächenbedarf dieser Art von Energieerzeugung ($\text{m}^2/\text{kWh/a}$) möglich sind.

3.6.1 Prozesskette der Energieumwandlung und Nutzenergieformen der Solarenergie

Die Solarenergie nutzt die Strahlungsleistung der auf die Erdoberfläche einfallenden Sonnenstrahlen über Photovoltaik und/oder Solarthermie (Quaschnig, 2015, S. 57 f). Die häufigsten Nutzenergieformen sind Warmwasser, das direkt zum Baden und Duschen oder auch in Speicheranlagen zur Raumheizung unterstützend verwendet werden kann, und Elektrizität. Die älteste Endenergieform ist die direkte Warmwassererzeugung, wesentlich später folgte die Elektrizitätserzeugung und erst seit einigen Jahren gibt es (über eine Prozessumkehr der Energiepotenzialumwandlung) auch das solare Kühlen von Räumen. Die genannten Nutzenergieformen gehören zur direkten Nutzung der Solarenergie und können mit und ohne Speicher betrieben werden. Sehr häufig verbreitet sind aktuell vor allem kleine Anlagen mit kleinen Warmwasserspeichern für den Warmwasserbedarf einzelner Haushalte oder Gebäude.

Neben der direkten Nutzung der Solarenergie ist auch die indirekte Nutzung schon seit Jahrtausenden im Einsatz. Hierbei wird – durch gebäudetechnische Eigenschaften wie Orientierung und Kubatur, Glasarten und Größen der Fenster, Anordnung der Gebäude zueinander, die Orientierung der Räume an den Himmelsrichtungen nach Funktion und im Besonderen nach den Unterschieden zwischen der Außenluftwärme nach Klimazone und dem Wunschklima der Innenräume – die Wärme der Solarstrahlung „passiv“ genutzt oder blockiert (Hegger, 2003, S. 14).

3.6.2 Arten und Bauformen von Solarenergieanlagen

Es gibt drei Hauptfunktionsweisen der Solarenergie: solarthermische Kollektoren, Photovoltaikkollektoren und photolytische Brennstoffherzeugung zur Wärme-, Elektrizitäts- oder Brennstoffherzeugung (Quaschnig, 2015, S. 38). Erst seit einigen Jahren gibt es auch Mischsysteme, die Elektrizität *und* Wärme, teilweise auch Kälte, aus der Solarstrahlung transformieren können.

Die wichtigsten Bauformen sind die vollflächig auf Dächern oder Fassadenteilen gebäudeintegrierten Kollektoren, die aufgeständerten Dach- oder Freiflächenanlagen (meist bei größeren Kraftwerken im Einsatz) und verschiedene Arten der CSP-Anlagen. Letztere nutzen entweder über Parabolrinnen-Systeme die konzentrierte Solarenergie oder sie fokussieren auf einen gemeinsamen Brennpunkt in einem Turm, wo dann bei hohen Brennpunkttemperaturen über einen Dampfgenerator die Wärme in Elektrizität umgewandelt wird. Eine noch sehr neue, vollständig mobile und dekorative Bauform ist die „SmartFlower“: eine Solaranlage, deren ein- und ausfaltbare Solarmodule in Sonnenform der Sonne folgen – und das idealerweise im 90-Grad-Winkel. Im Weiteren gibt es bereits einzelne Pilotanlagen, die andere Funktionsweisen nutzen: als Aufwindkraftwerk oder Solarsee. Allerdings befinden sich diese global (noch) nicht seriell im Einsatz (Schlaich und Schiel, 1995), daher gibt es bisher noch wenig geprüftes Wissen über deren Wirtschaftlichkeit und Zukunftsfähigkeit.

3.6.3 Beispiele für Solarenergieanlagen nach Lage und Typ

Die folgende Tabelle 15 zeigt Beispiele aus der Leistungs- und Größenvielfalt der Solarenergieanlagen, aufsteigend sortiert nach dem Energieertrag und der Funktionsweise. Der Punkt „Fläche“ beinhaltet die durch direkte und indirekte Flächenanteile (Kollektorenflächen vollflächig oder bei aufgeständerter Kollektorbauweise mit Abstandsflächen) belegten horizontalen Gesamtflächen der Anlage. Falls es Ausnahmen von diesen Flächenregeln gibt, ist dies beim jeweiligen Record vermerkt. In Kapitel 5.4 (Reflexion und Ausbaumöglichkeiten des Flächenbedarfskatalogs der Anlagen erneuerbarer Energieproduktion) werden ergänzend Energieanlagen nach ihrem Verhältnis zwischen den Kollektorflächen und der Energiepotenzialfläche veranschaulicht.



Tabelle 15: Solarenergieanlagen nach Lage, Typ und Größe


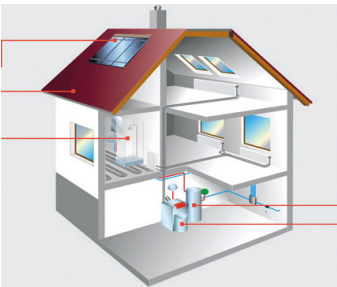

Photovoltaik, Kleinanlagen	
	<p>Name, Lage: „Simon“, Ökostrom-PV-Kleinstpaneel, Wien, Österreich</p> <p>Typ: Solarenergie</p> <p>Untertyp: Photovoltaik, Kleinstpaneel</p> <p>Info: Grundgedanke des Kleinstkraftwerkes „Simon“ ist, dass der Strom direkt zu den nächsten Haushaltsgeräten fließt, d. h., stets sofort verlustfrei lokal verbraucht wird, weil allein der Hausgeräte-Standby-Bedarf bei meist über 150 Watt liegt. Vorteile des Paneels sind die sehr einfache Montage (eine Steckdose genügt) und Demontage. Dieser Anlagenansatz ist deshalb sehr intelligent, weil er für urban dichte, mehrgeschossige Gebäudetypologien passt und in einer „Schwarmlösung“ sehr netzentlastend wirken könnte.</p> <p>Fläche (ha): 0,00012 (1,2 m²), Flächenangabe: Länge x Breite des Einzelpaneels.</p> <p>Leistung (MW el): 0,00015 (150 Watt)</p> <p>Energie (MWh el/a): 0,133</p>
	<p>Name, Lage: „SmartFlower“, Rom, Italien</p> <p>Typ: Solarenergie</p> <p>Untertyp: Photovoltaik, mobile Einzelanlage, 3-Achsen-Nachführung der „Blätter“</p> <p>Info: Fertigmodul, leicht auf- und abbaubar. Funktion auch direkt als Solartankstelle möglich (selbst ohne Netzanschluss). Faltet sich bei Dunkelheit oder bei zu starkem Wind automatisch zusammen. Laut Herstellerangaben: Durch die zweiachsige Nachführung, die Software, die Kollektorkühlung und die Selbstreinigung der „Blütenblätter“ („smart tracking, cooling, cleaning“) beim Zusammenfallen insgesamt bis zu +40 % Ertrag im Vergleich zu fix aufgeständerter Anlage.</p> <p>Fläche (ha): 0,003 (30 m²)</p> <p>Leistung (MW el): 0,0023 (2,3 kW)</p> <p>Energie (MWh el/a): 5,1</p>
	<p>Name, Lage: Passiv-Bürohaus SOL 4, Mödling, Österreich</p> <p>Untertyp: Photovoltaik, gebäudeintegriert (Fassade)</p> <p>Info: Das größte Passivbürohaus Österreichs verfügt über eine fassadenintegrierte PV-Anlage. Die netzgekoppelte PV-Anlage ist als hinterlüftete Kalfassade ausgeführt. Der Heizenergiebedarf des Bürogebäudes ist so gering (< 15 kWh/m²/a), dass er über das Jahr gerechnet aus der PV-Anlage über den Einsatz einer hocheffizienten Wärmepumpe gedeckt werden kann.</p> <p>Fläche (ha): 0,0215 (vollflächig belegte vertikale Fassadenteile)</p> <p>Leistung (MW): 0,028</p> <p>Energie (MWh/a): 15,7</p>

Foto: Energetica Industries GmbH (2015)



Foto: Energetica Industries GmbH (2014)

Foto: HEI Eco Technology GmbH (2014)

Photovoltaik, Großanlagen	
 <p>Foto: Audi AG (2010)</p>	<p>Name, Lage: Audi AG Photovoltaik, Neckarsulm, Deutschland</p> <p>Untertyp: Photovoltaik, Flachdachanlage, aufgeständerte Kollektoren</p> <p>Info: Baujahr 2009, PV-Großanlage auf einem Industriedach. Besonderheit ist die ungewöhnlich dichte Kollektorbelegung des Flachdaches, die der Grund für den sehr effizienten Energieertrag pro Fläche im Vergleich zu anderen Flachdach-PV-Parks ist.</p> <p>Fläche (ha): 2,7</p> <p>Leistung (MW el): 1,9</p> <p>Energie (MWh el/a): 1.800</p>
 <p>Foto: SolarCity (2016)</p>	<p>Name, Lage: Tesla Solarpark Ta'u Island, Amerikanisch- Samoa</p> <p>Untertyp: Photovoltaik, Freiflächenanlage fix aufgeständerter Kollektoren, mit Akkuspeichern</p> <p>Info: Die Anlage (5.328 PV-Freiflächen-Module und 60 Tesla-Powerpacks mit je einer Speicherkapazität von 6 MWh auf einer Gesamtfläche von 2.22 ha) kann für drei Tage den gesamten Strombedarf der Insel abdecken. Eine volle Neuladung benötigt 7 Stunden Tageslicht. Die Insel Ta'u hat etwa 600 EinwohnerInnen und war vor der PV-Anlage bei der Stromproduktion ausschließlich von Dieselgeneratoren abhängig (laut den Quellen 110.000 Gallonen Diesel pro Jahr).</p> <p>Fläche (ha): 1,95</p> <p>Leistung (MW): 1,4</p> <p>Energie (MWh/a): 1.801</p>
 <p>Foto: Akazienbla (2009)</p>	<p>Name, Lage: Solarpark Lieberose, Freiflächenanlage, Brandenburg, Deutschland</p> <p>Untertyp: Photovoltaik, Freiflächenanlage, fix aufgeständerte Kollektoren</p> <p>Info: 700.000 Dünnschichtmodule des Typs First Solar FS-272-277 mit einem Wirkungsgrad von etwa 10% und mit 38 Wechselrichtern der Firma SMA Solar Technology. Die Fläche war ein ehemaliger Truppenübungsplatz, wurde aber von Munitionsresten dekontaminiert.</p> <p>Fläche (ha): 162</p> <p>Leistung (MW el): 52,79</p> <p>Energie (MWh el/a): 52.000</p>

Photovoltaik, Großanlagen	
	<p>Name, Lage: PV-Kraftwerk, Kagoshima, Japan Untertyp: Photovoltaik, schwimmende Kollektoren Info: 2013 von dem Unternehmen Kyocera an der Küste der Hafenstadt Kagoshima erbaut. Fläche (ha): 110 Leistung (MW el): 70 Energie (MWh el/a): 78.800</p>
<p>Foto: Kyocera Corporation (2013)</p>	
Solarthermie, Kleinanlagen	
	<p>Name, Lage: ST-Kleinanlage, Wien, Österreich Untertyp: Solarthermie, Schrägdachanlage vollflächig, Kleinstanlage auf einem Einfamilienhaus. Info: Modellrechnung mit 500 l Wasserspeicher, Baujahr 2006. In Österreich sehr typische und weit verbreitete Einzelanlagengröße. Fläche (ha): 0,00092 (9,2 m²) Leistung (MW th): k.A. Energie (MWh th/a): 2,131</p>
<p>Abbildung: Viessmann Werke GmbH & Co KG (o. J.)</p>	
	<p>Name, Lage: Solarwärme bei Fleischwaren Berger, Niederösterreich, Österreich Untertyp: Solarwärme, fix aufgeständerte Kollektoren in Freiflächenanlage Info: Kollektorfläche 1.067 m², 60 m³ E-Speicher. 2015 Zubau eines 122 m² großen Parabolrinnenkollektorfeldes (Leistung 60 kW) als Temperaturbooster für die Flachkollektoren. Verwendung des Warmwassers im Produktionsprozess der Wurstprodukte (Brauchwasser, Reinigungszwecke). Kumulierter Ertrag 408 kWh/m² Kollektorfläche/a. Gesamtbeitrag solar durchschnittlich 11 % (im Sommer bis 60 %). Fläche (ha): 0,214 Leistung (MW th): 0,65 Energie (MWh th/a): 489</p>
<p>Foto: Fleischwaren Berger Ges.m.b.H. & Co KG (2015)</p>	

Solarthermie, Großanlagen	
 <p>Foto: AEE – Arbeitsgemeinschaft ERNEUERBARE ENERGIE Dachverband (2008)</p>	<p>Name, Lage: Solaranlage Fernheizwerk/AEVG-Gelände, Graz, Österreich</p> <p>Untertyp: Solarthermie, Flachdachanlage, aufgeständerte Kollektoren, fernwärmeunterstützend.</p> <p>Info: Kollektorfläche insgesamt 3.556 m². Baujahr 2008. Kein Pufferspeicher, sondern Direktabnahme im Fernwärmenetz.</p> <p>Fläche (ha): 0,5</p> <p>Leistung (MW th): 1,78</p> <p>Energie (MWh th/a): 1.600</p>
 <p>Foto: Frans Lemmens (2012)</p>	<p>Name, Lage: Almere Solar Island, Niederlande</p> <p>Untertyp: Solarthermie, Freiflächenanlage, aufgeständerte Kollektoren, fernwärmeunterstützend.</p> <p>Info: Baujahr 2010, Fläche der Flachkollektoren 7.000 m², keine Informationen über den Speicher. Besonderheit: optisch interessante Ovallösung, am Rand einer großen Siedlung gelegen.</p> <p>Fläche (ha): 2,36</p> <p>Leistung (MW th): 4,9</p> <p>Energie (MWh th/a): 2.472</p>
 <p>Foto: Arcon-Sunmark A/S (2015)</p>	<p>Name, Lage: Vojens Fjernvarme, Dänemark</p> <p>Untertyp: Solarthermie, Freiflächenanlage</p> <p>Info: Baujahr 2015, damals ertragsstärkste ST-Anlage der Welt, Saisonspeicher in einem künstlichen See mit 200.000 m³ Speichervermögen. Deckt fast 50% des gesamten Heizwärmebedarfes der Gemeinde (7.579 EinwohnerInnen bzw. 2.000 Haushalte, 10 Schulen und Industriegebäude).</p> <p>Fläche (ha): 23</p> <p>Leistung (MW th): 49</p> <p>Energie (MWh th/a): 28.000</p>

Concentrated Solar Power (CSP), Großanlagen	
 <p>Foto: Torresol Energy (2011)</p>	<p>Name, Lage: Gemasolar Array, Spanien</p> <p>Untertyp: Solarwärme, Freiflächenanlage, „Concentrated Solar Power“: viele einzeln steuerbare Spiegel konzentrieren das Sonnenlicht auf einen heißen Brennpunkt in einem zentral stehenden Turm. Dort wird die Hitze als Wärme und/oder (über eine Turbine) in Elektrizität umgewandelt.</p> <p>Info: Besonderheit der Grundlast- und Energierегelfähigkeit durch Wärmespeicherung: Die wärmespeichernde Flüssigkeit besteht zu 60 % aus Kaliumnitrat und zu 40 % aus Natriumnitrat. Die Wärmespeicherung erlaubt die Stromproduktion bis zu 15 Stunden ohne Solarbeitrag. Dies erklärt auch die (gegenüber thermosolaren Anlagen ohne Speicher) zwei- bis dreifache Produktivität bei den Laststunden. Zugleich sichert die Salzschnmelzen-Speicherung, dass Strom genau entsprechend aktuellen Bedarfen in das umgebende Stromnetz eingespeist werden kann.</p> <p>Fläche (ha): 210</p> <p>Leistung (MW el): 20</p> <p>Energie (MWh el /a): 110.000</p>
 <p>Foto: US Government, BLM – Bureau of Land Management (1984)</p>	<p>Name, Lage: Solar Energy Generating Systems (SEGS), Mojave-Wüste, Kalifornien, USA</p> <p>Untertyp: thermalelektrisch, Freiflächenanlage, Wärme-Parabolspiegel-Sammler</p> <p>Info: 936.384 einzelne parabelförmige Spiegel konzentrieren die Solarwärme im Brennpunkturm. Von dort wird die Wärme in einen Speichertank, der mit synthetischem Öl gefüllt ist, übertragen. Diese Wärme wird über ein Leitungsnetz gesammelt und über eine Turbine in Elektrizität umgewandelt. Baujahr 1984, damals „zweitgrößtes thermalelektrisches Solarkraftwerk“ der Welt.</p> <p>Fläche (ha): 647</p> <p>Leistung (MW el): 394</p> <p>Energie (MWh el/a): 539.000</p>

Quelle: eigene Darstellung

3.6.4 Lageunabhängige Ertragsunterschiede bei Solarenergiegewinnung

Bei den Energieertragsvarianzen der Solarenergie (ob zur Warmwasser- und/oder zur Elektrizitätserzeugung) gibt es eine Reihe von Faktoren, die unabhängig von der geografischen Lage der Solaranlage wirksam sind. Dazu gehört die Ausrichtung sowie die eingesetzte Technologie der Module: Horizontal ist aufgrund der Sonneneinstrahlungsrichtung für den Energieertrag die genaue Ausrichtung nach Süden ideal. Die vertikale perfekte Ausrichtung variiert nach Jahreszeit: Ein sehr flacher Winkel würde den Sommerertrag optimieren, ein steiler den Winterertrag. Aus diesem Grund wird bei fix installierten Anlagen in mitteleuropäischen Breiten häufig ein 35-Grad-Winkel als Kompromiss gewählt.

Die Neigungsgrade der Photovoltaikkollektoren können bei freistehenden Anlagen mit ein- oder zweiachsiger Nachführung ertragsoptimiert geändert werden. Auch kann (je nach Verbauungsart der Module am Dach und/oder in der Fassade) die Erwärmung der Module 1,5 bis 10 Prozent Ertragsverluste bringen (Kaltschmitt, Streicher und Wiese, 2006, S. 239). Zusätzlich gibt es geringe Systemverluste, die geringfügig nach der Bauweise des gesamten elektrischen Systems variieren können.

Die folgende Testreihe in Tabelle 16 illustriert diese Ertragsunterschiede. Bei gleichbleibender Referenzlage (Wien) und gleichbleibender Leistung (5 kW) wurden die vertikale und die horizontale Neigung (Himmelsrichtung) und danach zum Vergleich auch die Photovoltaiktechnologie verändert und diese Ertragsbeispiele mit einem optimierten System (freistehend, zweiachsige Nachführung) verglichen. Der Stromertrag wurde mit dem in der Quelle genannten Tool modelliert.

Tabelle 16: Ertragsvarianzen einer Photovoltaikanlage, Leistung 5 kW, Standort Wien

Kollektorausrichtung und Montageart	Stromertrag kWh el/a	Unterschied zur Optimalvariante
Fix montiert, gebäudeintegriert, vertikale Neigung 35°, Azimut Süd (= 0°), PV-Technologie: kristallines Silizium	5.110	-5,02 %
Fix montiert, gebäudeintegriert, vertikale Neigung 35°, Azimut Nord (= 180°), PV-Technologie: kristallines Silizium	2.840	-47,21 %
Fix montiert, gebäudeintegriert, vertikale Neigung 35°, Azimut West (= 90°), PV-Technologie: kristallines Silizium	4.120	-23,42 %
Fix montiert, gebäudeintegriert, vertikale Neigung 35°, Azimut Ost (= -90°), PV-Technologie: kristallines Silizium	4.150	-22,86 %
Fix montiert, senkrecht gebäudeintegriert, vertikale Neigung 90°, Azimut Süd (= 0°), PV-Technologie: kristallines Silizium	3.470	-35,50 %
Fix montiert, waagrecht gebäudeintegriert, vertikale Neigung 0°, Azimut Süd (= 0°), PV-Technologie: kristallines Silizium	4.470	-16,91 %
Fix montiert, gebäudeintegriert, vertikale Neigung 35°, Azimut Süd (= 0°), PV-Technologie: CIS-Dünnschicht (verwendete Elemente sind Kupfer, Indium, Gallium, Schwefel und Selen)	2.880	-46,47 %
Fix montiert, gebäudeintegriert, vertikale Neigung 35°, Azimut Süd (= 0°), PV-Technologie: CdTe-Dünnschicht (Cadmiumtellurid-Technologie)	3.370	-37,36 %
Optimalvariante: freistehend, zweiachsige Nachführung vertikal und horizontal, PV-Technologie: kristallines Silizium	5.380	

Quelle: Europäische Kommission, Joint Research Centre, Institute for Energy and Transport – IET (2017); eigene Berechnungen

Die höchste Ertragsvarianz (-47 % zwischen reiner Nord- und Südorientierung) ist durch die horizontale Ausrichtung bedingt, deutlich geringer sind die Unterschiede bei der Variation der vertikalen Ausrichtung (waagrecht oder senkrecht zwischen -16 und -35 %). Dagegen überrascht es, dass das Optimalsystem (freistehend mit zweiachsiger Nachführung) gegenüber dem „besten“ fix montierten System (35° vertikal, Azimut Süd) in dieser Testreihe nur 5 Prozent mehr Ertrag aufweist.

Freistehende Anlagen mit Nachführungen benötigen pro Energiemenge etwas mehr Fläche als fix montierte Systeme und schneiden in der Wirtschaftlichkeit wegen deutlich höherer Wartungskosten als bei den fix montierten Systemen auch etwas schlechter ab.

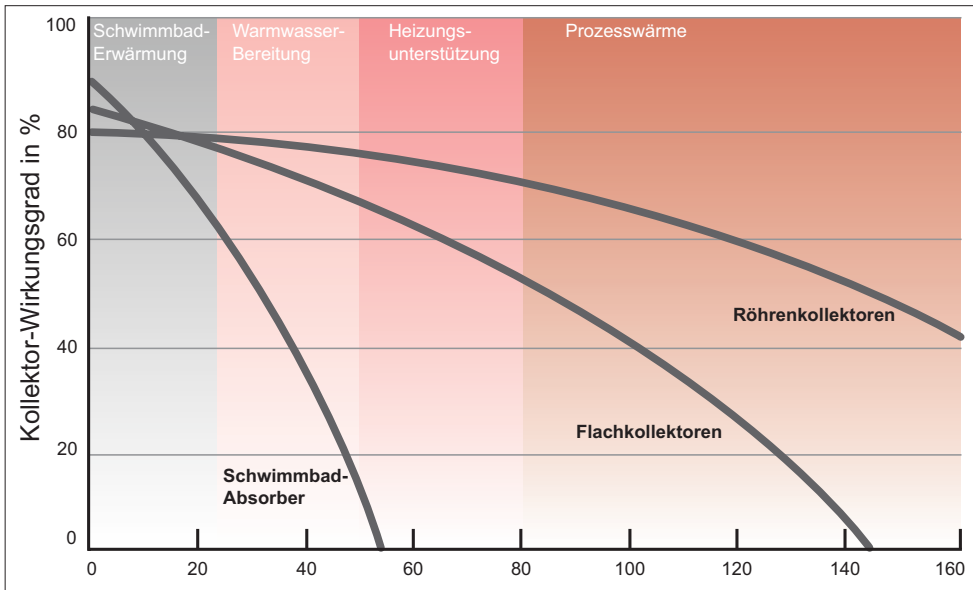
Sehr deutlich sind auch die Ertragsunterschiede zwischen verschiedenen PV-Technologien. Hierbei schneiden die Dünnschichttechnologien (sowohl CdTe als auch CIS) beim solarelektrischen Umwandlungsgrad im Durchschnitt schlechter ab als kristallin-siliziumbasierte Kollektoren – allerdings sind sie wesentlich wirtschaftlicher, weil sie pro Quadratmeter Kollektor erheblich günstiger sind und aufgrund des geringeren Materialbedarfes auch einen weit günstigeren ökologischen Fußabdruck haben. Daher könnten sie künftig gerade bei freistehenden Großanlagen, wenn die

Flächenverfügbarkeit gegeben ist, eine günstige Wahl sein. Pro Kollektorfläche (nicht pro Anlagenfläche) haben Konzentratorsysteme eine nochmals höhere Umwandlungseffizienz. Abbildung 22 zeigt die zeitlichen Lernkurven der verschiedenen Technologien, die aber möglicherweise in Zukunft nur mehr geringe zusätzliche Wirkungsgradsteigerungen erwarten lassen. Die am häufigsten im Einsatz stehenden Technologien haben aktuell einen Umwandlungsgrad zwischen 20 und 25 Prozent. Dazu zeigt die Abbildung die Material- und Effizienzunterschiede verschiedener Technologien im zeitlichen Entwicklungsverlauf seit 1975.

Bei der Warmwassererzeugung gibt es drei grundlegend verschiedene Bauweisen, die unabhängig von der Einstrahlungsstärke und -dauer verschiedene Wirkungsgrade zeigen: der Flachkollektor, der Vakuumröhrenkollektor und der Luftkollektor. Diese drei Kollektorenarten nutzen denselben Wärmegewinnungsprozess, bei dem die Solarwärme über ein Trägermedium (Wasser oder Wasser mit Frostschutzmittel oder auch Luft) gesammelt und in Warmwasserrohrleitungen übertragen wird.

Abbildung 23 zeigt, dass die drei Wirkungsgradkurven sehr unterschiedlich sind. Pro Fläche ist, insbesondere wenn höhere Temperaturen benötigt werden (Heizungsunterstützung, industrielle Prozesswärme), die Bauweise mit Vakuum-Röhrenkollektoren am effektivsten. Allerdings kostet diese Technologie pro Einheit/kWp (Kilowatt „peak“) auch deutlich mehr als die Flachkollektoren. Die Wahl der „optimalen“ Technologie hat also sowohl mit der Flächenverfügbarkeit als auch den Wirtschaftlichkeitserwartungen zu tun.

Abbildung 23: Wirkungsgradunterschiede und Temperaturniveaus verschiedener Solarthermiekollektorarten



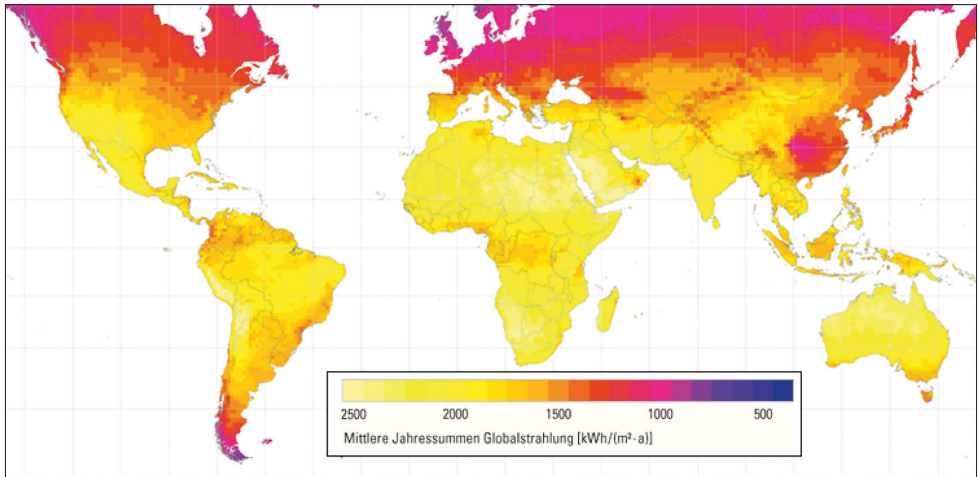
Quelle: Ritter Energie- und Umwelttechnik GmbH & Co. KG (2017)

Den lageunabhängig höchsten Ertrag pro Kollektorfläche haben Kombimodule, die sowohl solarthermisch Warmwasser als auch photovoltaisch Elektrizität erzeugen. Dabei wird nicht nur der Wärme- und Elektrizitätsertrag kombiniert, sondern durch die Wärmeabfuhr auch die PV-Module gekühlt, was zusätzlich für geringere Umwandlungsverluste sorgt.

3.6.5 Lageabhängige Ertragsunterschiede bei Solarenergiegewinnung

Der wichtigste lageabhängige Ertragsfaktor bei der Solarenergie ist die Stärke und Intensität der Solarstrahlung, d. h. die Anzahl und Stärke der Sonnenstunden pro Jahr. Die folgende Karte 5 zeigt auf einer Weltkarte, dass diese Zeitmenge nördlich und südlich des Äquators abnimmt: Unterschiedliche Sonnenscheindauern und -intensitäten bringen in etwa 2,5-fache Energieertragsunterschiede zwischen den „sonnigsten“ und den anderen Lagen.

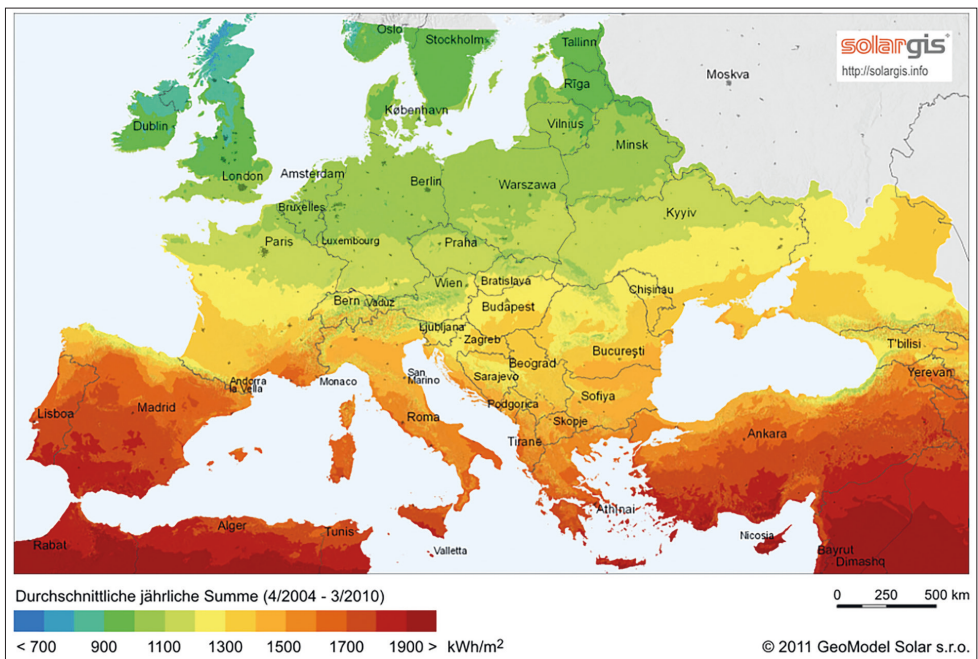
Karte 5: Unterschiede in der solaren Globalstrahlungsstärke weltweit



Quelle: Mertens (2015, S. 49)

Karte 6 zeigt, dass diese Bandbreite der PV-Ertragsunterschiede nahezu auch in Europa, zwischen der Nordküste Afrikas und Skandinavien, besteht.

Karte 6: Unterschiede in der solaren Globalstrahlungsstärke in Europa



Quelle: Mertens (2015, S. 49)

Insgesamt bewegt sich die Spannweite der Messwerte zwischen den verschiedenen Lagen der unterschiedlichen Strahlungsstärken global zwischen 500 und 2.500 kWh pro Quadratmeter und Jahr bzw. in Europa zwischen 700 (Schottland) und 1.800 kWh (Sizilien, Griechenland, Südspanien) pro Quadratmeter und Jahr.

Der Energieertrag ergibt sich aus der Strahlungsstärke, multipliziert mit den Sonnenstunden pro Jahr. Hierzu gib es sehr gute Simulations- und GIS (Geoinformationssystem)-Grundlagen. Die folgende Tabelle 17 zeigt dazu sieben per PV-Tool simulierte Ertragswerte, die sich nur durch die Lage, aber nicht durch die Anlageneigenschaften (Leistung und Ausrichtung der Kollektoren, die hier zur besseren Vergleichbarkeit gleichgestellt wurden) unterscheiden.

Tabelle 17: Standortabhängige Ertragsvarianzen einer Photovoltaikanlage

Lage	Energieertrag kWh el/a	Unterschied zum „Optimalstandort“ Gibraltar
Edinburgh, Schottland, Vereinigtes Königreich	4.430	-43,06 %
Hamburg, Schleswig-Holstein, Deutschland	4.530	-41,77 %
Paris, Frankreich	4.910	-36,89 %
München, Bayern, Deutschland	4.950	-36,38 %
Waidhofen an der Thaya, nördliches Waldviertel, Österreich	4.690	-39,72 %
Villach, Kärnten, Österreich	5.450	-29,95 %
Rom, Italien	6.840	-12,08 %
Gibraltar, Südspanien	7.780	

Anmerkung: Unveränderte Parameter der Referenzanlage: PV-Leistung 5 kWp, fix montiert, gebäudeintegriert, vertikale Neigung optimiert, horizontale Ausrichtung Süd. Die zugrunde liegende Einstrahlungsdatenbank Climate-SAF PVGIS führt keine Records nördlich und südlich der hier verwendeten Beispiele. Das ist aber für die vergleichende Zusammenschau unerheblich, denn Edinburgh und Gibraltar liegen bereits in der energieertragschwächsten bzw. -stärksten Lageklasse.

Quelle: eigene Berechnungen unter Verwendung von IET (2017)

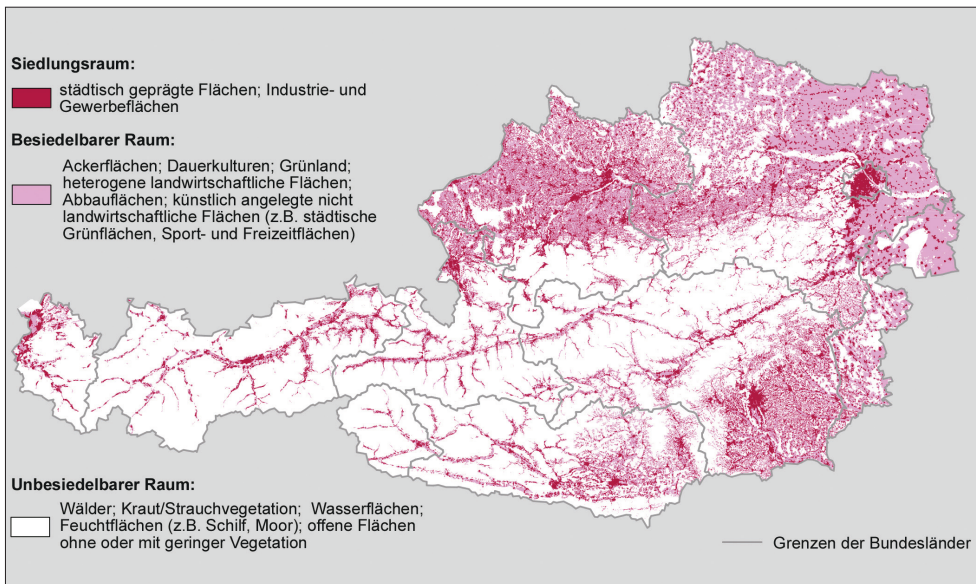
Die Ertragsunterschiede photovoltaischer elektrischer Energie in kWh (el) pro Jahr variieren somit nach dieser Modell-Tool-Berechnung innerhalb von Europa um 43 Prozent, innerhalb von Österreich (aufgrund der sehr kleinen Nord-Süd-Ausdehnung von etwa 290 km) nur um 10 Prozent.

3.6.6 Räumlich bedingte Potenzialertragsunterschiede von Solarenergiegewinnung in Österreich

Die nachfrageseitigen Potenzialertragsaspekte sind weniger gleichförmig im Raum verteilt als die Solarstrahlung. Aufgrund der Lagen und der Verteilung des Dauersiedlungsraumes in Österreich haben solare Großanlagen (sowohl für Solarthermie als auch für Photovoltaik) außerhalb der alpinen Regionen – aufgrund der größeren

horizontalen Freiflächenpotenziale und der höheren Energiedichte der Nachfrage – ein höheres und leistungsstärkeres Umsetzungspotenzial als innerhalb der engeren alpinen Täler. In der folgenden Karte 7 sind diese Lageunterschiede und die großen Flächenunterschiede des besiedelbaren Raumes inner- und außerhalb der Alpen sehr klar erkennbar.

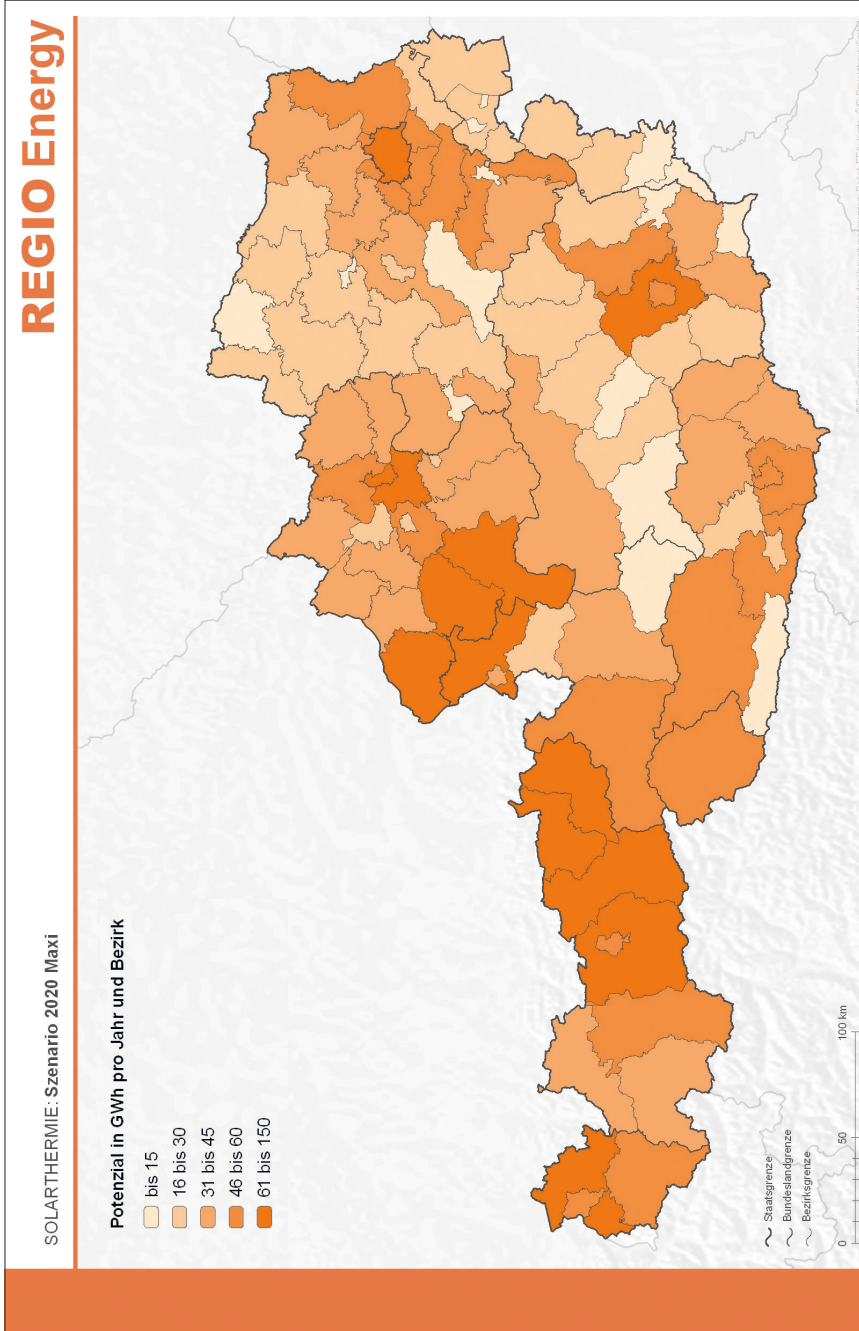
Karte 7: Siedlungsräume, besiedelbare und nichtbesiedelbare Räume in Österreich



Quelle: Wonka (2008)

Beim künftigen realisierbaren Potenzial für Solarthermie und Photovoltaik werden auch Netzkoppelungs- und Abnahmebedingungen bei Wärme und Elektrizität eine Rolle spielen. Die Photovoltaik kann an jedem Stromnetzknotten fast lageunabhängig Elektrizität einspeisen, während sowohl Groß- als auch Kleinanlagen der Solarthermie in der Nähe hoher Abnahmedichten oder in der Nähe von bestehenden Nah- und Fernwärmenetzen am wirtschaftlichsten betreibbar sind. Die folgende Karte (Projekt „REGIO Energy“) zeigt auf Bezirksebene diese städtisch-dicht geprägten solarthermischen Potenzialschwerpunkte deutlich. Im räumlichen Modell des Projektes „REGIO Energy“ wurde bei der Abschätzung der realisierbaren Potenziale auch berücksichtigt, dass Solarthermie und Photovoltaik auf Dach- und Freilandflächen in einer direkten Produktionskonkurrenz zueinander stehen. Die Flächenanteile wurden daher im „REGIO Energy“-Modell einfach zu 50 Prozent der Solarthermie und zu 50 Prozent der Photovoltaik zugeteilt. Die folgende Karte 8 zeigt diese stark nachfrageseitig geprägte Potenzialperspektive auf Ebene der österreichischen Bezirke.

Karte 8: Solarthermiefpotenziale im Szenario „Maxi 2020“, Projekt „REGIO Energy“



Quelle: Stanzer, Novak, Dumke et al. (2010, S. 120)

3.6.7 Flächenbedarfe bei der Solarenergiegewinnung

Der Flächenbedarf von Solarenergieanlagen besteht aus unterschiedlichen Anteilen. Gemessen an der gesamten Energiepotenzialfläche machen die horizontal „versiegelten“ Flächen bei Freiflächenanlagen (etwa die Fundamente der Kollektormasten) nur einen sehr kleinen Teil des gesamten Flächenbedarfs aus. Zusätzlich benötigen die Zufahrtswege, Gebäude und Anlagen der Transformatoren und Gleichrichter ebenfalls Flächen. Bei der Bauweise mit aufgeständerten Kollektoren sind außerdem Abstandsflächen zwischen den Kollektoren nötig, damit sich die Kollektoren nicht gegenseitig verschatten, was energieertragsmindernd wäre.

Bei gebäudeintegrierten Anlagen (dach- und/oder fassadenintegriert) ist der Flächenbedarf geringer als bei Freilandanlagen, weil die Zufahrtswege entfallen bzw. Anlagenkomponenten direkt im Gebäude untergebracht werden können. Dadurch findet gar keine zusätzliche Flächeninanspruchnahme statt. Gebäudeintegrierte Anlagen können auch vollflächig, etwa vertikal auf Fassaden oder schräg auf Dächern, installiert werden. Weiterer Flächenbedarf besteht für die notwendigen Speicheranlagen, bei der Solarthermie wird durch den zeitlichen Unterschied zwischen Wärmeangebot (Mittagsspitze) und Nachfrage (Morgen- und Abendspitze) unbedingt ein Pufferspeicher benötigt (meist ein Wassertank), bei der photovoltaischen Stromerzeugung ist dies nicht unbedingt nötig, weil Strommengen, die lokal nicht in Echtzeit ihrer Gewinnung nachgefragt werden, einfach in das Elektrizitätsnetz eingespeist werden können.

3.6.8 Beispiele für Solarenergieanlagen (nach Flächenertrag der Energieproduktion)

Im Folgenden werden Zahlenwerte zu den Flächenbedarfen und den jeweiligen Energieerträgen verschiedener Solarenergieanlagen aus dem Flächenbedarfskatalog von Anlagen erneuerbarer Energien aufgeführt. Die Records sind absteigend nach dem Energieertrag pro Fläche sortiert. Zunächst werden Anlagen der Photovoltaik (Tabelle 18), danach Anlagen der Solarthermie gezeigt (Tabelle 19). Die Spalte „Fläche“ steht hier für die Werte der gesamten horizontalen Energiepotenzialfläche. In Kapitel 5.4 (Reflexion und Ausbaumöglichkeiten des Flächenbedarfskatalogs der Anlagen erneuerbarer Energieproduktion) werden ergänzend Anlagen nach ihrem Verhältnis zwischen den Kollektorflächen und der Gesamtfläche veranschaulicht.

Tabelle 18: Beispiele für Photovoltaikanlagen nach dem Flächenenertrag der Energieproduktion

Name, Lage	Typ	Untertyp	Datenqualität	Fläche (ha)	Leistung (MW el)	Energie (MWh el/a)	m ² /kWh el/a	kWh el/m ² /a	Rechnerische Volllaststunden (h/a)
„SmartFlower“, Rom, Italien	Solarenergie	Photovoltaik, mobile Einzelanlage mit zweiseitiger Nachführung, für Freiflächen	gut	0,003	0,00231	5,1	0,00588	170	2.208
„Simon“, Ökostrom-PV-Kleinstpaneel, Wien, Österreich	Solarenergie	Photovoltaik, mobiles Kleinstpaneel, vollflächig (Neigung und Ausrichtung variabel)	gut	0,000119	0,00015	0,133	0,00895	112	887
Tesla Solarpark Ta'u Island, Amerikanisch-Samoa	Solarenergie	Photovoltaik, Freiflächenanlage, aufgeständerte Kollektoren, mit Akkuspeicher	gut	1,95	1,4	1.801	0,01083	92	1.286
Solar Energy Generating Systems (SEGS), Mojave-Wüste, Kalifornien, USA	Solarenergie	Elektrizität, Freiflächenanlage, Wärme-Parabolspiegel-Sammler	gut	647,5	361	539.000	0,01201	83	1.493
Passiv-Bürohaus SOL 4, Mödling, Österreich	Solarenergie	Photovoltaik, gebäudeintegriert (Fassaden)	gut	0,0215	0,02805	15,67	0,01372	73	559
PV-Kraftwerk, Kagoshima, Japan	Solarenergie	Photovoltaik, schwimmende Kollektoren	gut	110	70	78.800	0,01396	72	1.126
Audi AG Photovoltaik, Neckarsulm, Deutschland	Solarenergie	Photovoltaik, Flachdachanlage, aufgeständerte Kollektoren	gut	2,7	1,9	1.800	0,015	67	947
Solarpark Lieberose, Freiflächenanlage, Brandenburg, Deutschland	Solarenergie	Photovoltaik, Freiflächenanlage, aufgeständerte Dünnschicht-Modul-Kollektoren (daher ca. 50 % Flächenenertrag vs. andere PV-Anlagen mit Siliziumkollektoren)	gut	162	52,79	52.000	0,03115	32	985

Quelle: eigene Darstellung

Tabelle 19: Beispiele für Solarthermieanlagen nach dem Flächenenertrag der Energieproduktion

Name, Lage	Typ	Untertyp	Datenqualität	Fläche (ha)	Leistung (MW th)	Energie (MWh th/a)	m ² /kWh th/a	kWh th/m ² /a	Rechnerische Volllaststunden (h/a)
Solaranlage Fernheizwerk/ AEVG-Gelände, Graz, Österreich	Solarenergie	Solarthermie, Flachdachanlage, aufgeständerte Kollektoren, fernwärmeunterstützend, kein Speicher	fragwürdig	0,496	1,78	1.600	0,0031	322	899
Solarthermie-Kleinanlage, Wien, Österreich	Solarenergie	Solarthermie, Schrägdachanlage vollflächig, Kleinanlage auf einem Einfamilienhaus	gut	0,00092	k. A.	2.131	0,00432	232	k. A.
Solarwärme bei Fleischwaren Berger, Niederösterreich, Österreich	Solarenergie	Solarthermie, für industrielle Prozesswärme, Freiflächenanlage, aufgeständerte Kollektoren (Parabolrinnen), 60 m ³ Speicher	gut	0,214	0,65	489	0,00438	229	752
Solaranlage Vojens Fjernvarme, Dänemark	Solarenergie	Solarthermie, Freiflächenanlage, aufgeständerte Kollektoren, mit Saisonspeicher in künstlichem See (200.000 m ²), Fernwärmeunterstützung für Haushalte, Schulen und Industriegebäude	gut	23	49	28.000	0,00821	121	571
Almere Solar Island, Niederlande	Solarenergie	Solarthermie, Freiflächenanlage, aufgeständerte Kollektoren, fernwärmeunterstützend, keine Informationen über Speicher	gut	2,36	4,9	2.472	0,00955	105	505

Quelle: eigene Darstellung

3.6.9 Regelenergiefähigkeit von Solarenergie und ihre Eignung zur Grundlast- und Spitzenlastversorgung

Da die Intensität und Dauer der Solarstrahlung unregelmäßig erfolgen kann und schwer vorhersehbar ist, ist die Regelfähigkeit der Solarenergie (im Sinne einer zeitlich genauen Bedienung von Nachfragespitzen und -tälern) ohne geeignete Speicher- und Verteilungsinfrastruktur nur sehr bedingt, etwa durch An- oder Abschalten, möglich. Dies gilt für alle solaren Endenergieformen, d. h. die photovoltaische Elektrizität, die Warmwasserbereitung, die Kälteerzeugung oder für Mischformen aus diesen Endenergiearten.

Wirtschaftlich, netz- und effizienztechnisch besonders attraktiv ist es, wenn die lokale Menge der Energienachfrage dem zeitgleich umwandelbaren solaren Angebot entspricht, weil dann (und ohne Speicher nur dann) die Energie ohne „Abgänge“ in das Netz genutzt werden kann. Bei Stromnachfrage über die Mittagszeit, die mit keinen oder geringen Verlusten zwischen Produktions- und Nachfrageort genutzt werden kann, wird der „volle“ Endenergiepreis fällig, der meist höher liegt als der Einspeisetarif. Bezüglich der optimierten Entfernungen zwischen Solarenergieerzeugung und der Wärme- oder Elektrizitätskonsumation sind deutliche räumliche Unterschiede gegeben, weil Elektrizität prinzipiell sehr gut in das die Erzeugungsanlage umgebende Stromnetz abfließen kann, hingegen sind Wärme und Kälte erheblich schwerer über längere Entfernungen speicher- und transportierbar.

In Mittel- und Nordeuropa ist die solarthermische Wärmenutzung dann besonders effizient, wenn das erreichbare (niedrige) Temperaturniveau ausreicht und die Nachfrage zeitlich passend (oder zumindest nicht komplett gegenläufig) zum Angebot ist. Dies ist nicht nur beim Haushaltswarmwasserbedarf der Fall, sondern auch bei Sportanlagen, Hotels, Krankenhäusern sowie der Fernwärmeunterstützung und diversen Prozesswärmebedarfen in der Industrie. Weitere Möglichkeiten sind das direkte Lufttrocknen von Stoffen (z. B. Biomasserohstoffen) und das solare Kühlen (Kaltschmitt, Streicher und Wiese, 2006, S. 174). Solares Kühlen ist wirtschaftlich attraktiv, weil Nachfrage und Angebot zeitlich ideal zur Mittagsspitze zusammenfallen.

Liegen Energienachfrage und solares Angebot zeitlich auseinander, ist die Situation genau umgekehrt: Der mögliche Ausnutzungsgrad hängt dann sehr von der Kapazität und Leistung der Speicher ab. Kleine Warmwasserspeicher können Warmwasser einige Tage lang speichern. Bei einer Warmwassernachfrage von 50 Litern pro Person braucht ein Vierpersonenhaushalt 8 Quadratmeter Solarthermiekollektoren und einen Speicher mit 250 bis 500 Litern Volumen, um 50 bis 65 Prozent der Warmwassernachfrage decken zu können (Kaltschmitt, Streicher und Wiese, 2006, S. 169). Große Saisonspeicher, die die Sommerwärme (auch für größere Siedlungen, nicht nur für einzelne Wohnungen) bis in den Winter speichern können, sind anlagentechnisch noch eher selten.

Um optimierte Verhältnisse zwischen der Grundlast- und Spitzenlastversorgung zu erzielen, müssen Leistung und Arbeit der Solaranlagen und die Systemgrenze der Nachfrage aufeinander abgestimmt werden. Eine interessante und auch wirtschaftlich attraktive Möglichkeit ist dabei auch die solare Fernwärmeunterstützung, d. h. das

solare Vorwärmen des Wassers, das dann unter dem Einsatz anderer regenerativer oder nichtregenerativer Energieträger auf das benötigte Temperaturniveau angehoben wird. Solare Nahwärmesysteme gibt es mit und ohne Langzeitwärmespeicherung und mit Zwei- und Vierleiternetz (d. h. mit gemeinsamer oder getrennter Heiz- und Warmwasserwärmeverteilung; Kaltschmitt, Streicher und Wiese, 2006, S. 172).

3.6.10 Skalierbarkeit der Energieleistung und -arbeit von Solarenergieanlagen

Die aus der Solarstrahlung umwandelbare Energiemenge, unabhängig von der Endenergieform (Wärme, Kälte, Elektrizität oder Kombinationen), ist direkt proportional zur Kollektorgröße. Insbesondere bei PV-Kollektoren existieren nahezu alle Größenformen, von mobilen Kleinstkollektoren (um Mobilgeräte zu laden) bis zur PV-Großanlage auf großen Flachdächern oder im Freiland. Durch die Ertragsproportionalität zur Kollektorgröße ist eine sehr variable Größenskalierbarkeit der Anlagen möglich. Limitiert wird die Anlagengröße daher vor allem über das mobilisierbare Flächenangebot, aber auch durch die gewünschte nachfrageoptimierte Energieleistung und -arbeit, häufig auch über die Toleranzgrenzen der visuellen Veränderung des Orts- oder Landschaftsbildes durch eine Solarenergieanlage.

Es gibt Größenklassen, die bei bestehenden Anlagen wesentlich häufiger vorkommen als andere. Im Bereich privater Kleinanlagen in vollflächiger Aufdachbauweise, sehr häufig auf einzelnen freistehenden Einfamilienhäusern, sind solarthermische oder photovoltaische Kollektorgrößen von 10 bis 40 Quadratmetern, bei einer thermischen und/oder elektrischen Leistung von etwa 5 bis 10 kW, sehr verbreitet, weil diese Baugrößen gut zum Flächenangebot dieser Gebäude, aber auch zur Nachfragemenge an Wärme und/oder Elektrizität passen.

Großanlagen der solarthermischen Stromerzeugung (Parabolrinnen- und Solarturm-Kraftwerke) haben typische Anlagenspitzenleistungen von 20 bis 100 MW. PV-Kraftwerke haben eine sehr große Leistungsbandbreite von wenigen Kilowatt bis zu mehreren hundert Megawatt, im Freiland auch deutlich darüber im ein- bis zweistelligen MW-Bereich (Kaltschmitt, Streicher und Wiese, 2014, S. 810 f). Dies gilt ebenso für solarthermische Großkraftwerke. Bei ihrer Dimensionierung spielt ebenfalls das verfügbare Flächenangebot und die meist in Wärmenetze eingespeiste, gewünschte Wärmeleistung und -arbeit eine Rolle.

3.6.11 Flächenkonkurrenzen bei Solarenergiegewinnung

Wie stark nichtenergetische Flächennutzungen durch die Solarenergieanlagen konkurrenziert werden, hängt stark von der Bauform ab. Dach-, gebäude- und fassadenintegrierte, vollflächig befestigte Kollektoren nehmen keine zusätzlichen Flächen in Anspruch, sondern „nutzen“ bestehende Gebäudeflächen. Dadurch konkurrenzieren sie auch keine anderen Flächenfunktionen dieser Gebäude.

Bei Photovoltaik- oder Solarthermieanlagen im Freiland (aufgeständerte Kollektorenfelder) ist die Flächenbelegung nach den versiegelten und unversiegelten Anteilen zu

unterscheiden. Die versiegelten Teile, etwa die Fundamente der Aufständerungen, benötigen nur einen sehr kleinen Teil der gesamten horizontal belegten Fläche (Kalt-schnitt , Streicher und Wiese, 2006, S. 267).

Der Grad der Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion und/oder zur Produktion nachwachsender Rohstoffe hängt davon ab, in welchem Ausmaß diese Produktionsfunktionen nach dem Zubau der Solarenergieanlagen verändert werden oder nicht. Der energetisch-landwirtschaftliche Kombibetrieb in Etagenwirtschaft scheint möglich zu sein, im Zuge der empirischen Recherchen konnten aber keine existierenden Anlagen gefunden werden, die beide Ertragsformen nutzen, etwa Viehwirtschaft- und Grünlandnutzung oder landwirtschaftliche Produktion unter aufgeständerten Kollektoren – auch das Fahren mit landwirtschaftlichen Maschinen zwischen den Kollektorenständern ist schwer möglich.

Daher gilt im Regelfall, dass Solarenergieanlagen, wenn sie auf landwirtschaftlichen Flächen errichtet werden, sowohl die Nahrungsmittelproduktion als auch die Produktion nachwachsender Rohstoffe weitgehend verdrängen können, was einer starken Flächenkonkurrenz entspricht. Genauer gesagt hat der Grad der Konkurrenzierung etwas damit zu tun, ob die landwirtschaftliche Bearbeitbarkeit trotz der Kollektorbauten überhaupt erhalten bleibt (oder inwieweit die Fruchterträge reduziert werden). Geringer ist die Flächenkonkurrenz ausgeprägt, wenn Freilandflächen genutzt werden, auf denen auch vor Errichtung der Solaranlage gar keine Produktionsfunktion aktiv war, etwa bei landwirtschaftlichen Brachen oder auch bei Böschungen an Straßen und Schienen.

Auch der Grad der Konkurrenzierung der kleinräumigen Erholungsfunktion und der großräumigen Tourismusfunktion der durch Solarenergieanlagen belegten Flächen ist nicht generell einheitlich abschätzbar, sondern lageabhängig. Hier gibt es viele Variantenabstufungen zwischen zwei Extremen:

- Verliert die Fläche durch den Zubau der Solaranlage ihre Naherholungs- oder Tourismusfunktion und -qualität vollständig, ist die Flächenkonkurrenz als sehr hoch einzustufen.
- Liegen Naherholungs- und Tourismusfunktion und die Solaranlage weit auseinander, ist die Konkurrenzwirkung als sehr gering zu bewerten.

Ebenfalls schwierig ist die Konkurrenzeinschätzung der Solaranlagen zu anderen Flächenfunktionen: zur Wohnfunktion und zur Sachgüter- und Dienstleistungsproduktion. Dieses Konkurrenzverhältnis ist grundsätzlich als nicht vorhanden einzustufen, weil große Solaranlagen im Freiland meist nicht auf gewidmeten Flächen der Nutzungskategorien Bauland, Wohngebiet, Betriebs- und Industriegebiet stehen.

Große Solaranlagen im Freiland können auch andere erneuerbare Energieformen konkurrenzieren, die auf diesen Flächen realisiert werden könnten, wenn es um ein Entweder-oder geht. Dazu gehören insbesondere biogene Rohstoffe, die ebenfalls pro Energiemenge große Flächen benötigen und die der Nahrungsmittelproduktion ebenso wie der energetischen Verwertung dienen können, wie Mais, Getreide, Stroh, Raps oder andere Korn- und Ölsaaten.

Im Fall einer Etagenwirtschaft wären große Solarenergieanlagen im Freiland mit anderen erneuerbaren Energieformen wie der Windkraft und der seichten und tiefen Geothermie kombiniert. Auch hierzu konnten bei den Recherchen zum Flächenbedarfskatalog keine Beispiele gefunden werden, bei denen die jeweiligen Flächenanteile mehrerer erneuerbarer Energieträger und deren spezifische Energieerträge dokumentiert wären.

Tabelle 20 fasst die bisher erläuterten Flächenkonkurrenzaspekte tabellarisch zusammen und zeigt schlagwortartig auf, wodurch der Konkurrenzgrad bedingt ist und wie sich dabei bei welcher Solarenergieform die Ausprägungsunterschiede darstellen.

Tabelle 20: Qualitative Bewertung der Flächenkonkurrenzen zwischen der Energieerzeugung aus Solarenergie (Betriebsphase) und anderen lageidenten Flächenfunktionen

Art der erneuerbaren Energie und Endenergieform	Wohnfunktion	Orts- und Landschaftsbildfunktion	Naherholungsfunktion	Großräumige Tourismusfunktion	Sachgüter- und Dienstleistungsfunktion	Nahrungsmittelproduktion	Andere erneuerbare Energieproduktion
Gebäudeintegrierte Photovoltaik oder Solarthermie	keine	Ortsbildbeeinflussung abhängig von Sichtbarkeit der Kollektoren	keine	keine	keine	keine (weil nicht auf Lebensmittel-Ertragsböden)	keine
Photovoltaik- oder Solarthermiekraftwerke, Freiland, aufgeständerte Kollektoren	keine (weil nicht auf Bauland)	deutliche visuelle Veränderung des Landschaftsbildes	je nach Größe der Anlage kann Konkurrenz entstehen	je nach Größe der Anlage kann Konkurrenz entstehen	keine (weil nicht auf Betriebsgebieten)	Ertragsminderung bis Verlust der Funktion	abhängig davon, mit was kombiniert wird (zu Windkraft und Biomasse: Konkurrenz; zu Geothermie: keine Konkurrenz)

Konkurrenzgrad:



Indifferent: Der Konkurrenzgrad kann verschiedene Ausprägungen (von „keine“ bis „hoch“) einnehmen.

Quelle: eigene Darstellung

3.6.12 Umweltwirkungen der Solarenergieproduktion

Die Umweltwirkungen der Solaranlagen lassen sich nach den Bereichen Herstellung, Betrieb und Betriebsende unterscheiden. Bei der Herstellung der PV- und ST-Module kommen mittlerweile immer weniger umweltbelastende Stoffe zum Einsatz, allerdings werden nach wie vor Seltene Erden (Wang, Batentschuk, Osvet et al., 2011) und andere Stoffe benötigt. Beispiele solcher Stoffe sind u. a. Cadmium, Tellur und Selen. Bei der Gewinnung dieser Stoffe können (je nach der lokalen Situation) im Berg- oder Tagebau negative Umwelteffekte entstehen. In der Betriebsphase emittieren diese in den Kollektoren verbauten Stoffe nichts, ausgenommen bei Bränden: Bei kurzen Bränden bleiben die Emissionen unter den gesundheitsgefährdenden Schwellenwerten, bei sehr langen Branddauern können diese überschritten werden. Nach Betriebsende sind vor allem die Glasanteile der Module sehr gut recycelbar, andere Modulkomponenten benötigen aufwändige chemische Trennverfahren, sind aber ebenfalls isolierbar. Im Normalbetrieb der Energieumwandlung emittiert eine Solaranlage nichts, weder Kohlenstoffdioxid (CO₂), Schwefeloxide (SO_x) oder Stickoxide (NO_x) noch Feinstaub. Auch die Lärmerzeugung während der Wärme- oder Elektrizitätserzeugung ist sehr gering (Kaltschmitt, Streicher und Wiese, 2006, S. 267).

Bei Freiflächenanlagen kann das Mikroklima geringfügig beeinträchtigt werden, insbesondere durch die Verschattung, die aber eine zusätzliche (auch extensive) landwirtschaftliche Vieh- und Pflanzennutzung nicht grundsätzlich ausschließt.

Wenn eine monokulturelle landwirtschaftliche Nutzung nach Errichtung einer Solaranlage eingestellt wird, kann aber durch das dann entstehende Biotop auch eine ökologische Verbesserung gegenüber dem früheren Zustand erreicht werden (ebd., S. 267). Zusätzliche Verschattungen durch Solaranlagen im dicht verbauten Siedlungsgebiet sind ambivalent einzustufen: Eine Dachverschattung kann durchaus einen positiven Mehrwert für Bewohnerinnen und Bewohner bringen, aber es sind ebenso negative Verschattungseffekte möglich, wenn durch den Schattenwurf die Helligkeit in Innenräumen benachbarter Gebäude reduziert wird.

Zu den positiven Umweltwirkungen von Solaranlagen gehört der emissionsfreie Energieproduktionsbetrieb. Maßeinheit dafür sind die Emissionsmengen, die gegenüber einer Energieerzeugung aus nichterneuerbaren fossilen Ressourcen (Gas, Kohle, Öl) bei der Wärme-, Kälte- und Elektrizitätsproduktion eingespart werden können. Diese Umweltwirkungen gelten für alle Bauformen. Solarenergieanlagen im Freiland können aber auch eine landschaftsschützende Wirkung entfalten, die in einer Erschwerung der Versiegelung besteht, weil die Umwidmung einer solchen Kraftwerksfreilandfläche in Bauland (mit dem dadurch notwendigen Rückbau der Solaranlage) schwerer zu argumentieren ist als die Umwidmung in eine rein landwirtschaftlich genutzte Fläche. Dieser Zusammenhang gilt sinngemäß auch für Windparks auf landwirtschaftlichen Flächen.

Eine weitere Umweltwirkung von Solaranlagen ist die visuelle Veränderung der belegten Flächen (Dächer, Fassaden, Freiland). Diese Veränderung kann als negativ empfunden werden, weil der originale optische Zustand verändert wird. Die visuelle Veränderung ist bei Freiflächenanlagen stärker ausgeprägt als bei der vollflächigen

Aufdachvariante, da Freilandanlagen meist erheblich größer sind als Aufdachanlagen und durch das „Freistehen“ der Anlage optisch wesentlich stärker auffallen als gebäude- und dachintegrierte Solaranlagen. Die Sichtbarkeit von gebäudeintegrierten Solaranlagen kann je nach Orientierung und dem Sichtachsenstandpunkt zwischen dem Straßenraum und dem Dach oder den Fassaden sehr unterschiedlich ausfallen, von starker visueller „Veränderung“ bis zur „Unsichtbarkeit“.

„Fotovoltaikanlagen haben keinen Anschluss an Wahrnehmungsgewohnheiten, sie spiegeln und irisieren, doch liegen sie bei geringer Eigenhöhe mehr oder weniger horizontal in der Landschaft und gelangen nur hier und da ins Blickfeld. Meist befinden sie sich auf Dächern und anderen Bauten, so dass eine sinnvolle Mehrfachnutzung gegeben scheint“ (Deutscher Rat für Landespflege, 2006, S. 24).

Der Grad der visuellen Gebäude-, Ortsbild- oder Landschaftsveränderung durch Solaranlagen hängt über die Sichtbarkeit, wie im obigen Zitat beschrieben, stark vom Regelwerk und den einzuhaltenden Sichtbarkeitslinien und Mindestabständen ab, die bei der Genehmigung einer Solarenergieanlage angewandt werden (oder eben auch nicht). Die Beachtung solcher Sichtbeziehungen und Belichtungsverhältnisse kann jedenfalls zu den „Qualitätskriterien energieautarker Siedlungsstrukturen“ (Eckl, Ernst, Hörl et al., 2015, S. 103) gerechnet werden.

Nach dem Betriebsende können viele Bauteile der Solarenergieanlagen recycelt werden. Zusammenfassend sind die negativen Umweltauswirkungen des Betriebes von solarthermischen und photovoltaischen Anlagen als gering einzustufen (Kaltschmitt, Streicher und Wiese, 2006, S. 188–190). Mit Ausnahme der fix fassadenintegrierten Kollektoren sind die beschriebenen Anlagen weitgehend rückstandsfrei wieder demontierbar – dies erlaubt die Wiederherstellung des ursprünglichen Flächenzustandes.

3.6.13 Zusammenfassende Erkenntnisse zum Flächenbedarf von Solarenergieanlagen (m²/kWh/Jahr)

Die eingangs gestellte Forschungsfrage nach dem Flächenbedarf (m²/kWh/Jahr) ausgewählter erneuerbarer Energieträger (Windkraft, diverse Biomasse, Solarenergie, Geothermie) und den standörtlichen Energieertragsvarianzen kann durch Beispiele von Solarenergieanlagen gut beantwortet werden:

- Die gesamten Energiepotenzialflächen waren aus den Luftbildern der Anlagenbeispiele sehr gut messbar. Die gesamte horizontal belegte Fläche besteht häufig aus den Kollektoren plus den dazwischen liegenden Abstandsflächen.
- Die Datenqualität der Records ist häufig gut bis sehr gut, dokumentiert sind oft sowohl Leistungs- als auch Energiewerte der Anlagen.
- Es gibt mehrere Online-Tools (IET, 2017), mit denen Solarenergieertragswerte modelliert oder abgeschätzt werden können, wenn etwa nur die Leistung der Anlage, nicht aber deren Energieertrag bekannt ist. Die Ertragswerte zwischen mit Tools „simulierten“ generischen Energieertragswerten und den real gemessenen

Anlagenwerten sind häufig nahezu ident (Werteabweichungen maximal im kleinen einstelligen Prozentbereich).

Unter den mit „guter Datenqualität“ eingestuften Records bewegen sich die flächenspezifischen Energieerträge bei der Photovoltaik zwischen 65 und 170 kWh/m²/a, bei der Solarthermie zwischen 100 und 230 kWh/m²/a.

Aufgrund der geringen Nord-Süd-Ausdehnung Österreichs variieren die Erträge zwischen dem nördlichen Waldviertel und Südkärnten um nur 10 Prozent, dagegen zwischen den „Ertragsklassen“ laut PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System, ein Tool zur Ertragsprognose) zwischen Nordschottland und Nordafrika um 43 Prozent.

Innerhalb der Solarthermie- und Photovoltaik-Records zeigen Anlagen gleicher geografischer Lage, bei denen die Kollektoren vollflächig installiert sind (etwa bei Aufdachanlagen), pro Fläche und Jahr in etwa den doppelten Energieertrag als Anlagen mit fix aufgeständerten Kollektorenfeldern (egal ob im Freiland oder auf Flachdächern).

Die bisherigen zusammenfassenden Erkenntnisse beziehen sich auf Anlagenformen, die in der Praxis bereits häufig im Einsatz sind, also vor allem auf Vakuumkollektoren bei der Solarthermie und siliziumbasierte Kollektoren bei der Photovoltaik. Darüber hinaus gibt es aber weitere Möglichkeiten, zu denen keine oder zu wenig valide Records gefunden werden konnten – im Zuge künftiger Forschungen wären genauere Analysen zu folgenden Punkten lohnenswert, um Flächenbedarfe und flächenspezifische Energieerträge ermitteln zu können:

- Konzentratorsysteme (sie spiegeln die Solarenergie auf einen Brennpunkt oder sammeln sie in Parabolrinnen): Diese Bauform wurde in den Katalog-Records nur ansatzweise behandelt.
- Genauere Analysen zu photovoltaischen Anlagen mit Dünnschichtkollektoren: Diese haben zwar einen geringeren Energieumwandlungsgrad als siliziumbasierte Systeme, kosten aber pro Quadratmeter Kollektor erheblich weniger.
- Kombisysteme, die sowohl solarthermisch Wärme als auch photovoltaisch Elektrizität erzeugen.
- Großanlagen, die über ausreichende Speichermöglichkeiten (etwa Wassertanks, Soletanks, Stromspeicher etc.) verfügen, um Elektrizität und/oder Wärme über mehrere Tage oder auch saisonal ganzjährig zur Verfügung stellen zu können. Auch diese Speichermöglichkeiten benötigen zusätzliche Flächenbedarfe, die bei der Integration in bestehende oder neue Energiesysteme zu berücksichtigen wären.

3.7 Flächenbedarfe, Flächenkonkurrenzen und Umweltaspekte bei der Energiegewinnung aus Windkraft

Dieses Kapitel behandelt die Prozesskette der Energieumwandlung, Anlagenarten, lageabhängige und lageunabhängige Faktoren unterschiedlicher Energieerträge (Elektrizität) und im empirischen Teil Anlagenbeispiele verschiedener

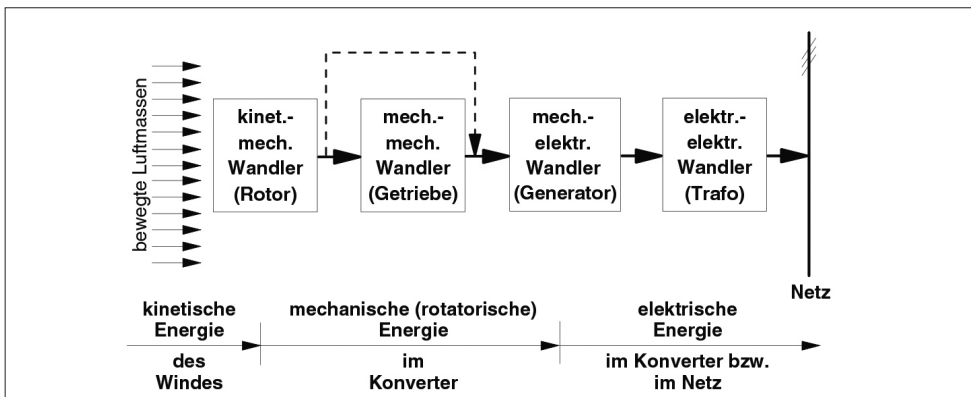
Windkraftensembles (Einzelanlagen, Reihen- und Clusterformation, Onshoring, Nearshoring oder Offshoring). Im Weiteren werden Flächenkonkurrenzen und Umweltwirkungen der Windkraft erörtert und abschließend reflektiert, welche Erkenntnisse zur Forschungsfrage nach dem Flächenbedarf dieser Art von Energieerzeugung (m²/kWh/a) möglich sind.

3.7.1 Prozesskette der Energieumwandlung und Nutzenergieformen bei Windkraft

Windkraftanlagen wandeln die kinetische Energie des Windes in einem Konverter (dem Windrad) in elektrische Energie um. Ebenso wie bei Solarenergie und Biomasse ist hierbei die primäre Energiequelle die Sonne, weil Wind aufgrund der Reibung zwischen Luftmassen verschiedener Temperatur entsteht. Die bei Weitem häufigste Nutzenergieform der Windkraft ist die Elektrizität, auch wenn es noch die historischen Nutzungen in Windmühlen und als Antrieb bei Segelschiffen gibt.

Windkraftrotoren nutzen das Auftriebsprinzip aus der Tragflügeltheorie bei der Umwandlung der Luftströmung in kinetische Energie über die Rotorblätter und die Rotorachse, die dann (mit oder ohne zwischengelagertem Getriebe) im Generator der Turbine nochmals in elektrische Energie umgewandelt wird, um anschließend in das Stromnetz eingespeist zu werden. Die folgende Abbildung 24 zeigt dazu die wesentlichen Prozessstufen zwischen Input (kinetische Energie) und Outout (Strom im Netz).

Abbildung 24: Umwandlungskette von Windkraftkonvertern



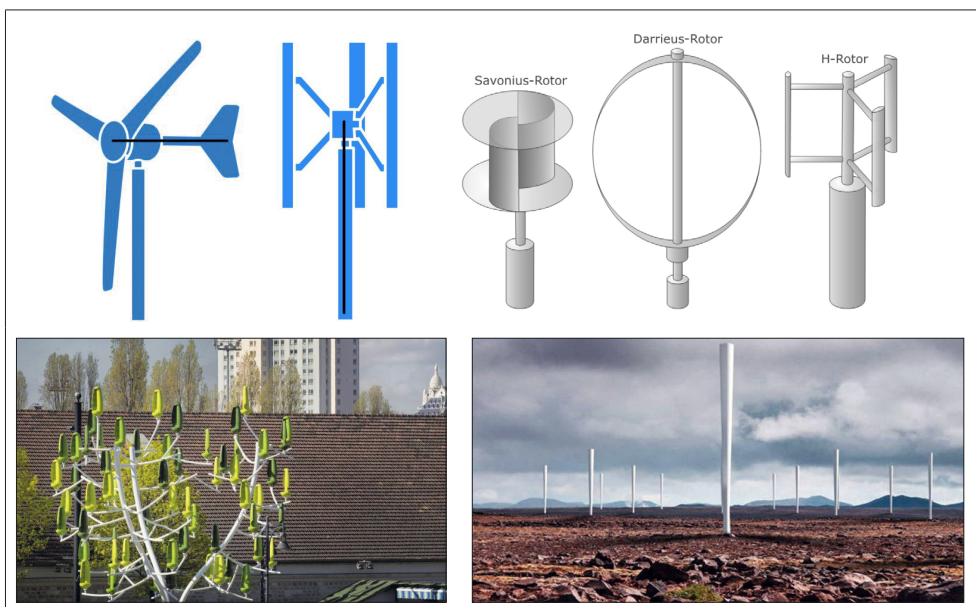
Quelle: Kaltschmitt, Streicher und Wiese (2006, S. 284–294)

3.7.2 Anlagenarten und Bauformen von Windkraftanlagen

Es existiert eine Vielzahl von Bauformen und -größen bei Windkraftanlagen. Die wichtigsten Unterscheidungsmerkmale sind die Anordnung der Achse (vertikal oder horizontal) sowie die Form und Anzahl der Rotorblätter. Weitere Unterschiede betreffen

technische Eigenschaften, wie etwa die Art der Netzkopplung und der Sturmsicherung (Kaltschmitt, Streicher und Wiese, 2006, S. 291 f). In leistungsstarken Windparks auf dem Festland und im Meer, aber auch bei einzelnen Windrädern kommen heutzutage fast ausschließlich nur noch getriebelose Horizontalachsen mit drei Rotorblättern, häufig mit im Mast oder in der Gondel integrierten Elektrizitätstransformationsanlagen, zum Einsatz, weil diese Bauweise am wartungsärmsten und daher im langjährigen Betrieb am wirtschaftlichsten ist. Alle Windkraftkonverter können sowohl als Einzelanlagen als auch in Reihen- oder Clusteranordnung (Windparks) betrieben werden. Neben dem hier beschriebenen häufigsten Bauweistyp gibt es aber auch noch eine Fülle von völlig neuartig konstruierten, wesentlich kleineren Anlagen (siehe Abbildung 25).

Abbildung 25: Windkraftkonverter in vier Bauweisen mit Vertikal- und Horizontalachsen



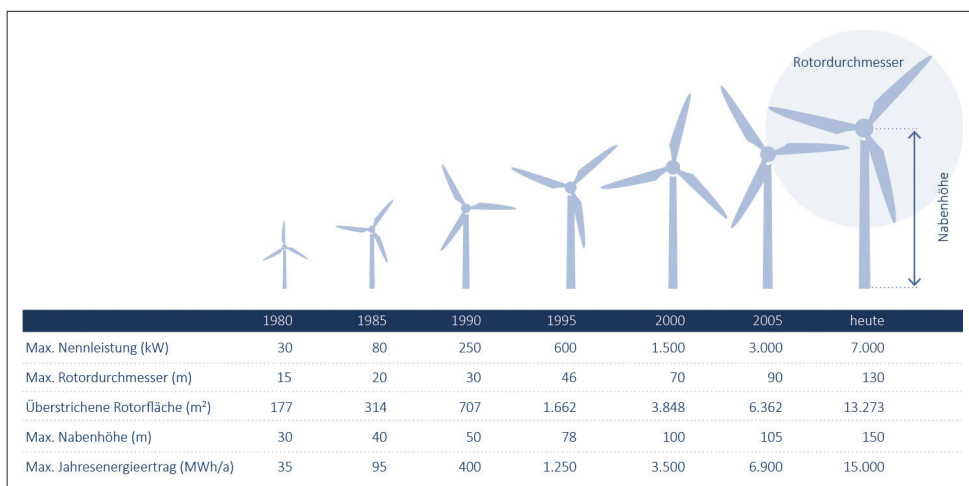
Quellen: oben links Jütteman (o.J.), oben rechts Quaschnig (2015, S. 288), unten links Michaud-Lavrière (2015), unten rechts Vortex Bladeless Company (2017)

Bei solchen einzelnen, kleinen Windkraftanlagen (oft nur wenige Meter hoch) gibt es drei Hauptbauformen: Savonius-, Darrieus- und H-Rotoren. Sie laufen bereits bei wesentlich geringeren Windgeschwindigkeiten an als große Horizontalachsen und können zusätzlich auch schnell wechselnde Windrichtungen effizienter in Elektrizität umsetzen als Großanlagen mit drei Rotorblättern. Dadurch sind sie für den Einsatz im bebauten Gebiet grundsätzlich geeignet, haben aber pro Anlage (und auch pro Fläche) sehr viel geringere Energieerträge als große Windräder. Ein Grund, warum sich bei den Windkraftmodellen im „Serienbetrieb“ die großen Horizontalachsen durchgesetzt haben, ist auch, dass in dieser Bauform die geringsten schwingungsdynamischen Probleme auftreten und daher weniger Materialermüdung als bei anderen Bauformen zu erwarten ist (Energie Burgenland, o. J.).

In der Fachliteratur ist keine eindeutige Grenze zwischen Groß- und Kleinwindenergieanlagen erkennbar: „Groß“ und „klein“ kann sich sowohl auf die äußere Größe der Rotorfläche oder die Masthöhe als auch auf die Leistungsstärke der Anlagen beziehen. Beispielsweise nennt Latzer (2013, S. 38) als obere Leistungsgrenze für Kleinwindenergieanlagen 100 kW, mit Abstufungen von 0 bis 5 kW („Mikrowindenergieanlagen“), 5 bis 30 kW („Miniwindenergieanlagen“) und 30 bis 100 kW (Mittelwindenergieanlagen).

In den letzten Jahrzehnten gab es in Windparks ein deutliches „Größenwachstum“, sowohl bezüglich der Nabenhöhen als auch der Rotordurchmesser. Die Bandbreite reicht bei den Nabenhöhen von 20 bis 150 Metern, bei der Leistung bei den seriell verfügbaren Modellen von 30 kW bis 7 MW (Stand 2016). Dagegen erreichen die vielfältigen anderen „kleinen“ Bauformen der Vertikalachser (s. o.) meist nur Bauhöhen bis maximal 20 Meter. Die folgende Abbildung 26 zeigt zusammenfassend den zeitlichen Verlauf bei der Höhen- und Leistungsentwicklung von Windkraftanlagen.

Abbildung 26: Höhen- und Leistungsklassen von Windenergieanlagen, 1980 bis heute



Quelle: Bundesverband WindEnergie (o. J.)

3.7.3 Beispiele für Windparkanlagen nach Lage und Typ

Tabelle 21 zeigt Beispiele existierender Windkraftanlagen und -parks aus dem Flächenbedarfskatalog. Sie sind nach der räumlichen Lagesituation (Ebene, Berg, Küste) und nach der Aufstellungsart (einzeln, in Reihe, in Clustern) sortiert. Die unter dem Punkt „Fläche“ genannten Werte beinhalten die versiegelten und unversiegelten Anteile der durch die Windkraftanlagen sicht- und messbar belegten Anteile, was der Summe aus direkten versiegelten Flächenbedarfen (Fundamentflächen, Wartungsflächen, Zufahrtswege) und den indirekten Flächenbedarfen der Abstandsflächen (egal ob es sich um Grünland oder andere Flächen handelt) zwischen den Windkraftanlagen

entspricht. In Kapitel 5.4 (Reflexion und Ausbaumöglichkeiten des Flächenbedarfskatalogs der Anlagen erneuerbarer Energieproduktion) werden ergänzend Anlagen nach ihrem Verhältnis zwischen diesen direkten Flächenbedarfen und der gesamten Energiepotenzialfläche veranschaulicht.

Tabelle 21: Windkraftanlagen nach Lage, Typ und Größe










Windkraft in der Ebene (Einzelanlagen, Cluster, Reihen)	
	<p>Name, Lage: Groß-Windräder Potzneusiedl, Burgenland, Österreich</p> <p>Untertyp: onshore, Einzelanlage, Ebene</p> <p>Info: 2 Stück 7,5 MW Enercon E126 (derzeit leistungsstärkstes serienmäßig verfügbares Einzelmodell einer Windkraftanlage weltweit). Im Foto links ist der Größenunterschied zu den benachbarten Anlagen mit geringerer Leistung gut erkennbar. Baujahr 2011. Größte Windräder Österreichs mit einer Nabenhöhe von 135 m, stehen an einer der „windkrafteinträglichsten“ Stellen in Österreich.</p> <p>Fläche (ha): 25</p> <p>Leistung (MW el): 15</p> <p>Energie (MWh el/a): 30.000</p>
	<p>Name, Lage: Windpark Neusiedl am See, Burgenland, Österreich</p> <p>Untertyp: onshore, Cluster, Ebene</p> <p>Info: 44 Windkraftanlagen mit je 1,5 oder 2 MW, Fertigstellung 2003. Nabenhöhe 100 m.</p> <p>Fläche (ha): 785</p> <p>Leistung (MW el): 79</p> <p>Energie (MWh el/a): 166.320</p>
	<p>Name, Lage: Windpark Hagenbrunn, Niederösterreich, Österreich</p> <p>Untertyp: onshore, Reihe, Ebene</p> <p>Info: 3 Windkraftanlagen mit je 0,64 MW Leistung zwischen dem Ort Hagenbrunn und der Bundesstraße 7, Standortdaten wenig bis mäßig turbulent, flacher Binnenlandstandort mit mittelmäßiger Bodenrauigkeit.</p> <p>Fläche (ha): 10,8</p> <p>Leistung (MW el/a): 1,92</p> <p>Energie (MWh el/a): 3.716</p>

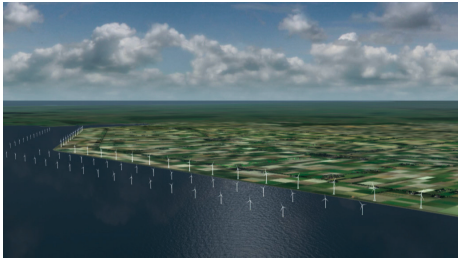
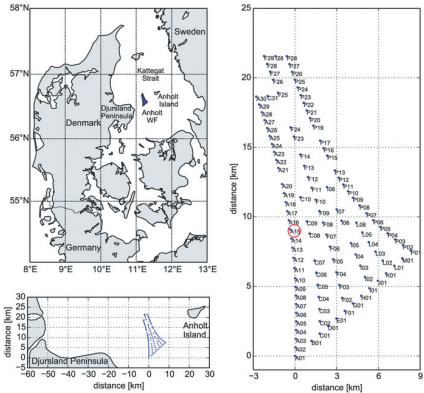

Foto: ImWind GmbH (2011)

Foto: Energie Burgenland AG (2003)

Foto: WEB Windenergie AG (2003)

Windkraft in der Ebene (Einzelanlagen, Cluster, Reihen)	
	<p>Name, Lage: Giessenwind, Südholland, Niederlande Untertyp: onshore, Reihe Info: 3 Windkraftanlagen mit je 3 MW Leistung neben einer Autobahn, Baujahr 2017. Fläche (ha): 12,7 Leistung (MW el/a): 9 Energie (MWh el/a): 16.077</p>
<p>Foto: Kwaliteits Atlas Groene Hart (2017)</p>	
	<p>Name, Lage: Windpark Gansu (Jiuquan Wind Power Base), am Rande der Wüste Gobi, China Untertyp: onshore, Cluster, Ebene Info: Größter und leistungsstärkster Windpark der Welt (Stand 2016), Baustart 2009. Die geplante Leistung für 2020 ist 20.000 MW (2016: 7.965 MW). Trotz fragwürdiger Daten- und Quellenlage (sowohl zu Größe, Leistung, Arbeit als auch zur Fläche) „eine Klasse für sich“. Fläche (ha): 106.731 Leistung (MW el): 7.965 Energie (MWh/a): 15.930.000</p>
<p>Foto: Insider Monkey (2010)</p>	
	<p>Name, Lage: Alta Wind Energy Center, Mojave-Wüste, Kalifornien, USA Untertyp: onshore, Cluster, Ebene Info: 600 Windkraftanlagen, Baujahr 2010. Fragwürdige Daten- und Quellenlage (sowohl zu Größe, Leistung, Arbeit als auch zur Fläche), lt. Datenquellen eventuell zweitstärkster Windpark der Welt. Fläche (ha): 44.100 Leistung (MW el): 1.547 Energie (MWh/a): 2.680.600</p>
<p>Foto: Z22 (2010)</p>	

Windkraft auf Berg- und Hügellandschaften (Reihe)	
 <p>Foto: EWS Consulting GmbH (2014)</p>	<p>Name, Lage: Windpark Munderfing, Oberösterreich, Österreich</p> <p>Untertyp: onshore, Reihe, Bergkamm</p> <p>Info: 5 Windkraftanlagen mit je 3 MW, Type: Vestas, V112, Baujahr 2014. Nabenhöhe 140 m, Rotordurchmesser 112 m.</p> <p>Fläche (ha): 150</p> <p>Leistung (MW el): 15</p> <p>Energie (MWh el/a): 15.000</p>
 <p>Foto: Mayer (2012)</p>	<p>Name, Lage: Tauernwindpark, Steiermark, Österreich</p> <p>Untertyp: onshore, Reihe, Bergkamm</p> <p>Info: 14 Windkraftanlagen, Seehöhe 1.900 m, höchstgelegener Windpark Österreichs. Mittlere jährliche Windgeschwindigkeit 7 m/s (entspricht in etwa einer Nordseeelage). Besonderheit: große PV-Freiflächenanlage am Fuße des Windparks.</p> <p>Fläche (ha): 52</p> <p>Leistung (MW el): 23</p> <p>Energie (MWh el/a): 48.000</p>
Windkraft an Küsten (nearshore, Reihen und Cluster)	
 <p>Foto: Danish Wind Industry Association (2000)</p>	<p>Name, Lage: Middelgrundens Offshore Wind Farm, Kopenhagen, Dänemark</p> <p>Untertyp: nearshore, Reihe</p> <p>Info: 20 Windkraftanlagen mit je 2 MW Leistung, Baujahr 2000. Nabenhöhe 64 m, Rotorendurchmesser 76 m. Besonderheit: „betonte“ Sichtbarkeit vom Stadtzentrum aus.</p> <p>Fläche (ha): 69</p> <p>Leistung (MW el): 40</p> <p>Energie (MWh el/a): 89.000</p>

Windkraft an Küsten (nearshore, Reihen und Cluster)	
 <p>Foto: Wind Minds International (2015)</p>	<p>Name, Lage: Windpark Noordoostpolder Binnen- und Buitendijk, Niederlande</p> <p>Untertyp: nearshore und offshore, Cluster</p> <p>Info: 42 Windkraftanlagen zu je 3 MW, 29 Windkraftanlagen zu je 7,5 MW. Besonderheit der Anordnung der Anlagen: Die leistungsstärkeren 7,5-MW-Offshore-Anlagen stehen hinter den leistungsschwächeren Nearshore-Anlagen, dadurch ergibt sich eine besondere visuelle Prägung der Küstenlinie.</p> <p>Fläche (ha): 5.700</p> <p>Leistung (MW el): 344</p> <p>Energie (MWh el/a): 937.800</p>
Windkraft (offshore, Cluster)	
 <p>Foto: Laan (2013)</p>	<p>Name, Lage: Anholt Offshore Wind Farm, Dänemark</p> <p>Untertyp: offshore, Cluster</p> <p>Info: 111 Windkraftanlagen SWT-3.6-120, Baujahr 2013, 20 km Entfernung zur dänischen Küste. Besonderheiten: einer der leistungsstärksten und größten Offshore-Windparks Europas, über 4.300 Volllaststunden.</p> <p>Fläche (ha): 14.700</p> <p>Leistung (MW el): 200</p> <p>Energie (MWh el/a): 1.722.000</p>
 <p>Foto: Bakken (2011)</p>	<p>Name, Lage: Offshore-Windpark London Array, Ostküste Englands (Kent), Vereinigtes Königreich</p> <p>Untertyp: offshore, Cluster</p> <p>Info: Leistungsstärkster Windpark Europas, Baujahr 2011, 175 Windkraftanlagen Siemens SWT-3.6-120.</p> <p>Fläche (ha): 24.700</p> <p>Leistung (MW el): 630</p> <p>Energie (MWh el/a): 2.500.000</p>

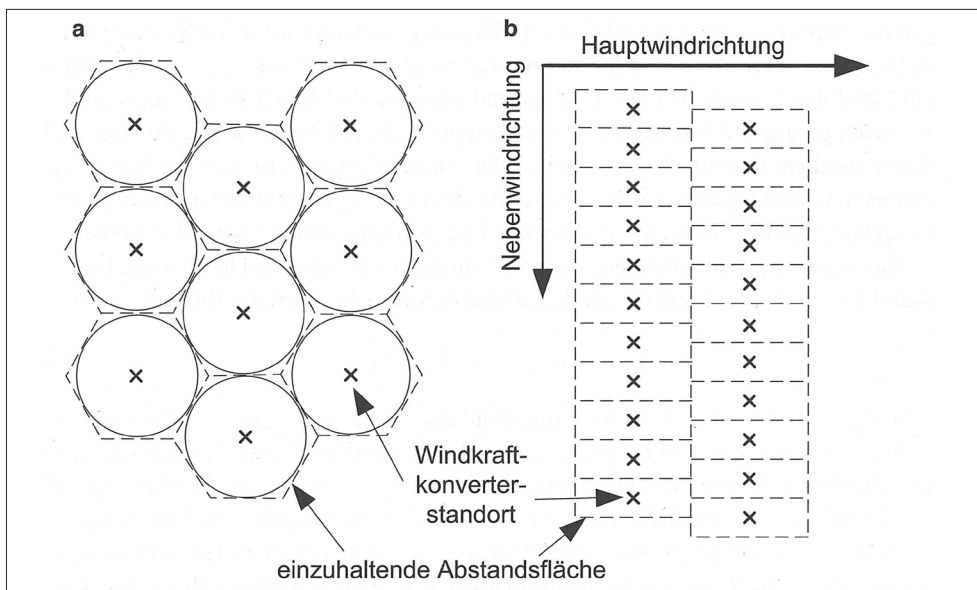
Quelle: eigene Darstellung

3.7.4 Lageunabhängige Ertragsunterschiede bei der Energiegewinnung durch Windkraft

Der Umwandlungsgrad der am Markt seriell erhältlichen, am weitesten verbreiteten Bauform von Windkraftanlagen (Horizontalachser, 3 Rotorblätter, Nabenhöhe 70 Meter oder mehr) zwischen der kinetischen Energie des Luftstromes und der elektrischen Energie, die die Windkraftanlage verlässt, beträgt 30 bis 45 Prozent (Kaltschmitt, Streicher und Wiese, 2006, S. 310). Die kleineren Vertikalläufer-Modelle liegen bei maximal 40 Prozent, haben aber gegenüber den größeren Bauformen auch Vorteile: bessere Eignung für turbulente Windverhältnisse, geringere Mindestwindgeschwindigkeit zum Anlaufen, geringere Lärmemissionen, einfache Wartung, bessere Raumverträglichkeit in dichter bebauten Siedlungsstrukturen und die eher kleine Fläche des Schattenwurfes (Amme, 2013, S. 13 ff; Jüttemann, o. J.).

Wenn große Windkraftanlagen in Reihen- oder Clusterform organisiert sind, hängt ihr lageunabhängiger Energieertrag davon ab, ob bzw. wie stark sie sich gegenseitig „verwindschatten“. Energieertragsspezifisch ist damit der Windschatten gemeint, den eine Anlage gegenüber ihrem „Nachbarwindrad“ verursacht. Die folgende Abbildung 27 zeigt dazu die geometrischen Regeln, die diese Abstände mit und ohne Hauptwindrichtung beeinflussen: Gibt es eine Hauptwindrichtung, können die Windkraftanlagen erheblich dichter aufgestellt werden, als wenn dies nicht der Fall ist – dann müssen die Abstände in allen Richtungen gleich sein.

Abbildung 27: Abstandsregeln für Windparks mit (a) und ohne Hauptwindrichtung (b)



Quelle: Kaltschmitt, Streicher und Wiese (2014, S. 531)

3.7.5 Lageabhängige Ertragsunterschiede bei der Windenergiegewinnung

Die wichtigsten lageabhängigen Energieertragsunterschiede einer Windkraftanlage ergeben sich aus der Windstärke (m/s) und den Windhäufigkeitszeiten (h/a bestimmter Windstärken) je Standort. Rechnerische Volllaststunden ergeben sich aus dem Jahresenergieertrag dividiert durch die Leistung einer Windkraftanlage. Dazu ein einfaches Rechenbeispiel: Energie 2.000 (MWh/a), geteilt durch die Leistung einer Windkraftanlage 2 (MW) ergibt 1.000 Volllaststunden (h/a). Trotzdem sagen die rechnerischen Volllaststunden wenig darüber aus, wie oft und wie stark der Windeintrag lokal tatsächlich erfolgt, dafür braucht es genauere Messprotokolle über längere Beobachtungszeiträume.

Lageabhängig ist auch die maximale Abnahmekapazität des an einen Windpark angeschlossenen Stromnetzes. Nicht immer, insbesondere bei plötzlich einsetzenden Starkwind- und Sturmphasen, sind die lokalen 380-Kilovolt-Stromnetzknotten in der Lage, in Echtzeit die sprunghaft ansteigenden Elektrizitätsmengen ohne Überlast zu transportieren – die Folge kann ein lokaler oder regionaler Leitungsblackout sein. Viele Windparks verfügen für solche Fälle über automatische Abschaltautomatiken.

Ein weiterer lageabhängiger Ertragsunterschied ergibt sich aus der Seehöhe, auf der eine Windkraftanlage steht. Mit zunehmender Höhe nimmt auch die durchschnittliche Windgeschwindigkeit über Grund und somit der Energieertrag einer Windkraftanlage zu. Ebenso wie die Seehöhe bestimmt das Relief bzw. die „Rauigkeit“ des Geländes die Windturbulenzen: „Rau“ wird das Gelände durch Gebäude, Pflanzen, Berge und Hügel. Ein idealer Windkraftstandort steht möglichst außerhalb dieser Turbulenzgebiete. Quaschnig (2015, S. 260 f) spricht von mindestens der dreifachen Höhe des Hindernisses als empfohlene Nabenhöhe eines Windrades bzw. bis zur 35-fachen Höhe des Objektes als Horizontalabstand.

Auch die Siedlungsstruktur selbst hat, ähnlich zur Rauigkeit des Geländes, viel mit den Ertragsunterschieden zu tun, weil je nach den lokal gültigen gesetzlichen Auflagen unterschiedliche (meist radial um Siedlungsgebiete gezogene) Mindestabstände einzuhalten sind, die die nutzbaren Potenzialflächen definieren und limitieren. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick zu den sehr unterschiedlichen Windkraftregeln der österreichischen Bundesländer. Das Reglement ist nicht nur bezüglich der Mindesthorizontalabstände (von „keine Regelung“ bis „1.200 m“) sehr unterschiedlich, sondern variiert auch stark nach anderen Faktoren wie der Leistungsklasse der Windkraftanlage oder der jeweils für Windkraftnutzung erlaubten Widmungsart.

Das Burgenland hat als Besonderheit eine rechtlich verbindliche Positivzonierungsart, die Eignungszonen. Insgesamt korreliert die Regelungstiefe deutlich mit dem je Bundesland umgesetzten Windkraftpotenzial je Bundesland (s. dazu nächstes Kapitel 3.7.6 Räumlich bedingte Potenzialunterschiede bei der Energiegewinnung durch Windkraft in Österreich). Wie groß diese Unterschiede in den Reglements sind, fasst folgende Tabelle 22 zusammen.

Tabelle 22: Rechtsgrundlagen, Widmungsarten und Abstandsregelungen zu Windkraftanlagen in den österreichischen Bundesländern

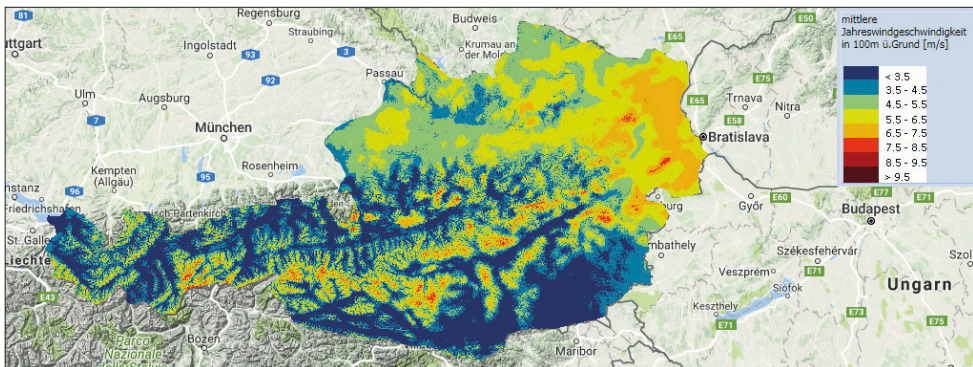
Bundesland	Rechtsgrundlage	Widmung	Abstandsregelungen
Niederösterreich	§19 Abs2 Z19 ROG, §19 Abs 3a ROG	Grünland-Windkraftanlage	1.200 m zu gewidmetem Wohnbauland und Bauland-Sondergebiet mit erhöhtem Schutzanspruch, z.B. Krankenhaus, Schule, Altersheim. 750 m zu landwirtschaftlichen Wohngebäuden und erhaltenen Gebäuden im Grünland, in Grünland-Kleingärten und Grünland-Campingplätzen. 2.000 m zu gewidmetem Wohnbauland, welches nicht in der Standortgemeinde liegt. Mit Zustimmung der betroffenen Nachbargemeinde(n) kann der Mindestabstand von 2.000 auf bis zu 1.200 m reduziert werden.
Oberösterreich	§30 Abs4 ROG; §12 Abs2 OÖEiWOG	Sonderwidmung Grünland	Mindestabstand zu überwiegend für Wohnzwecke genutzten Gebäuden im Grünland, zu gewidmetem Bauland, zu Flächen, die als künftiger Baulandbedarf festgelegt sind (neu mit dem Windmasterplan ab Herbst 2017): – bis zu 30 kW: 100 m – 30 kW bis 0,5 MW: 500 m – über 0,5 MW: 800 m
Burgenland	Burgenländisches Raumplanungsgesetz; Bgld. Planzeichenverordnung	Grünfläche- Windkraftanlage (§ 13 und § 16 Abs 2 RplG)	1.500 m zum Siedlungsgebiet. Ausgewiesene Eignungszonen: regionales Raumordnungskonzept, das von der Landesregierung beschlossen wurde und auf welches sich Fachdienststellen des Landes im Verfahren beziehen.
Steiermark	§25 ROG, § 26 Abs 7, §32 Abs 3 Z 1 ROG	Freiland mit Sondernutzung Energieerzeugungsanlagen	Keine rechtlichen Regelungen zu Mindestabständen
Kärnten	§5 Abs6 Kärntner Windkraftstandorträumerverordnung	Sonderwidmung Grünland §5 GplG oder Sonderwidmung Bauland §3 Abs10	1.500 m zu ständig bewohnten Gebäuden und zu gewidmetem Bauland. Dieser Abstand ist reduzierbar, wenn „unzumutbare Belastungen von ständig bewohnten Gebäuden“ vermieden werden können.
Tirol, Vorarlberg, Salzburg			Keine rechtlichen Regelungen zu Mindestabständen
Internationaler Vergleich			In Europa stehen Windräder zumeist viel näher bei Häusern als dies in Österreich der Fall ist. Mindestabstände zu Wohnhäusern gibt es nur in den seltensten Fällen. Im Schnitt werden Windräder in Deutschland mit einem Abstand zwischen 500 und 800 Metern errichtet. Die oft zitierte Regelung in Bayern (10-H-Regelung = 10 * die Höhe der Windräder) wurde zur Beschränkung des Windkraftausbaus eingeführt, hat keine inhaltliche Grundlage und gilt nur für die Standortgemeinde. An Wohnhäuser der Nachbargemeinde kann ohne Mindestabstand herangebaut werden. In Großbritannien stehen moderne Windräder in einem Abstand von 300 Metern. Immer wieder behauptete Mindestabstände von 3.000 Metern gibt es in keinem Staat der Welt.

Quelle: Interessengemeinschaft Windkraft Österreich (2015)

3.7.6 Räumlich bedingte Potenzialunterschiede bei der Energiegewinnung durch Windkraft in Österreich

Die im vorigen Kapitel beschriebenen Topografieunterschiede sind eindeutig an der räumlichen Ost-West-Verteilung der existierenden Windkraftanlagen erkennbar. Die folgende Karte 9 zeigt sehr deutlich, warum die flächenmäßig größten und zugleich leistungsstärksten Windparks fast nur im Nordburgenland und im östlichen Niederösterreich stehen: Dort sind die „windstärksten“ Regionen Österreichs.

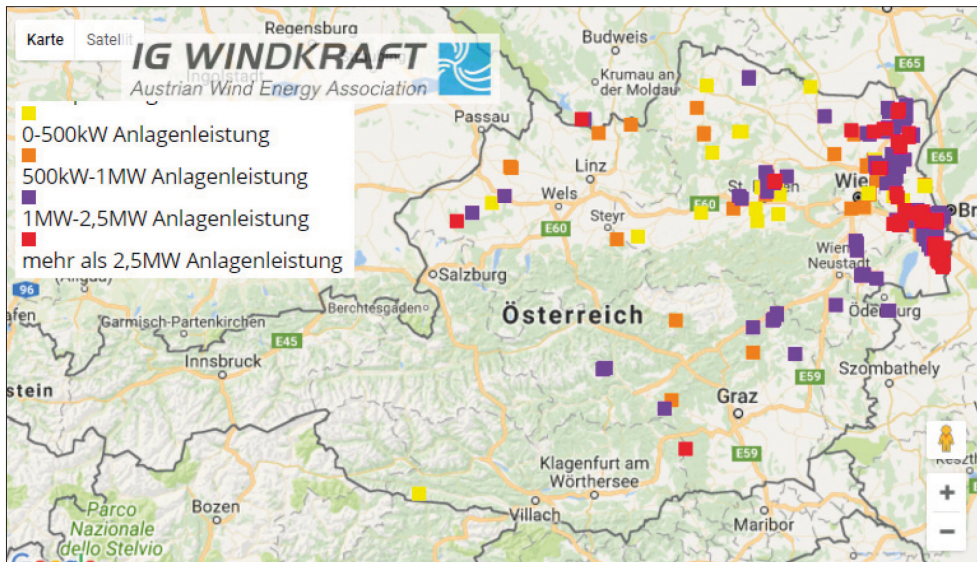
Karte 9: Mittlere Jahreswindgeschwindigkeit in Metern pro Sekunde, 100 Meter über Grund, Österreich, 2011



Quelle: Energiewerkstatt, RSA – Studio iSPACE, Meteotest und Wegener Center (2011)

Die folgende Karte 10 zeigt ergänzend, dass die Lagen der Windparks mit vielen Windkraftanlagen der höchsten Leistungsklassen noch stärker konzentriert sind als die „windstarken“ Regionen selbst.

Karte 10: Windkraftanlagen in Österreich 2017



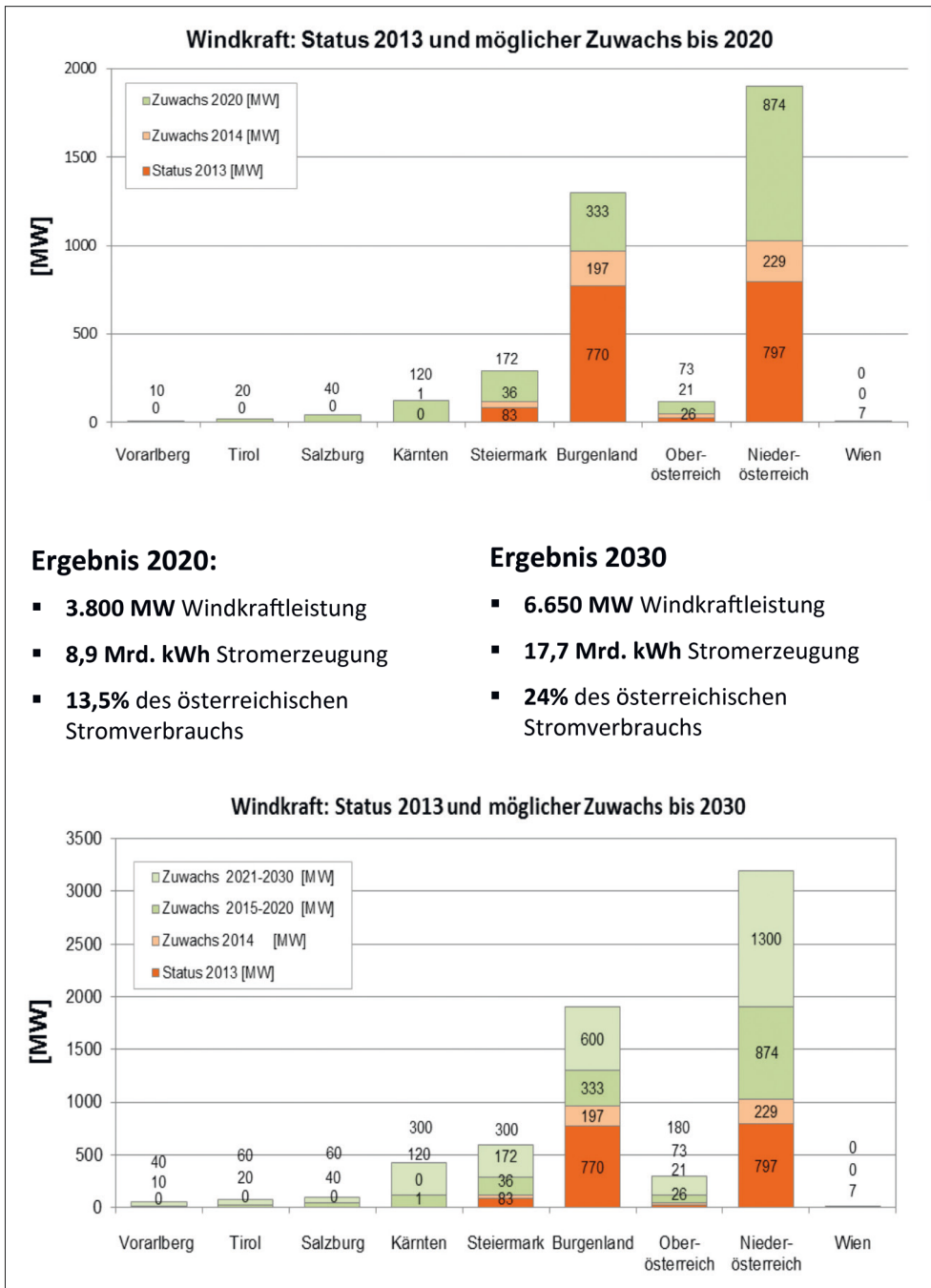
Quelle: IG Windkraft Österreich (2017b)

Für die Größe des künftig zusätzlich nutz- und realisierbaren Windkraftpotenzials werden die beschriebenen Lageunterschiede der Windstärken und -häufigkeiten ebenso eine Rolle spielen wie die unterschiedlichen gesetzlichen und konzeptionellen Steuerungsansätze der Bundesländer. Zusätzliche Potenziale können sowohl über zusätzliche Windkraftanlagen als auch über das „Repowering“ gelingen. Repowering bedeutet das Ersetzen alter, leistungsschwacher Windkraftanlagen durch neuere, leistungsstärkere. Hierbei wäre es sogar möglich, einzelne Windkraftanlagen abzubauen und andernorts (möglicherweise auch in windtragsreicherer Lage) wieder zu Parks zusammenzufassen, mit dem Resultat eines veränderten Landschaftsbildes: weniger Windkraftstandorte, diese aber in leistungsstärkeren Parks als zuvor zusammengefasst. Die Windkraftsteuerungsansätze sind damit ein sehr interessantes Beispiel für den sogenannten „energy sprawl“. Unter diesem Schlagwort wird sehr kontrovers diskutiert, welche Anlagenensembles (insbesondere in regionalen Energieszenarien) welchen Flächenbedarf verursachen, weil sowohl große, leistungsstarke Anlagen als auch kleinere, dezentrale Potenziale genutzt werden können und müssen. Moroni, Antonucci und Bisello (2016) haben dazu argumentiert, dass Szenarien erneuerbarer Energien auf regionaler Ebene nicht automatisch die „Energieanlagenzersiedlung“ fördern, dass aber, um diesen Effekt zu vermeiden, sehr sorgfältig modellierte und geplante polyzentrische Energieszenarien benötigt werden. Polyzentrisch bedeutet hierbei nicht – wie früher – wenige, sehr leistungsstarke Kraftwerke einzusetzen, sondern eher einen „intelligenten Schwarm“, der mehr als ein Zentrum hat. Bronin (2012) hat dazu aber ergänzt, dass eine weitere Optimierung in der netzlogistisch sehr schwierigen Aufgabe bestünde, Produktions- und Abnahmepotenziale der Energie trotz der Polyzentrik perfekt aneinander anzupassen.

Beim zusätzlich realisierbaren Windkraftpotenzial kommen verschiedene Studien aufgrund der sehr vielfältigen Modellierungsmöglichkeiten zu unterschiedlichen Prognosen, die aber in derselben Energieertragsdimension liegen und auch bei den aus Windkraft gewinnbaren Strommengen je Bundesland zu ähnlichen Schlüssen gelangen: Bedeutende zusätzliche Potenziale werden vor allem in den Bundesländern Burgenland und Niederösterreich gesehen, bei heute bereits deutlich höherem realisierten Potenzial (Ausbaugrad) im Burgenland.

Als Beispiel dazu illustrieren zwei Szenarienergebnisse, wie die Leistungsveränderung und die Potenziallagen räumlich und zeitlich eingeschätzt werden. Abbildung 28 zeigt eine Potenzialabschätzung rein nach dem Leistungszubau, Karte 11 die räumliche Konzentration dieser Gebiete.

Abbildung 28: Leistungsszenarien der österreichischen Windkraft 2020 und 2030



Quelle: Winkelmeier, Krenn und Zimmer (2014, S. 20)

3.7.7 Flächenbedarfe bei Windenergiegewinnung

Der Flächenbedarf von Windparks besteht aus unterschiedlichen Anteilen. Gemessen an der gesamten horizontalen Flächenbelegung machen die horizontal versiegelten Flächen nur einen sehr kleinen Teil des gesamten horizontalen Flächenbedarfs aus. Zu diesen versiegelten Flächen gehören die Mastfundamente, die Zufahrtswege, Gebäude und Anlagen der Transformatoren, Wartungsflächen neben den Masten, die mit einem Kran (bei Wartungs- und Reparaturnotwendigkeiten) befahrbar sein müssen. Zwischen den Windkraftanlagen liegen die sogenannten „Abstandsflächen“, die sehr häufig land- oder forstwirtschaftlich genutzt werden und dabei nicht nur der Nahrungsmittelproduktion dienen, sondern auch andere wichtige Lebensraum- und Ökologiefunktionen sichern (s. dazu Kapitel 3.7.12 Umweltwirkungen von Energiegewinnung durch Windkraft).

Die folgende Abbildung 29 zeigt dazu die beiden einzigen 7,5-MW-Windkraftanlagen in Österreich (Stand 2016) im Detail- und Übersichtsmaßstab. Im Zoom sind die erwähnten versiegelten Fundament- und Wartungsflächen gut erkennbar, umliegend zeigt sich der wesentlich größere Windpark-Cluster. Die Sockel- und Wartungsfläche (inklusive der Fundamente) beträgt hier etwa 500 Quadratmeter pro Windrad, bei kleineren Leistungsklassen finden sich in der Fachliteratur nur Durchschnittswerte für den Flächenbedarf der Betonfundamente: 100 bis 2.000 Quadratmeter bei einer Anlage mit 1,5 MW Leistung (Kaltschmitt, Streicher und Wiese, 2014, S. 539).

Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal beim Flächenbedarf ist, ob es eine Hauptwindrichtung gibt oder nicht, wie bereits in Abbildung 27 (Abstandsregeln für Windparks mit und ohne Hauptwindrichtung) erklärt. Je nach Standort in der Landschaft brauchen Windparks in einer Lage mit Hauptwindrichtung (z. B. an Küsten), pro Energieertragsmenge und Jahr erheblich weniger Fläche als Windparks in Lagen mit häufiger wechselnden Hauptwindrichtungen (z. B. im Binnenland in der Ebene), weil sie ohne gegenseitige Verwindschattung, die energieertragsmindernd wäre, „dichter“ gestellt werden können als in einem Clusterensemble ohne Hauptwindrichtung.

Der Flächenbedarf pro Energieertragsmenge korreliert auch direkt zur mittleren Durchschnittswindgeschwindigkeit und den lokalen Jahresvolllaststunden der Turbine. Burgenländische Windparks kommen auf etwa 1.500 bis 2.000 Volllaststunden, in dänischen, skandinavischen, deutschen und britischen Offshore-Windparks gibt es bis zu 4.300 Volllaststunden, solche und andere Unterschiede werden im folgenden Kapitel 3.7.8 (Beispiele für Solarenergieanlagen nach Flächenertrag der Energieproduktion) erläutert.

Windparks belegen aber nicht nur horizontale, sondern durch den Rotordurchmesser auch große vertikale Flächen. Diese vertikalen Flächenbelegungen wurden im Katalog der erneuerbaren Energieanlagen nicht erfasst, sind aber für die visuelle Veränderung des Landschaftsbildes überaus relevant.

Bei Vertikalachsen ist der Energieertrag, unabhängig von der Windstärke und Häufigkeit, auch proportional zum Quadrat der vertikalen Kreisfläche des Rotors. Bei gleichem Energieertrag bedeutet das, dass sehr leistungsstarke Windkraftanlagen (> 3,5 MW Leistung) im Clusterensemble pro Energieertragsmenge und Jahr weniger horizontale

Fläche benötigen als Windkraftanlagen kleinerer Leistungsklassen. Andererseits ist ihr visueller Impact durch die deutlich höheren Masten vertikal stärker als bei den Windkraftanlagen geringerer Leistung: Windkraftanlagen der 7,5-MW-Klasse haben Masthöhen von bis zu 130 statt 75 Metern wie bei Windkraftanlagen mit 2 bis 3 MW Leistung.

Abbildung 29: Detail- und Übersichtskarte der beiden leistungsstärksten Windkraftanlagen Österreichs in Potzneusiedl, Burgenland



Quellen: Satelliten- und Situationskarten (Google, 2016), Geodaten der Windkraftanlagen (IG Windkraft Österreich, 2017a), eigene Darstellung (Verortung und Klassifizierung der Windkraftanlagen-Punkte)

3.7.8 Beispiele für Windkraftanlagen (nach Flächenertrag der Energieproduktion)

Die folgende Tabelle 23 zeigt Zahlenwerte zu den hier genannten Flächenbedarfen und den jeweiligen Energieerträgen verschiedener Windparks aus dem Katalog der Flächenbedarfe von Anlagen erneuerbarer Energieproduktion. Die Records sind absteigend nach dem Energieertrag pro Fläche sortiert. Die in der Spalte „Fläche“ genannten Werte beinhalten die versiegelten und unversiegelten Anteile der durch die Windkraftanlagen sicht- und messbar belegten Anteile, was der Summe aus direkten versiegelten Flächenbedarfen (Fundamentflächen, Wartungsflächen, Zufahrtswege) und den indirekten Flächenbedarfen der Abstandsflächen zwischen den Windkraftanlagen (egal ob es sich um Grünland oder andere Flächen handelt) entspricht. In Kapitel 5.4 (Reflexion und Ausbaumöglichkeiten des Flächenbedarfskatalogs der Anlagen erneuerbarer Energieproduktion) werden ergänzend Anlagen nach ihrem Verhältnis zwischen diesen direkten Flächenbedarfen und der Gesamtgröße der Potenzialertragsfläche veranschaulicht.

Tabelle 23: Beispiele für Windkraftanlagen nach dem Flächenenertrag der Energieproduktion

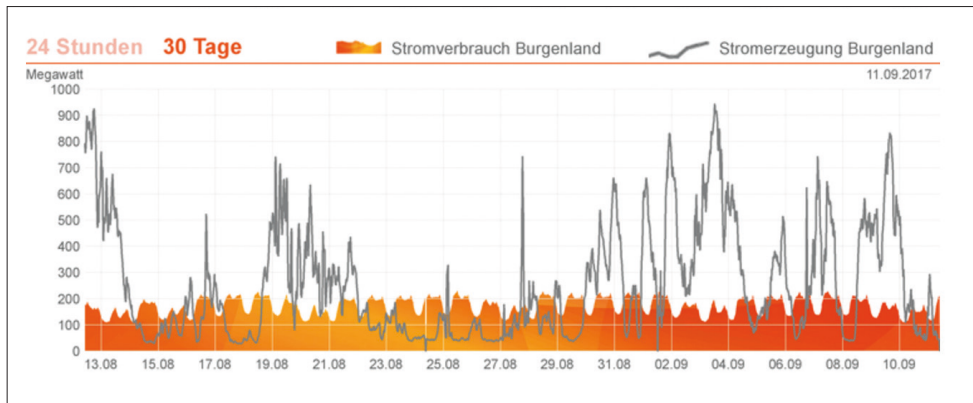
Name, Lage	Typ	Untertyp	Datenqualität	Fläche (ha)	Leistung (MW el)	Energie (Mwh el/a)	m ² /kWh el/a	kWh el/m ² /a	Rechnerische Volllaststunden (h/a)
Middelgrunden Offshore Wind Farm, Kopenhagen, Dänemark	Windkraft	Nearshore, Reihe	gut	69	40	89.000	0,00775	129	2.225
Giessenwind, Südholland, Niederlande	Windkraft	Onshore, Reihe, an Autobahn	gut	13	9	16.077	0,0079	127	1.786
Großwindräder Potzneusiedl, Burgenland, Österreich	Windkraft	Onshore, Einzelanlage, Ebene	gut	25	15	30.000	0,00833	120	2.000
Tauernwindpark, Steiermark, Österreich	Windkraft	Onshore, Reihe, Bergkamm	gut	65	23	48.000	0,01354	74	2.110
Windpark Hagenbrunn, Niederösterreich, Österreich	Windkraft	Onshore, Reihe, Ebene	gut	10,8	1,92	3.716	0,02906	34	1.935
Windpark Neusiedl am See, Burgenland, Österreich	Windkraft	Onshore, Cluster, Ebene	gut	785	79	166.320	0,0472	21	2.105
Windpark Noordooispolder Binnen- und Buitendijk, Niederlande	Windkraft	Nearshore und offshore, Cluster	gut	5.700	344	937.800	0,06078	16	2.730
Windpark Gansu (Jiuquan Wind Power Base), Wüste Gobi, China	Windkraft	Onshore, Cluster, Ebene	fragwürdig (Große, Ertrag)	106.731	7.965	15.930.000	0,067	15	2.000
Anholt Offshore Wind Farm, Dänemark	Windkraft	Offshore, Cluster	gut	14.700	400	1.722.000	0,08537	12	4.305
Offshore-Windpark London Array, Ostküste Englands (Kent), Vereinigtes Königreich	Windkraft	Offshore, Cluster	gut	24.700	630	2.500.000	0,0988	10	3.968
Windpark Munderfing, Oberösterreich	Windkraft	Onshore, Reihe, Bergkamm	gut	150	15	15.000	0,1	10	1.000
Alta Wind Energy Center, Mojave-Wüste, Kalifornien, USA	Windkraft	Onshore, Cluster, Ebene	fragwürdig (Große, Ertrag)	44.100	1.547	2.680.600	0,1645	6	1.733

Quelle: eigene Darstellung

3.7.9 Regelenergiefähigkeit von Windenergie und ihre Eignung zur Grundlast -und Spitzenversorgung

Wie die Solarenergie gehört auch die Windkraft zu den „schwer planbaren“ erneuerbaren Energieträgern, weil Windstärken und deren Häufigkeiten je nach Lage zwar aus Messungen und Ertragsmodellen ungefähr bekannt sind, sich aber schnell und deutlich ändern können. Dies stellt für die angeschlossenen Stromnetzschaltungen eine logistisch schwierige Aufgabe dar. Die folgende Abbildung 30 zeigt dazu die großen Unterschiede und zeitlichen Schwankungen zwischen der Stromerzeugung und der Stromnachfrage am Beispiel des Burgenlandes. Der Zeitraum, in dem die Messungen vorgenommen wurden, war Mitte August bis Mitte September 2017. Als Besonderheit unter den österreichischen Bundesländern gilt dabei, dass im Burgenland in der Jahresbilanz allein aus Windkraft bereits heute deutlich mehr Strom erzeugt als verbraucht wird.

Abbildung 30: Stromverbrauch und -erzeugung im Burgenland



Quelle: Energie Burgenland Gruppe (2017)

Die Grafik in Abbildung 30 lässt keine trennscharfen Rückschlüsse auf die Zusammensetzung der Elektrizitätsproduktion zu, es kann aber mit Sicherheit davon ausgegangen werden, dass die eher kurzen, teilweise bis zum Zehnfachen über der Stromnachfrage liegenden Produktionsüberschüsse zu sehr großen Anteilen aus den sehr leistungsstarken burgenländischen Windparks stammen. Auch ist in der Abbildung gut erkennbar, dass die Mindestgrundlast der Nachfrage (etwa 100 MW elektrische Dauerleistung) trotz der zeitweiligen Überschüsse nicht immer ausschließlich aus burgenländischen Anlagen bedient werden kann.

Angesichts dieser starken Unterschiede zwischen Nachfragelast und Erzeugung der Elektrizität ist auch klar ersichtlich, wie wichtig die Verteilung und Speicherung von Elektrizität aus Windkraft im Gesamtnetz ist: Es soll natürlich möglichst viel der erneuerbaren Energie auch „in Echtzeit“ genutzt werden können. Österreich hat dabei im Vergleich zu anderen Ländern in Europa grundsätzlich sehr gute Voraussetzungen,

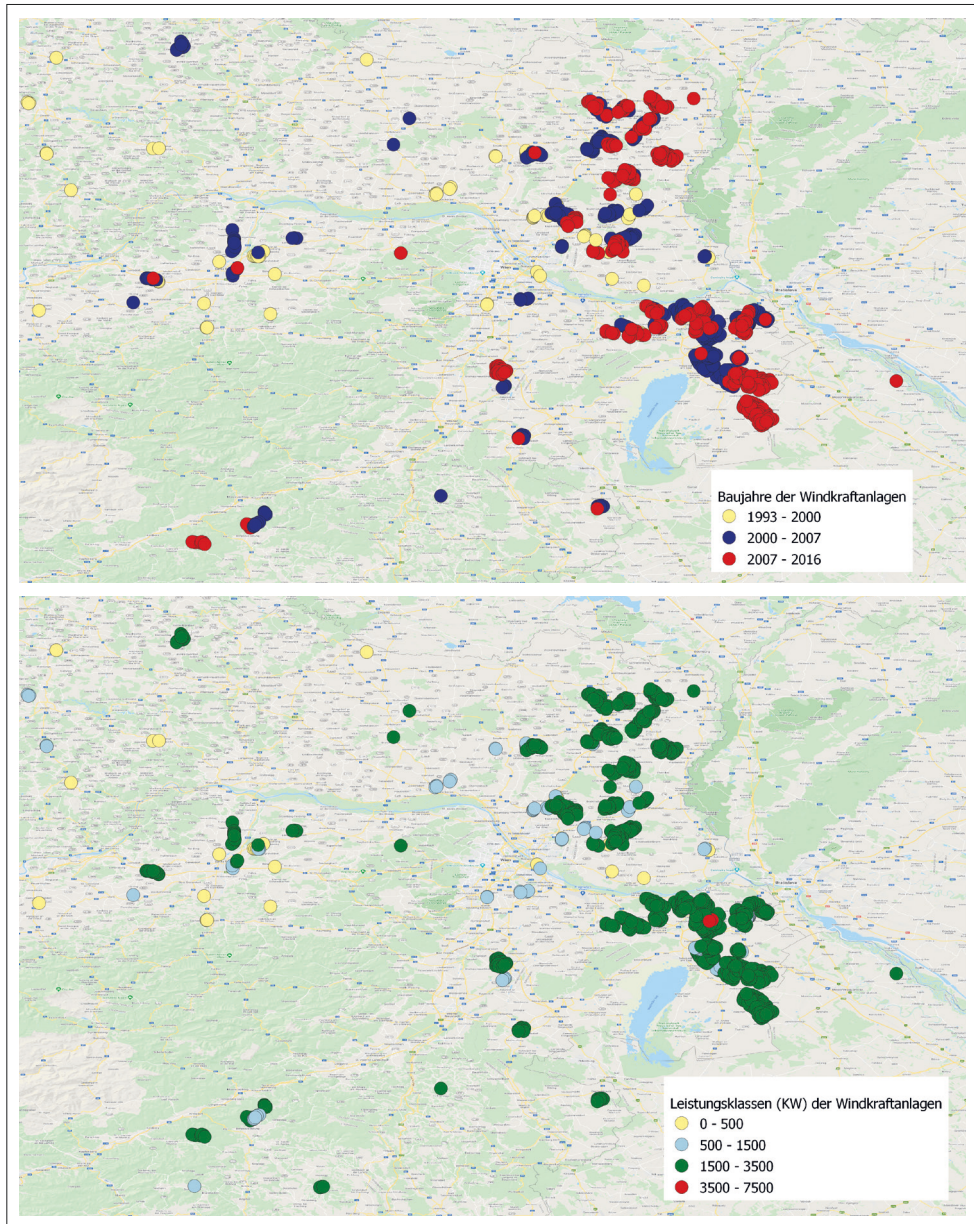
weil große Pumpspeicherwasserkraftwerke außerhalb der drei Tagesspitzenzeiten der Stromnachfrage (morgens, mittags, abends) Elektrizität aufnehmen und als Regelenergie sehr genau entlang der zeitlichen Nachfrage auch wieder abgeben können.

Die Eignung der Windkraft zur Grund- und Spitzenlastversorgung hängt somit ganz maßgeblich von den Stromnetzfähigkeiten zur Verteilung und der Menge und Leistung von Speicherkraftwerken ab. Eine Ausnahme davon stellen nur kleine Inselwindkraftanlagen dar, die (bei sehr entlegenen Gebieten) gar keine Stromnetz-koppelung haben. Hier wäre die maximale elektrische Grundlastnachfrage zwecks optimaler, verlustfreier und ständiger lokaler Ausnutzung der Elektrizität aus Windkraft stets etwas höher als die maximale Nennlastwindkraftproduktion (Latzner, 2013, S. 31).

3.7.10 Skalierbarkeit der Energieleistung und -arbeit von Windenergieanlagen

Wie in Kapitel 3.7.2 zu Arten und Bauformen von Windenergieanlagen beschrieben, sind bei Windkraftanlagen technisch nahezu sämtliche Leistungs- und Größenklassen herstellbar, egal ob es sich um „große“ oder „kleine“ Anlagen handelt. Im österreichischen seriellen Standardanlagenbetrieb der Horizontalachser mit Drei-Blatt-Rotor gibt es aber nur wenige häufig vorkommende Leistungsklassen. Die Darstellungen in Karte 12 zeigen, dass die österreichische Windkraft zwischen 1993 und 2000 zunächst im nördlichen Ober- und Niederösterreich ausgebaut wurde, damals vor allem mit einzelnen Windrädern (also noch nicht in Clustern) der Leistungsklassen bis 500 KW. Ab dem Jahr 2000 folgten die ersten größeren Windparks, bereits deutlich öfters in Clustern und mit deutlich leistungsstärkeren und zahlreicheren Windkraftanlagen der Leistungsklassen zwischen 1.000 und 2.000 MW. Ab 2007 folgten nochmals leistungsstärkere Ausbaustufen, sowohl was die Einzelleistungen der Windkraftanlagenmodelle als auch die Energieerträge ganzer Windparks angeht, räumlich nochmals näher an der Grenze Österreichs zu der Slowakei und Ungarn konzentriert.

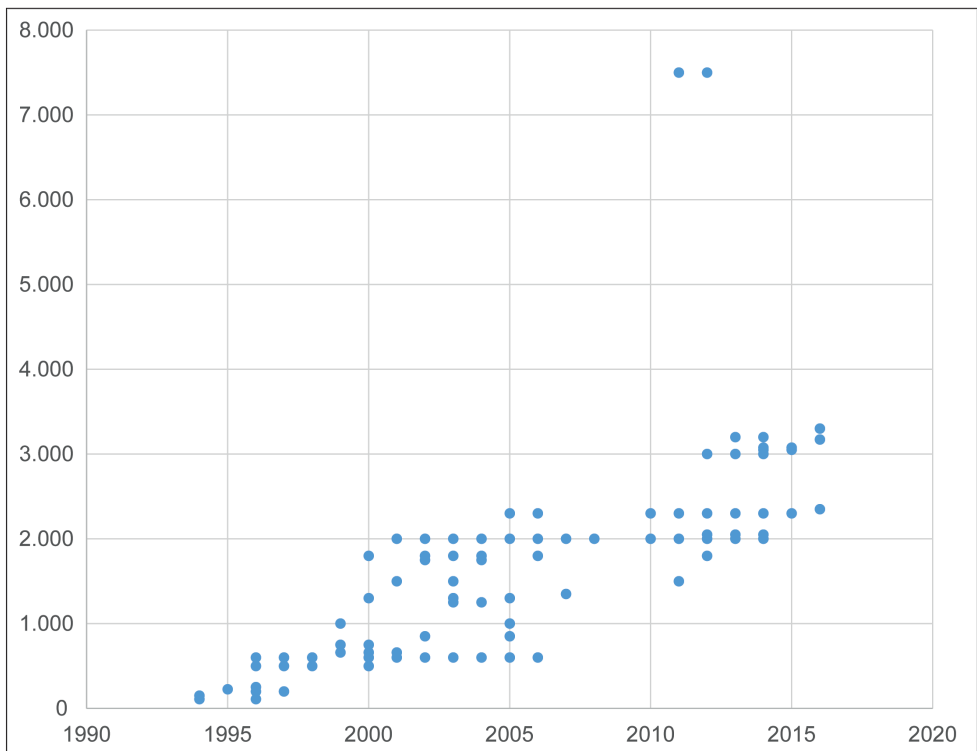
Karte 12: Alters- und Leistungsklassen österreichischer Windkraftanlagen (1993–2016) und deren Lagen



Quellen: Satelliten- und Situationskarten (Google, 2016), Geodaten der Windkraftanlagen (IG Windkraft Österreich, 2017a), eigene Darstellung (Verortung und Klassifizierung der Windkraftanlagenpunkte)

Neben der räumlichen Verteilung der Windkraftanlagen in Österreich ist auch die zeitliche Entwicklung der verschiedenen Leistungsklassen im Anlagenbestand interessant. Dazu zeigt die folgende Abbildung 31 eine klar lineare Entwicklung zu immer leistungsstärkeren Modellen ab dem „Windkraftstart“ um ca. 1990.

Abbildung 31: Zeitliche Entwicklung verschiedener Leistungsklassen von Windkraftanlagen



Quelle: Daten von Windkraftanlagen (IG Windkraft Österreich, 2017a), eigene Bearbeitung (Klassifizierung und Diagrammdarstellung nach Leistungs- und Altersklassen)

3.7.11 Flächenkonkurrenzen bei Energiegewinnung durch Windkraft

Wie stark nichtenergetische Flächennutzungen durch Windkraftanlagen konkurrenziert werden, hängt sehr von der Bauform und Anlagengröße ab. Kleine einzelne Vertikalläufer-Windkraftanlagen sind meist gebäude- oder asphaltintegriert und benötigen horizontal nur wenige Quadratmeter.

Größere Windkraftanlagen (einzeln, in Reihe oder in Clusterparks) stehen in Österreich vor allem im Grün- und Freiland, nur sehr vereinzelt auf versiegelten Gebieten oder in der Nähe von Straßen und Industriegebieten (s. dazu Karte 12 im vorhergehenden Kapitel). Dies ist in anderen Ländern nicht immer so: Wie in Kapitel 3.7.3 (Beispiele für

Windparkanlagen nach Lage und Typ) gezeigt wurde, findet man Windkraftanlagen auch an Straßen und in Industriegebieten u. a. in Holland sehr viel häufiger als im deutschsprachigen Raum und in Ländern, die an die Ost- und Nordsee grenzen, auch an Küsten (nearshore) oder bis in Entfernungen von 50 Kilometern zur Küste als Offshore-Anlagen.

Da aber in Österreich bei Weitem am meisten Flächenbelegung durch die Anlagenform Windpark-Cluster besteht, werden im Folgendem vor allem diese Flächenkonkurrenzaspekte erörtert.

Windparks auf land- und forstwirtschaftlich genutzten Flächen schließen die Nahrungsmittelproduktion und die ökologischen Funktionen (Luft- und Wasserreinhaltung) nur auf den versiegelten Flächenanteilen aus. Dazu gehört die horizontale Mastfläche inklusive des Fundaments, die meist geschotterten oder asphaltierten Wartungsflächen unmittelbar neben den Masten sowie die durch Transformationsanlagen belegten Flächen und die Zufahrtswege.

Auf den „Abstandsflächen“ zwischen den einzelnen Rotormasten wird keine dieser Funktionen konkurrenziert. Somit sind österreichische Windpark-Cluster auf landwirtschaftlichen Flächen eine synergetische Etagenwirtschaft der kombinierten Energie- und Nahrungsmittelerzeugung.

Stark konkurrenziert wird dagegen die Lebensraumfunktion auf Windparkflächen für Vögel und Fledermäuse, aus diesem Grund sind bekannte Vogelflugkorridore ein sehr wichtiges Kriterium im Verfahren der Standortplanung und -genehmigung.

Der Grad der Konkurrenzierung der kleinräumigen Erholungsfunktion und der großräumigen Tourismusfunktion der durch Windkraftanlagen belegten Flächen ist nicht generell einheitlich abschätzbar, sondern lageabhängig. Hier gibt es viele Variantenabstufungen zwischen zwei Extremen:

- Verliert die Fläche durch den Zubau der Windkraftanlage ihre Naherholungs- oder Tourismusfunktion und -qualität vollständig, ist die Flächenkonkurrenz als sehr hoch einzustufen.
- Liegen Naherholungs- und Tourismusflächen und die Windkraftanlagen weit auseinander, nimmt die Flächenkonkurrenzwirkung (insbesondere über die visuelle Veränderung) mit zunehmender Entfernung deutlich ab.

Die Konkurrenzeinschätzung der Windkraftanlagen zu anderen Flächenfunktionen, insbesondere zur Wohnfunktion sowie der Sachgüter- und Dienstleistungsproduktion, ist grundsätzlich als „keine“ bis „gering“ einzustufen, weil große Windparks in Österreich im Freiland meist nicht auf gewidmeten Flächen der Nutzungskategorien Bauland, Wohngebiet, Betriebs- und Industriegebiet stehen.

Große Windkraftanlagen im Frei- und Grünland konkurrenzieren andere erneuerbare Energieträger, die auf diesen Flächen realisiert werden könnten, auf den kleinen versiegelten Flächenanteilen nur zu einem sehr geringen Ausmaß. Insbesondere Feldfrüchte, die sowohl der Nahrungsmittelerzeugung als auch der energetischen Verwertung dienen können (Mais, Getreide, Stroh, Raps oder andere Korn- und Ölsaaten), sind mit der Windkraftfunktion kombinierbar.

Im Fall einer Etagenwirtschaft ist die Kombination mehrerer erneuerbarer Energieformen auf derselben Fläche nicht immer konkurrenzierend, sondern auch synergetisch denkbar. Neben der erwähnten Kombination mit der landwirtschaftlichen Produktion wären zusätzlich auch weitere Kombinationen mit anderen erneuerbaren Energieformen wie der seichten und tiefen Geothermie (s. Kapitel 3.5) und der Solarenergie (s. Kapitel 3.6) denkbar; hierzu konnten im Zuge der Recherchen dieser Forschungsarbeit keine Anlagenbeispiele gefunden werden. Die Mehrfachnutzung erneuerbarer Energieformen im Freiland ist mit Sicherheit ein stark unterschätztes Zukunftspotenzial, weil der gesamte Energieertrag pro Fläche um ein Vielfaches höher wäre, als wenn nur eine erneuerbare Energieform genutzt wird.

Die folgende Tabelle 24 fasst diese bisher erläuterten Flächenkonkurrenzaspekte (und weitere) tabellarisch zusammen und erklärt schlagwortartig, wodurch der Konkurrenzgrad jeweils bedingt ist.

Tabelle 24: Qualitative Bewertung der Flächenkonkurrenzen zwischen der Energieerzeugung aus Windkraft (Betriebsphase) und anderen lageidenten Flächenfunktionen

Art erneuerbarer Energieart und Endenergieform	Wohnfunktion	Orts- und Landschaftsbildfunktion	Naherholungsfunktion	Großräumige Tourismusfunktion	Sachgüter- und Dienstleistungsfunktion	Nahrungsmittelproduktion	Andere erneuerbare Energieproduktion
Windpark, Cluster im Frei- und Grünland	keine (weil nicht auf Bauland)	starke visuelle Veränderung des Landschaftsbildes	keine	abhängig von Tourismusqualität und Entfernung zwischen Funktion und Windpark	keine (weil nicht auf Betriebsgebieten)	gering (nur auf versiegelten Anteilen)	gering (nur auf versiegelten Anteilen)
Windpark, Reihe im Frei- und Grünland	keine (weil nicht auf Bauland)	deutliche visuelle Veränderung des Landschaftsbildes	keine	abhängig von Tourismusqualität und Entfernung zwischen Funktion und Windkraftanlagenreihe	keine (weil nicht auf Betriebsgebieten)	gering (nur auf versiegelten Anteilen)	gering (nur auf versiegelten Anteilen)
Einzelmodelle von Windkraftanlagen im Frei- und Grünland	keine (weil nicht auf Bauland)	geringe visuelle Veränderung des Landschaftsbildes	keine	keine	keine (weil nicht auf Betriebsgebieten)	gering (nur auf versiegelten Anteilen)	gering (nur auf versiegelten Anteilen)
Windkraftanlagen in Industriegebieten oder an Straßen	keine (weil nicht auf Bauland)	keine	keine	keine	gering (nur auf versiegelten Anteilen)	keine	keine

Konkurrenzgrad:

keine	gering	indifferent	mittel	hoch
-------	--------	-------------	--------	------

Indifferent: Der Konkurrenzgrad kann verschiedene Ausprägungen (von „kein“ bis „hoch“) einnehmen.

Quelle: eigene Darstellung

3.7.12 Umweltwirkungen von Energiegewinnung durch Windkraft

Der Betrieb von Windkraftanlagen verursacht mehrere unterschiedliche Umweltwirkungen. Insbesondere große Windparks verändern das Landschaftsbild visuell – sowohl horizontal als auch vertikal – deutlich. Die Stärke der visuellen Veränderung hängt sowohl von der Windparkgröße (der zweidimensionalen, horizontalen Flächenbelegung) als auch von der Nabenhöhe der Rotoren ab.

Zu den visuellen Umweltwirkungen gehört auch der Schattenwurf durch die sich drehenden Rotoren und der sogenannte Diskoeffekt über Lichtreflexionen der Rotorblätter. Wie stark diese Effekte als störend für Menschen empfunden werden können, hängt von den jeweiligen Abstandsreglements ab. Das betrifft auch die potenziellen Gefahren durch Eiswurf (Ablösung von Eisbrocken von den Rotoren bei sehr kalten Temperaturen). Die Häufigkeit des Eiswurfes hängt von den meteorologischen Umgebungsbedingungen, insbesondere der Temperatur, ab. An Standorten erhöhten Eiswurftrisikos werden die Gefahren durch automatische Abschaltungen reduziert (Kaltschmitt, Streicher und Wiese, 2014, S. 537). In Österreich gibt es bereits Windkraftanlagen, bei denen die Rotorblätter beheizt werden, etwa am Moschkogel bei Müzzzuschlag (Krenn, Winkelmeier, Wölfler et al., 2013, S. 6). Wirtschaftlich ist die Vermeidung von Abschaltungszeiten deshalb interessant, weil in Österreich, aber noch stärker in anderen, nördlicheren und kälteren Ländern, gerade im Winter oft lange Starkwindzeiten bestehen.

Die Immissionen durch die Schallerzeugung aufgrund der Luftströmung der Rotoren und das Getriebe selbst sind ebenfalls von Abstandsreglements abhängig. Die Fachliteratur nennt dafür bei Anlagen am Stand der Technik zwischen 0,5 und 2 MW Schallleistungspegelbereiche von ca. 103 dB(A) – d. h. die A-Bewertung des Schallpegels, den Eigenschaften des menschlichen Gehörs nachgeahmt – direkt am Mast (ebd., S. 353 f) und bei einer Entfernung von 400 Metern nur mehr 40 dB(A). Allerdings kann es hierbei, abhängig von der Hauptwindrichtung und der Rauigkeit des Reliefs, große lokale Schallimmissionsunterschiede geben.

Kontrovers diskutiert wird eine Schallimmission anderer Art: der Infraschall, der durch Windkraftanlagen ebenfalls erzeugt wird. Windkraftanlagen erzeugen Infraschall in den Frequenzen von 0,6 bis 1,5 Hz, die eindeutig unter der menschlichen Hörschwelle liegen, weshalb die meisten Expertinnen und Experten (ebd., S. 536 f) von keinen nachweisbaren Belastungen für die Mensch- und Tierwelt ausgehen. Am anderen Ende des Meinungsspektrums stehen Windkraftgegner und Antiwindkraftinitiativen, die von einer „gesundheitlichen Gefährlichkeit des Infraschalls“ sprechen, und zwar nicht nur in unmittelbarer Nähe der Windkraftanlagen, sondern auch in bis 15 Kilometer Entfernung (Windstill, 2017).

Ein stark negativer Umwelteffekt ist die Beeinträchtigung der Lebensräume von Vögeln und Fledermäusen. Die Störungen betreffen sowohl das Zug- und Flugverhalten (egal ob bei Onshore- oder Offshore-Anlagen) als auch das lokale Fress- und Rastverhalten und im Zusammenhang damit auch den meist tödlich ausgehenden Vogelschlag, wenn Vögel oder Fledermäuse von den Rotoren getroffen werden (Kaltschmitt, Streicher und Wiese, 2006, S. 538).

Welche Umweltwirkungen in der Bauphase auftreten können, ist überaus standortabhängig. In der flachen Ebene und bei bereits bestehenden Zufahrtswegen werden in der Bauphase erheblich geringere Umweltauswirkungen bestehen als etwa in einer schwer zugänglichen alpinen Lage, wo diese Infrastrukturen erst neu errichtet werden müssen.

Wie Umweltauswirkungen von Windkraft während der Bau- und Betriebsphase systematisiert, kategorisiert und eingestuft werden können, ist in der folgenden Tabelle 25 anschaulich gelistet. Die Themenbereiche und Bewertungsstufen folgen der typischen Schutzgütersystematik von Umweltverträglichkeitsprüfungen und -erklärungen und entstammen aus der Umweltverträglichkeitserklärung des Windkraftstandortes Andau-Halbthurn, Neusiedl am See, Österreich, 2010.

Tabelle 25: Zusammenfassende Beurteilung der Umweltverträglichkeitserklärung für die Bau- und Betriebsphase des Windparks Andau/Halbthurn, Neusiedl am See, Österreich

ZUSAMMENFASSENDE DARSTELLUNG DER VERBLEIBENDEN AUSWIRKUNGEN			
Themenbereich	Aussagebereich	Verbleibende Auswirkungen	
		Bauphase	Betriebsphase
Siedlungswesen	Regionalentwicklung und örtliche Raumplanung	keine / sehr gering	gering
	Freizeit, Erholung und Tourismus	mittel	mittel
	Gesundheit und Wohlbefinden	mittel	gering
Landschaft und Kulturgüter	Landschaftsbild	gering	mittel
	Kulturgüter	mittel	mittel
Land- und Forstwirtschaft, Jagd	Landwirtschaft	mittel	gering
	Forstwirtschaft	mittel	mittel
	Jagd	mittel	gering
Ökologie	Pflanzen und deren Lebensräume	keine bis sehr gering	keine bis sehr gering
	Tiere und deren Lebensräume – Vögel	gering	gering bis mittel

Quelle: Austrian Wind Power GmbH & RaumUmwelt Planungs-GmbH (2010, S. 39)

Zur Vervollständigung dieses Kapitels seien auch kurz die positiven Umweltwirkungen der Energieerzeugung aus Windkraft erläutert. Sie verhalten sich sehr ähnlich zu denen der Solarenergie, weil auch bei der Elektrizitätserzeugung durch Windkraft weder Schwefeloxide (SO_x) noch Stickoxide (NO_x) und auch nur sehr kleine Mengen an Feinstaub (Materialabriebe) emittiert werden. Ob durch Windkraft viel oder wenig Kohlenstoffdioxid (CO₂) eingespart wird, hängt davon ab, wie die jeweilige Strommenge andernorts produziert wird. Falls diese Primärenergienmengen nichterneuerbar sind (Öl, Gas, Kohle), entspricht die durch Windkraft eingesparte CO₂-Menge den Emissionen der eingesetzten nichterneuerbaren Rohstoffe.

Trotz der nicht unerheblichen negativen Umweltwirkungen hat die Windkraft auch eine landschaftsschützende Kraft. Diese Wirkung besteht in einer Erschwerung der Versiegelung, weil die Umwidmung einer Windparkfläche in Bauland (mit dem dadurch notwendigen Rückbau der Windkraftanlage) sicherlich schwerer zu argumentieren und mit erheblich höheren Kosten verbunden ist als die Umwidmung einer „rein“ landwirtschaftlichen Fläche, die keine Windkraftanlagen trägt, in Bauland. Dieser Zusammenhang gilt sinngemäß auch für große Solarkraftwerke auf landwirtschaftlichen Flächen, weil sowohl Windparks als auch große Solarkraftwerke auf landwirtschaftlichen Flächen den Erhalt der Siedlungsränder „stärken“.

Nach Betriebsende lassen sich die Windkraftanlagenbauteile weitestgehend recyceln (Kaltschmitt, Streicher und Wiese, 2014, S. 543). Auch können die Fundamente, die Masten und die Rotoren ebenso vollständig entfernt und rückgebaut werden wie die Wartungsflächen und -wege, was eine vollständige Wiederherstellung des ursprünglichen Landschaftsbildes erlaubt.

3.7.13 Zusammenfassende Erkenntnisse zum Flächenbedarf von Windenergieanlagen ($\text{m}^2/\text{kWh}/\text{Jahr}$)

Die eingangs gestellte Forschungsfrage nach dem Flächenbedarf ($\text{m}^2/\text{kWh}/\text{Jahr}$) ausgewählter erneuerbarer Energieträger (Windkraft, diverse Biomasse, Solarenergie, Geothermie) und den standörtlichen Energieertragsvarianzen kann durch Beispiele von Windkraftanlagen gut beantwortet werden:

- Ähnlich wie bei der Solarenergie sind die direkten und indirekten Flächenbedarfe aus Satellitenbildkarten der Windkraftanlagen gut messbar, d. h., der gesamte Flächenbedarf als Summe aller direkten Flächenbedarfe (Mastfundamente, Wege, Wartungsflächen) und der indirekten Flächenbedarfe (Abstandsflächen, unabhängig davon ob die Windkraftanlagen einzeln, in Reihe oder in Clusterparks stehen) ist klar ersichtlich.
- Die Datenqualität der Records ist häufig gut, d. h., sowohl Leistungs- als auch Jahresarbeitswerte der Anlagen sind dokumentiert.

Zur Bandbreite der flächenspezifischen Energieerträge sind Interpretationen zu den Records möglich:

- Windkraftanlagen in Reihen- oder Einzelform (egal ob on- oder offshore) haben pro Fläche erheblich höhere Energieerträge als die Clusterformen. Dies hat mit der geringeren gegenseitigen Verwindschattung (s. Kapitel 3.7.7 Flächenbedarfe bei Windenergiegewinnung) dieser Aufstellungsformen zu tun.
- Insgesamt variieren die Flächenerträge bei Werten zwischen 10 und 129 $\text{kWh}/\text{m}^2/\text{a}$ sehr stark bzw. in einer Wertebandbreite von über 1:20 zwischen der Lage Munderfing/Oberösterreich und Kopenhagen/Dänemark.
- Auch die Bandbreite der rechnerischen Volllaststunden pro Jahr weicht stark ab: 1.000 h/a in Munderfing/Österreich vs. 4.305 h/a im Offshore-Windpark Anholt/Dänemark.

- Offshore-Anlagen sind offenbar horizontal wesentlich „lockerer“ aufgestellt als Onshore-Anlagen, denn dort liegt trotz der bis zu doppelt so hohen Volllaststundenzahl der spezifische Flächenertrag sehr deutlich unter dem der Onshore-Anlagen. Möglicherweise gibt es offshore weniger Gründe, „sparsam“ mit der Meeresfläche umgehen zu müssen, oder es geht um Mindestabstände für den Schiffsverkehr – diese Vermutungen müssten aber anhand einer erheblich größeren Anzahl an Offshore- und Onshore-Records überprüft werden.

Die bisherigen zusammenfassenden Erkenntnisse beziehen sich auf Anlagenformen, die in der Windkraftpraxis bereits häufig im Einsatz sind, also vor allem horizontal-achsige Windkraftanlagen mit Nabenhöhen ab 50 Metern und Leistungsklassen ab 2 MW pro Windrad. Es gibt aber viele weitere Anlagenformen, zu denen keine oder zu wenige Records mit guter Datenqualität gefunden werden konnten. Solche Beispiele wären im Zuge künftiger Forschungen ebenfalls eine nähere Analyse wert, um flächenspezifische Energieerträge ermitteln zu können:

- vielfältige Arten von Kleinwindkraftanlagen, egal ob in Horizontal- oder Vertikalachserbauweise (s. Kapitel 3.7.2 Arten und Bauformen von Windenergieanlagen)
- Windkraftanlagen in Industriegebieten, an Autobahnen oder in gemischten Siedlungsstrukturen: Hier herrschen aufgrund der Luftverwirbelungen (Relieffraugigkeit) andere Windertragsverhältnisse als im Frei- und Grünland oder offshore im Meer.
- Windkraft bietet neben der Direkteinspeisung von Elektrizität auch die Möglichkeit, Wasserstoff und/oder synthetisches Methan herzustellen. Dazu braucht es zusätzliche Anlagen- und Speichergebäude, deren Flächenbedarf zu erfassen wäre; zu Wasserstoff- oder Biomethanpotenzialen aus Windstrom, auch in der Form von Einspeisungen in bestehende Erdgasnetze und -speicher, siehe Kapitel 3.8.6 (Räumlich bedingte Potenzialunterschiede in Österreich bei Energiegewinnung aus Biomasse).

3.8 Flächenbedarfe, Flächenkonkurrenzen und Umweltaspekte bei der Energiegewinnung aus Biomasse

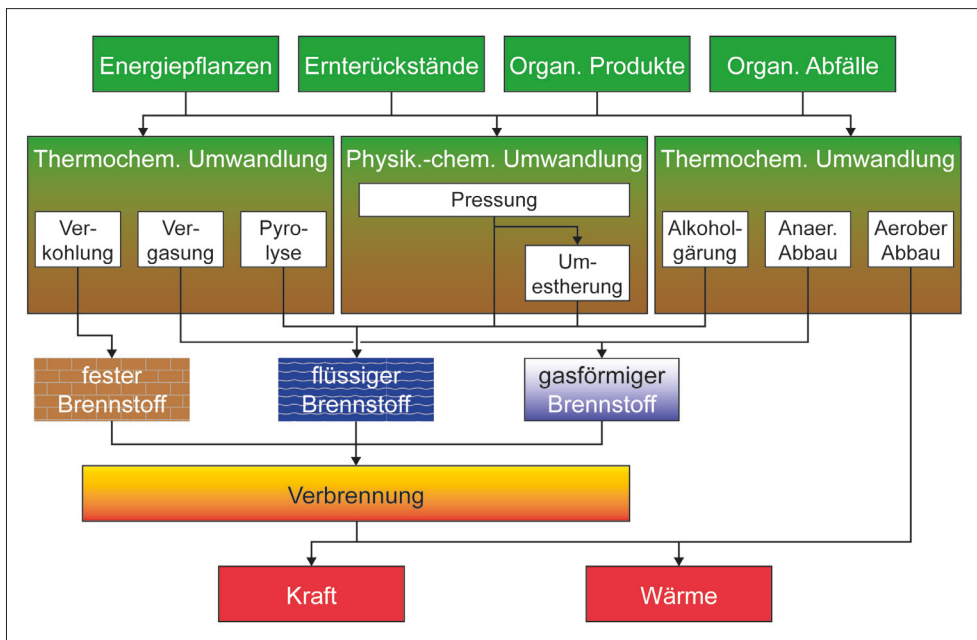
Dieses Kapitel behandelt die Prozesskette der Energieumwandlung aus biogenen Rohstoffen sowie Anlagenarten, lageabhängige und lageunabhängige Faktoren unterschiedlicher Energieerträge (Wärme bzw. Bioethanol) und im empirischen Teil Anlagenbeispiele verschiedener Biomassekraftwerke, die Hackschnitzel aus der Forstwirtschaft oder agrarische Rohstoffe wie Stroh, Mais oder Pappeln im Kurzumtrieb verwerten. Im Anschluss werden Flächenkonkurrenzen und Umweltwirkungen der Energieerzeugung aus Biomassen erörtert und abschließend reflektiert, welche Erkenntnisse zur Forschungsfrage nach dem Flächenbedarf dieser Art von Energieerzeugung ($\text{m}^2/\text{kWh/a}$) aus der Empirie möglich sind.

3.8.1 Prozesskette der Energieumwandlung und Nutzenergieformen von Biomasse

Energetisch nutzbare Biomasse entsteht, wenn Pflanzen über Photosynthese Solar-energie in Kohlenstoff umwandeln und damit „photosynthetisch fixieren“ (Kaltschmitt, Hartmann und Hofbauer, 2009, S. 2). Im engeren Arbeitskontext vorliegender Untersuchung sind damit vor allem pflanzliche, nachwachsende Rohstoffe zur Verwendung in Heizanlagen gemeint. Weiter gefasste Definitionen (Bundesverband der landwirtschaftlichen Berufsgenossenschaften e.V., 2008) erweitern diese verwendbaren Materialien auf erneuerbare Stoffe aus Phyto- und Zoomasse inklusive deren Folge- und Nebenprodukte, wie etwa tierische Gülle oder Klärschlamm.

Im Kontext der erneuerbaren Energien genügt aber eine einfachere Kategorisierung, wie sie in der folgenden Abbildung 32 gezeigt wird: Primärprodukte wie Pflanzen, aber auch Sekundärprodukte wie Ernterückstände, organische Produkte und Abfälle werden durch thermochemische oder physikalisch-chemische Umwandlung zu festen, flüssigen oder gasförmigen Brennstoffen und dann durch Verbrennung zu den Nutzenergieformen Wärme und/oder „Kraft“ (Elektrizität).

Abbildung 32: Wandlungsketten für Bioenergieträger

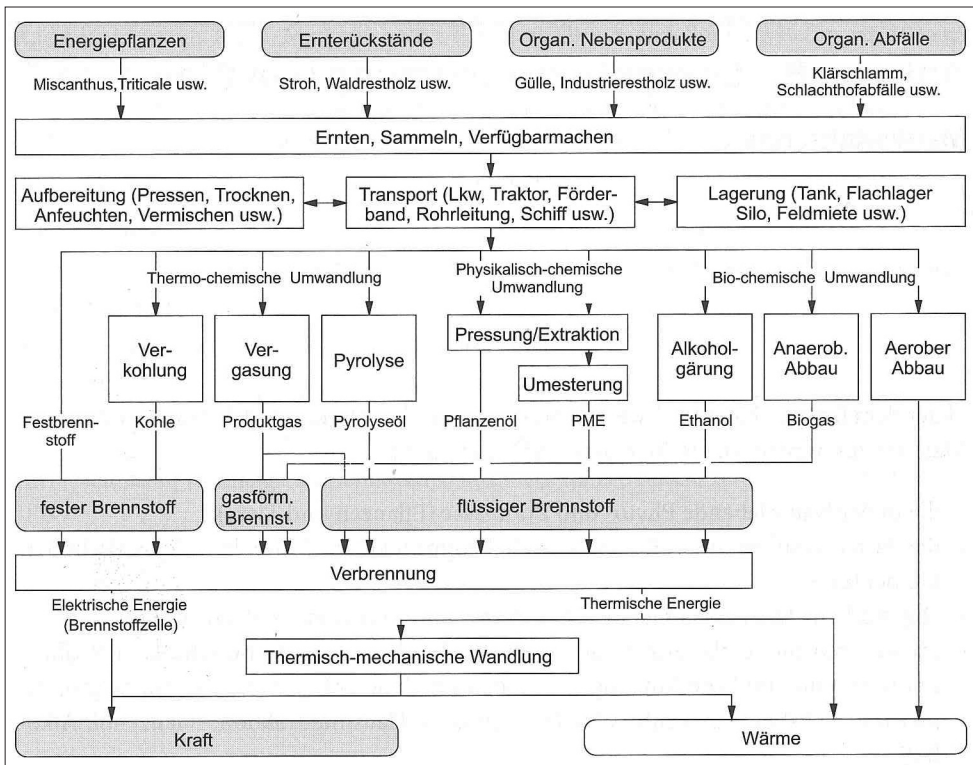


Quelle: VDE ETG Energietechnische Gesellschaft (o. J.)

Im Vergleich zu den erneuerbaren Energieformen Windkraft, Solarenergie und Geothermie hat die Biomasse die vielfältigsten Variations- und Umwandlungsmöglichkeiten zwischen Primär- und Nutzenergieformen. Ein weiterer wesentlicher Unterschied ist, dass die direkten und indirekten Flächenbedarfsanteile der Energieumwandlung aus Biomasse (etwa das Kraftwerk und die Rohstoffpotenzialflächen) häufiger als bei Windkraft, Solarenergie und Geothermie räumlich voneinander getrennt, also nicht lageident sind.

Sinngemäß ist die folgende Abbildung 33 ähnlich zur vorigen, aber sie betont stärker die vielfältigen möglichen Verfahrensschritte und insbesondere auch die Transportaufwände zwischen den verschiedenen Umwandlungsschritten. Die gesamte Biomasseökobilanz wird maßgeblich davon beeinflusst, wie viele solche Verfahrensschritte zwischen Primär- und Nutzenergie aus Biomasse notwendig sind und wie weit die Standorte dieser Verfahrensschritte voneinander entfernt liegen, weil daraus ein erheblicher Transportaufwand (inklusive dessen ökologischer Fußabdruck) entstehen können.

Abbildung 33: Energiebereitstellungsmöglichkeiten aus Biomasse



Grau unterlegt = Energieträger, weiß unterlegt = Umwandlungsprozesse

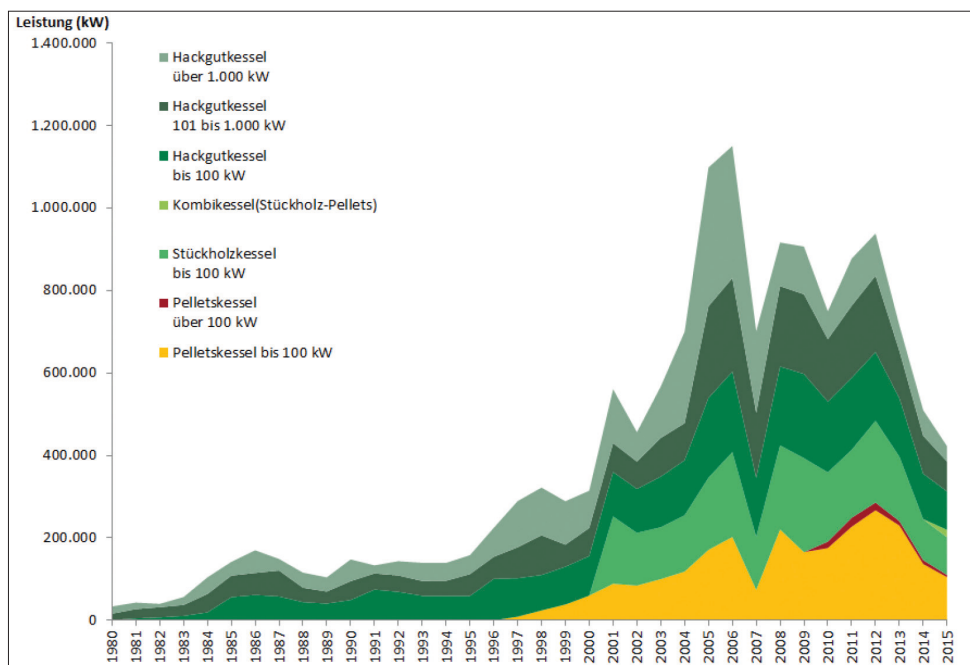
Quelle: Kaltschmitt, Streicher und Wiese (2014, S. 894)

3.8.2 Arten und Bauformen von Biomasseanlagen

Da die Primär- und Endprodukte der Energieumwandlung aus Biomasse so vielfältig sind, gilt dies auch für die Anlagenarten und Bauformen der Wärmenutzung. Grundsätzlich ist dabei zwischen Einzelanlagen ohne Wärmenetzkopplung (siehe dazu etwa auch die älteste Form der „menschlichen“ Wärmeerzeugung: ein Holzkamin) und netzgekoppelten Anlagen zu unterscheiden.

Die folgende Abbildung 34 zeigt vor diesem Hintergrund die starke Leistungsentwicklung der Biomasse seit 1980, speziell auch seit 1997 mit den Leistungsbeiträgen von Pelletskesseln, und sehr deutlich auch die schnelle Auswirkung des Ölpreises (etwa beim Preiseinbruch 2006/2007) auf die Zu- oder Abnahme der Anzahl neu installierter Biomassefeuerungen pro Jahr.

Abbildung 34: Leistungsentwicklung von Biomassefeuerungen, 1980–2015

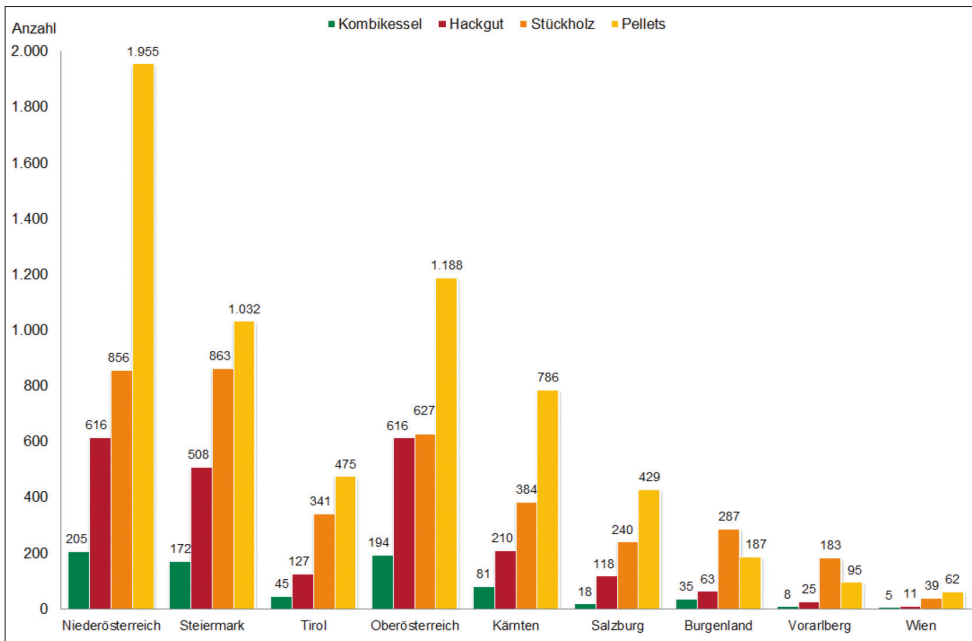


Quelle: Landwirtschaftskammer Niederösterreich, Abteilung Betriebswirtschaft und Technik (2016, S. 5)

Die Landwirtschaftskammer Niederösterreich listet in ihrer Publikation auch die Pelletsfeuerungen bis 30 kW und kategorisiert diese Leistungsklasse als „Wohnraumkessel mit Zentralheizungsfunktion“ (Landwirtschaftskammer Niederösterreich, Abteilung Betriebswirtschaft und Technik, 2016, S. 8). Wiederum fast 90 Prozent dieser kleinen Privatanlagen hat die Leistungsklasse bis 17 kW, was der Leistung einer typischen Erdgaskombitherme für einen Haushalt entspricht.

Die folgende Abbildung 35 zeigt einen größeren räumlichen Zusammenhang zwischen Bundesländern und der Menge an Biomasseheizungen. Deutlich sichtbar ist eine starke Linearität zur jeweiligen Bevölkerungszahl, mit der Ausnahme Wiens, weil hier etwa 90 Prozent aller Haushalte mit den zentralen Netzleistungen der Fernwärme oder des Erdgases versorgt sind. Zur Entwicklung der wesentlich leistungsstärkeren Biomasseanlagen (ab 10 MW) siehe Kapitel 3.8.10 (Skalierbarkeit der Energieleistung und -arbeit von Biomasseanlagen).

Abbildung 35: Bundesländerverteilung von Biomassekesseln bis 100 kW, 2014






Quelle: Landwirtschaftskammer Niederösterreich, Abteilung Betriebswirtschaft und Technik (2016, S. 5)


3.8.3 Beispiele für Biomasseanlagen nach Lage und Typ

Die folgenden Tabelle 26 zeigt ausgewählte Beispiele existierender Biomassekraftwerke in Österreich, die nach dem biogenen Rohstoffpotenzial sortiert sind. Die hier unter dem Punkt „Fläche“ genannten Werte beinhalten ausschließlich die für die Potenzialrohstoffe benötigte Fläche. In Kapitel 5.4 (Reflexion und Ausbaumöglichkeiten des Flächenbedarfskatalogs der Anlagen erneuerbarer Energieproduktion) werden ergänzend Anlagen nach ihrem Verhältnis zwischen den Kraftwerksflächenanteilen und der Größe der Potenzialrohstoffflächen veranschaulicht. Im Unterschied zu Geothermie, Solarenergie und Windkraft sind bei der Energiegewinnung durch Biomasse diese beiden Flächenarten nicht lageident.

Tabelle 26: Biomasseanlagen nach Lage, Typ und Größe

Biomasse, Waldhackschnitzel, Wärmeerzeugung mit Wärmenetzanschluss	
	<p>Name, Lage: Biomasseheizwerk Rankweil, Vorarlberg, Österreich</p> <p>Untertyp: Forst, Hackschnitzel, Wärme</p> <p>Info: Thermische Wärmeleistung 1.700 MW (Winterbetrieb) bzw. 1.000 MW (Sommerbetrieb), variabel durch den Einzel- oder Kombibetrieb der beiden Kessel. Brenngut: Waldhackschnitzel. Großabnehmer der Wärme: Krankenhaus Rankweil und öffentliche Gebäude der Marktgemeinde. Quelle der Angaben zu kWh/m²/a: Stanzer, Novak, Dumke et al. (2010).</p> <p>Fläche (ha): 568</p> <p>Leistung (MW th/a): 1,7</p> <p>Energie (MWh th/a): 10.000</p>
	<p>Name, Lage: Waldbiomassekraftwerk Simmering, Wien</p> <p>Untertyp: Forst, Hackschnitzel, Wärme</p> <p>Info: Baujahr 2006, damals eines der größten Biomassekraftwerke Europas, mehrere Heizblöcke für Erdgas, Biomasse und Heizöl. Der Biomasseanteil versorgt 41.000 Wiener Haushalte mit Fernwärme. 7.500 Volllaststunden pro Jahr. Quelle der Angaben zu kWh/m²/a: Stanzer, Novak, Dumke et al. (2010).</p> <p>Fläche (ha): 26.535</p> <p>Leistung (MW th/a): 37</p> <p>Energie (MWh th/a): 470.000</p>
Biomasse, agrarisch, Wärmeerzeugung mit Wärmenetzanschluss	
<p>Kein Foto vorhanden</p>	<p>Name, Lage: Biogas (Flächen-default o. Referenzanlage¹⁾)</p> <p>Untertyp: agrarisch, Mais (Biogas), Wärme</p> <p>Info: Quelle der Angaben zu kWh/m²/a: Stanzer, Novak, Dumke et al. (2010)</p> <p>Fläche (ha): 100</p> <p>Leistung (MW th/a): 3</p> <p>Energie (MWh th/a): 5.900</p>

Biomasse, agrarisch, Wärmeerzeugung mit Wärmenetzanschluss	
Kein Foto vorhanden	<p>Name, Lage: Kurzumtrieb (Flächen-default o. Referenzanlage¹)</p> <p>Untertyp: agrarisch, Pappeln, Wärme</p> <p>Info: Quelle der Angaben zu kWh/m²/a: Stanzer, Novak, Dumke et al. (2010)</p> <p>Fläche (ha): 100</p> <p>Leistung (MW th/a): 3</p> <p>Energie (MWh th/a): 7.040</p>
Kein Foto vorhanden	<p>Name, Lage: Strohkraftwerk und Nahwärme Stetteldorf, Niederösterreich</p> <p>Untertyp: agrarisch, Stroh, Wärme</p> <p>Info: 1993 Gründung der Fernwärmegenossenschaft, Herbst 1994 Start des Heizbetriebes. Feuerung zu 100 % aus Stroh von umliegenden, nahen Getreidefeldern; Öl-Ausfallkessel 2 MW. Versorgung von 220 Haushalten und allen öffentlichen Gebäuden der Gemeinde. Durchschnittlicher Strohbedarf ca. 1.500 t/a, entspricht 500–600 ha Getreidefläche. Verwertung der kalihaltigen Strohasche als Dünger. Quelle der Angaben zu kWh/m²/a: Kaltschmitt, Hartmann und Hofbauer (2009, S. 182)</p> <p>Fläche (ha): 600</p> <p>Leistung (MW th/a): 2,5</p> <p>Energie (MWh th/a): 8.333</p>
 <p>Foto: FWG-Fernwärmeversorgung Bockfließ (2013)</p>	<p>Name, Lage: Strohkraftwerk und Fernwärme Bockfließ, Niederösterreich</p> <p>Untertyp: agrarisch, Stroh, Wärme</p> <p>Info: Betrieb über eine Fernwärmegenossenschaft (gegr. 1992), alle Wärmeabnahmekunden sind Mitglieder, 1993 Baustart und Betrieb. Gemischter Feuerungsbetrieb Holzhackgut (1,7 MW), Stroh (2,5 MW; Stroh aus 500 ha Getreideflächen, mit Bauern aus der Umgebung bestehen Strohlieferverträge), Öl (Ausfallsicherung, 1,75 MW), 137 m³ Pufferspeicher. Über 10 km Netz versorgen 386 Hausanschlüsse.</p> <p>Fläche (ha): 500</p> <p>Leistung (MW th/a): 2,5</p> <p>Energie (MWh th/a): 7.830</p>

Biomasse, agrarisch, Bioethanol	
	<p>Name, Lage: Agrana Stärke (Bioethanol), Pischelsdorf, Niederösterreich</p> <p>Untertyp: agrarisch, Bioethanol</p> <p>Info: Baujahr 2008, Österreichs einzige Bioethanolanlage. Jahresbedarf etwa 500.000 t Getreide, v. a. Weizen und Mais, Jahresproduktion 240.000 m³ (= 240 Mio. Liter) Bioethanol. Über dieses Ethanolvolumen und dessen Energiegehalt (7,4 kWh/kg) wurde der Flächenbedarf abgeschätzt. Nebenproduktion 180.000 t Eiweißfuttermittel. Gute Verkehrsanbindung (Straße, Schiene, Wasser), Lage im Zentrum der Getreideanbaugebiete. Quelle der Angaben zu kWh/m²/a: Kaltschmitt, Hartmann und Hofbauer 2009, S. 182</p> <p>Fläche (ha): 4.291</p> <p>Leistung (MW th/a): k.A.</p> <p>Energie (MWh th/a): 177.600</p>
Foto: AGRANA Stärke GmbH (2008)	

¹ Flächen-default o. Referenzanlage bedeutet, dass sich die Energieertrags- und Flächenwerte nicht auf eine real existierende Anlage, sondern auf einen Standardwert aus der Fachliteratur beziehen.

Quelle: eigene Darstellung

3.8.4 Lageunabhängige Ertragsunterschiede bei Energiegewinnung durch Biomasse

Die wichtigsten lageunabhängigen Faktoren, die die Biomasseerträge beeinflussen, sind die Bewirtschaftungsform und der Düngemiteleinsatz für die jeweiligen Pflanzen. Auch die Wahl der Fruchtfolge selbst (Anzahl der Fruchtart pro Saison/Jahr oder auch über mehrere Jahre), die Art und Intensität der Düngung, Art und Frequenz der Pflegemaßnahmen und auch das spezifische Ernteverfahren bestimmen ganz maßgeblich den Ernteertrag (Kaltschmitt, Streicher und Wiese, 2006, S. 100). Falls es sich um essbare Pflanzenerträge handelt, ist auch einfach die Entscheidung, welcher Flächenanteil für die Energieumwandlung aus der Nahrungsmittelfunktion „abgekoppelt“ wird, nicht lageabhängig, aber für den Energieertrag ebenso relevant wie für den Grad der Konkurrenzierung der Lebensmittelfunktion.

3.8.5 Lageabhängige Ertragsunterschiede bei Energiegewinnung durch Biomasse

Die Produktivität der Photosynthese und damit das Biomasseertragspotenzial ist sehr vom lokalen Klima, insbesondere von der Luft- und Bodentemperatur und der Niederschlagsmenge, abhängig. Weitere lageabhängige Ertragsfaktoren sind Bodeneigenschaften wie Tiefe und Volumen der Humusschicht, die Bodenfruchtbarkeit (Nährstoff- und Mikroorganismengehalt), aber auch die Wasserhaltefähigkeit durch die Textur und Körnung des Bodens (Kaltschmitt, Streicher und Wiese, 2006, S. 98 f). Innerhalb derselben Fruchtart bringt auch das Relief der Landschaft

Ertragsunterschiede, weil zum Beispiel in schlecht erschlossenen, steilen Hanglagenwäldern maschinell weniger „geerntet“ werden kann als in flachen, gut erschlossenen Wäldern. All diese lageabhängigen Ertragsunterschiede können auch innerhalb eines kleinen Landes wie Österreich große Ertragsunterschiede innerhalb einer Biomassefraktion bringen, aber es ist überaus schwierig hierzu Datenmaterial, das Energieerträge etwa nach Klima- und Bodenarten unterscheidet, zu finden.

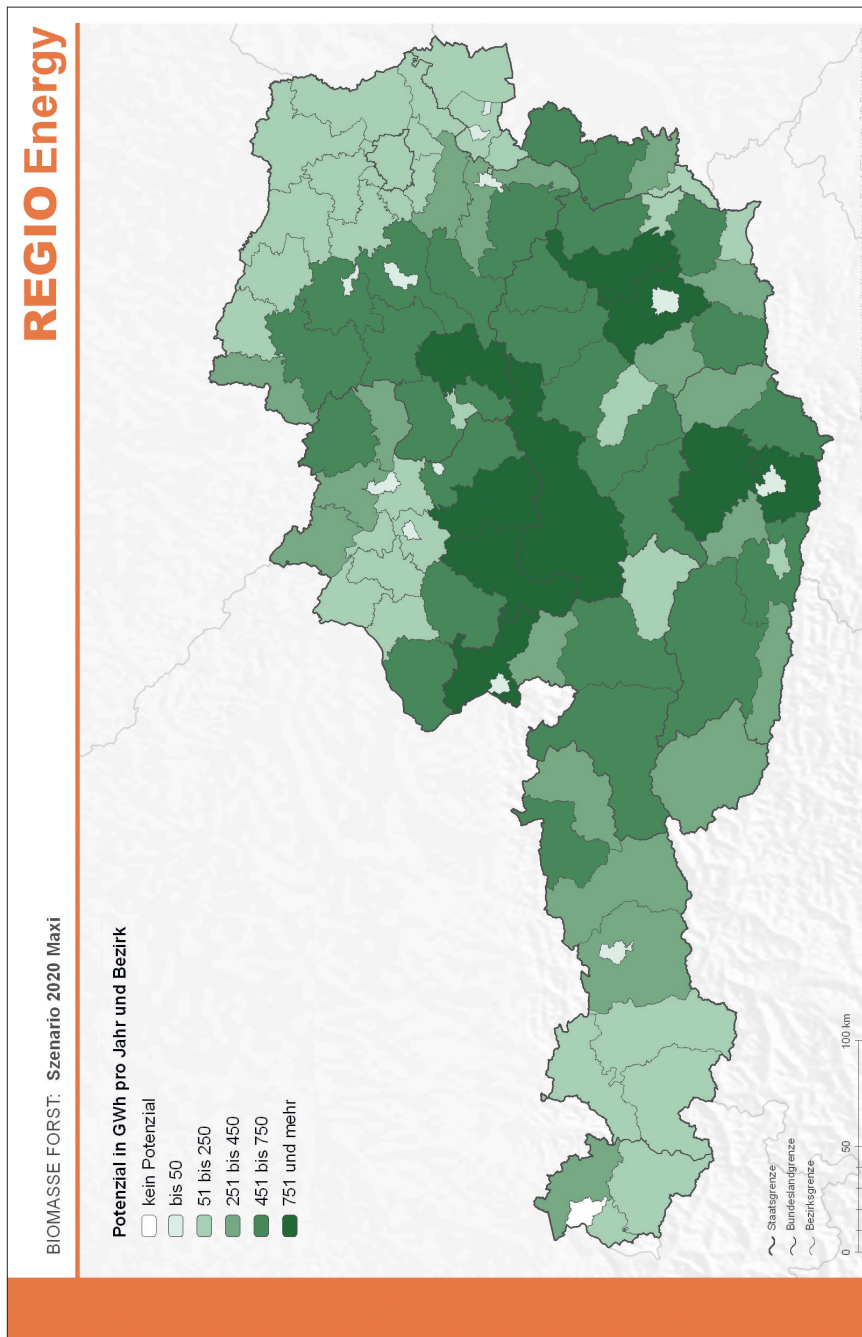
3.8.6 Räumlich bedingte Potenzialunterschiede bei der Energiegewinnung durch Biomasse in Österreich

Im folgenden Kapitel werden räumliche Lage- und Potenzialunterschiede der Energiegewinnung durch Biomasse veranschaulicht. Es konnten nur sehr wenige Studien recherchiert werden, in denen überhaupt versucht wurde, mit kleinerer Auflösung als der der Bundeslandebene für mehrere Biomassen Potenzialunterschiede verortet zu visualisieren. Eine dieser Studien dazu ist „REGIO Energy“ (Stanzer, Novak, Dumke et al., 2010): Hier wurden auf der Ebene der österreichischen Bezirke u. a. für die Agrar-, Forst-, Grünland- und Viehwirtschaft Potenzialszenarien in Bezug auf die Energiegewinnung durch Biomasse für 2020 berechnet und visualisiert.

Vereinfacht gesagt umschließen die eher im flachen Land liegenden agrarischen Biomassepotenziale im Norden und Osten Österreichs die zentral gelegenen, großen Wälder im voralpinen Hügelland und den alpinen Landschaften. Grundsätzlich ist die Verbrennung von Nahrungsmitteln aus ethischen Gründen abzulehnen, dazu konnten aber keine genauen Analysen recherchiert werden, die darstellen, welche Flächen die Energieproduktion aus Nahrungsmitteln in Österreich (nicht global!) tatsächlich der Nahrungsmittelfunktion entziehen oder ob Teile der entzogenen Flächen auch in anderen Lagen „ersetzt“ werden.

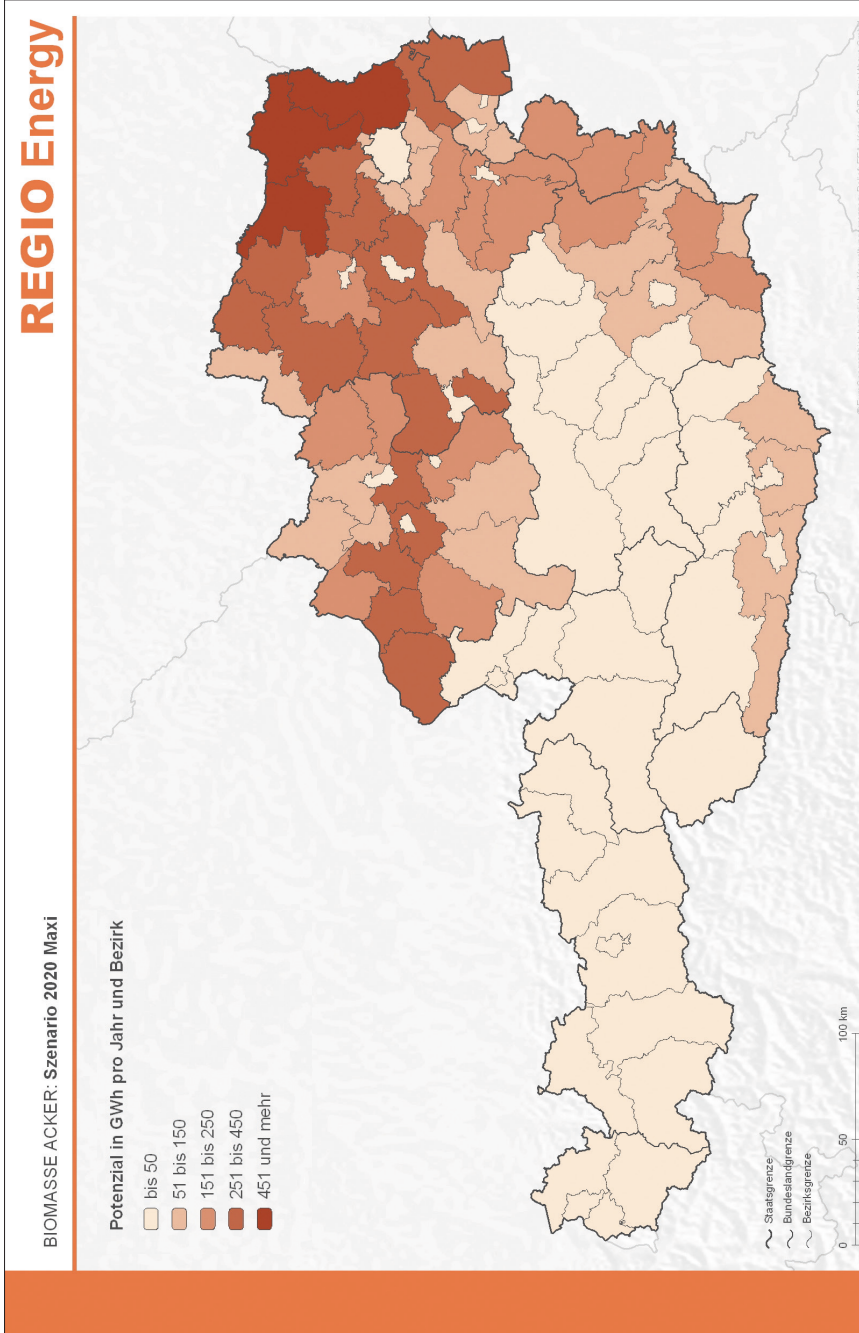
Die folgenden Karten 13 bis 16 zeigen über die Absolutwerte der Potenziale (GWh pro Bezirk und Jahr) deutlich die räumlichen Schwerpunkte der Biomasserohstoffpotenziale aus dem Wald (v. a. Tirol, südliches Salzburg, Kärnten, westliche Steiermark, südwestliches Niederösterreich), agrarisch (Nordburgenland, nördliches und östliches Niederösterreich) und der räumlich ohne größere eindeutige Schwerpunkte verteilten Vieh- und Grünlandwirtschaft. Karte 16 veranschaulicht ergänzend, wie sich all diese Energiepotenziale zur Wärmenachfrage je Bezirk verhalten.

Karte 13: Biomassepotenziale Forst, „maxi 2020“, Projekt „REGIO Energy“



Quelle: Stanzer, Novak, Dumke et al. (2010)

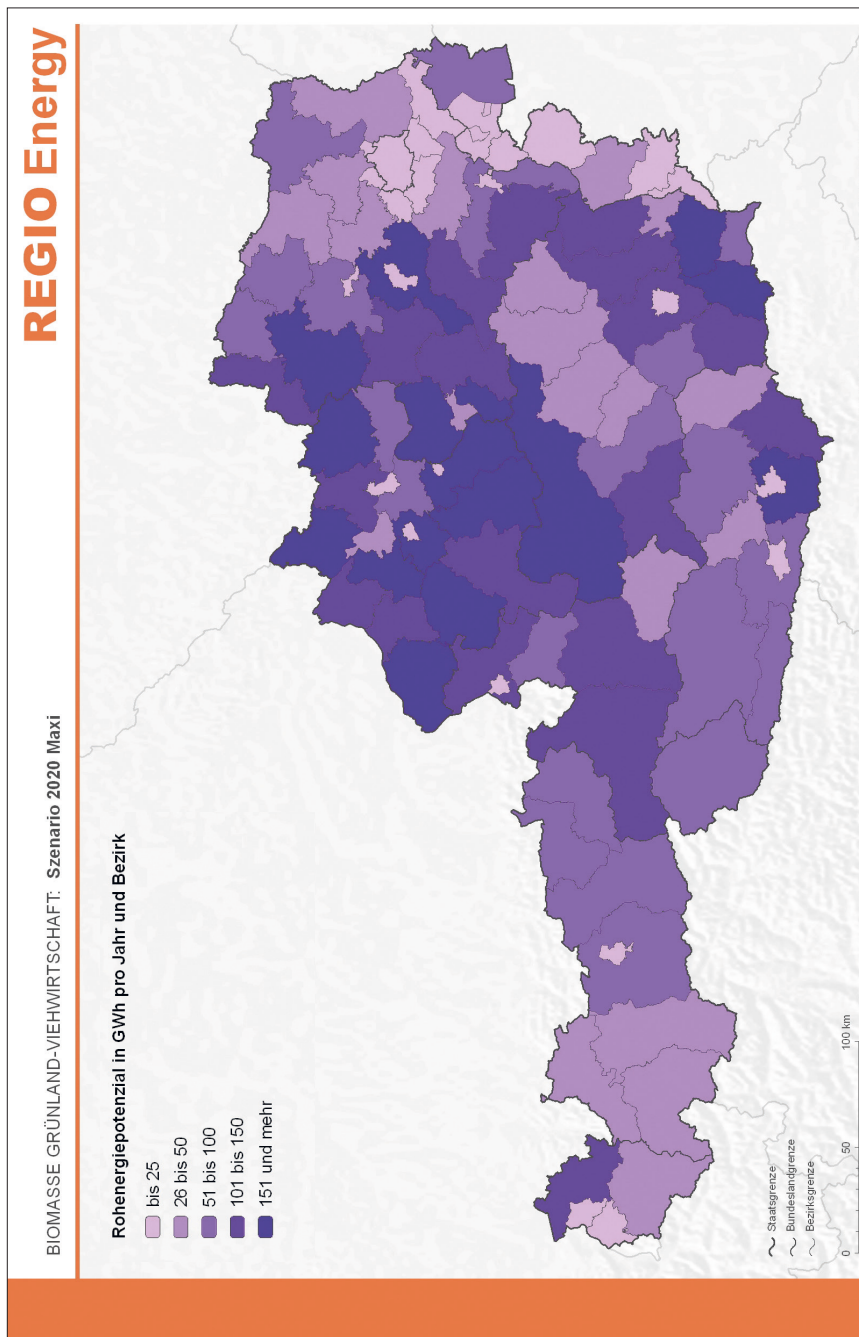
Karte 14: Biomassepotenzial Acker, „maxi 2020“, Projekt „REGIO Energy“



Anmerkung: In dieser Karte wurden mehrere Feldfruchtarten aufsummiert.

Quelle: Stanzer, Novak, Dumke et al. (2010)

Karte 15: Biomassepotenziale Grünland-Viehwirtschaft, „maxi 2020“, Projekt „REGIO Energy“



Quelle: Stanzer, Novak, Dumke et al. (2010)

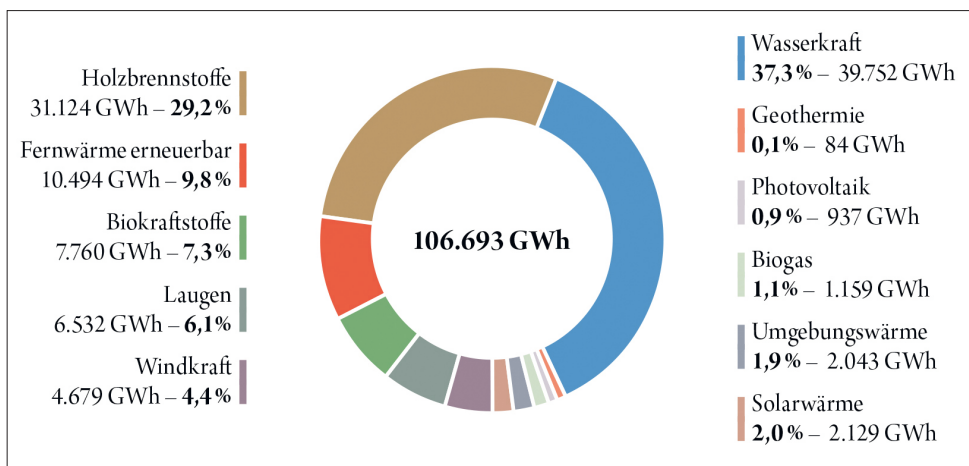
Karte 16 zeigt wesentliche räumliche Unterschiede:

- Dicht besiedelte Bezirke (etwa die Hauptstädte der Bundesländer) „schaffen“ auf ihren bezirkseigenen Flächen Energieertragspotenziale, die bei Weitem nicht für ihren Eigenbedarf an Wärme ausreichen. Dadurch sind sie auf Kooperationen mit dem Umland angewiesen.
- Nur sechs Bezirke haben ein ausgeglichenes Verhältnis zwischen der in „REGIO Energy“ modellierten jährlichen Wärmenachfrage und den erneuerbaren Energiepotenzialen im Szenario „maxi 2020“ (in der Karte durch die „geschlossenen“ Tortendiagramme dargestellt). Der Begriff „Selbstversorgungsgrad“ ist von den Autorinnen und Autoren des „REGIO Energy“-Projekts leider sehr ungünstig gewählt: Selbstversorgung bedeutet, dass es möglich ist, auf Bezirksebene, also ohne Zusatzmaßnahmen von außen (Import) oder nach außen (Export), mit allen Problemen der Energiespeicherung, Energieverteilung und allen täglichen und saisonalen Nachfrageschwankungen, eine vollständige Wärmeselbstversorgung erreichen zu können. Dies ist weder realistisch noch netztechnisch sinnvoll.
- Die Wärme aus Biomasse erreicht im Verhältnis zu den anderen erneuerbaren Energiepotenzialen eindeutig die größten zusätzlichen Leistungsbeiträge (oft über 80 Prozent).
- Innerhalb der biogenen Rohstoffe wird es auch künftig eine Rolle spielen, unter welcher Konkurrenz die genutzten Flächen stehen. Denn während durch die zunehmende Versiegelung durch Gebäude und Verkehrswege fruchtbare Ackerlandböden eher „gefährdet“ sind, nehmen die Waldflächen und damit auch die daraus mobilisierbaren biogenen Rohstoffe kontinuierlich zu: Zwischen 1971 und 2009 ist der österreichische Holzvorrat von 827 auf 1.135 Millionen Vorratsfestmeter angewachsen, der jährliche Zuwachs an Sägerundholz, Industrierundholz, Brennholz und Hackgut beträgt 23 Millionen Vorratsfestmeter (Österreichischer Biomasse-Verband, 2017, S. 50).
- Zum Wärmenachfragemodell, das in „REGIO Energy“ angewendet wird, ist es wichtig, zu erwähnen, dass die Autorinnen und Autoren den Wärmebedarf 2020 gleich dem von 2008 gesetzt haben. Es wurden keine „Energiesparpfade“ modelliert. Die tatsächlichen Sanierungsraten der letzten Jahre in Österreich zeigen Werte von nur 1 bis 1,5 Prozent, für die ungefähre Zielerreichung der Pariser Klimaziele bräuchte es aber 3 Prozent pro Jahr (DerStandard, 2016). Die realen Sanierungsraten stehen somit in einem deutlichen Widerspruch etwa zu den Landesenergiekonzepten (s. Kapitel 2.3 Erneuerbare Energien, Energiesparziele, Energieeffizienz und Mobilität in österreichischen Energiestrategien), die von viel höheren Sparzielen bis hin zur Halbierung des Wärmebedarfes ausgehen.

Bisher wurden vor allem die räumlichen Angebotslagen der verschiedenen Biomassen in Österreich aufgezeigt. Demgegenüber ist nun die Nachfragesituation darzustellen. Österreich hatte 2015 einen Anteil erneuerbarer Energie am gesamten Endenergieverbrauch von 32,8 Prozent (Biermayr, 2017, S. 12). Die folgende Abbildung 36 zeigt dazu die Mengenaufteilungen, die Bioenergie hält in Summe knapp 60 Prozent der gesamten erneuerbaren Energie, der nächstgrößere Einzelbeitrag kommt aus der Wasserkraft mit 37 Prozent. Die Bioenergien tragen laut dieser Darstellung in

Österreich 46 Prozent bei, der Biomasseverband Österreichs nennt dagegen einen deutlich höheren Wert von 57 Prozent (Pfeifer, Kahr und Liptay, 2016, S. 28). Dieser Unterschied von fast 10 Prozent ist aus den zugrunde liegenden Daten und Berichten nicht offensichtlich erklärbar, könnte aber an unterschiedlichen Zuteilungen von Primär- und Sekundärprodukten der Biomasse liegen, die in den Originaldaten verwendet wurden. Glaubt man den 46 Prozent, ergibt sich zum Gesamtbedarf inklusive nichterneuerbarer Energien ein Gesamtbeitrag der Bioenergien in Österreich von 15 Prozent (32,8 mal 0,46 Prozent). Trotzdem zeigt Abbildung 36 die klare Dominanz der Holzbrennstoffe und Wasserkraft im Versorgungsportfolio bei erheblich geringen Beiträgen aller anderen erneuerbaren Energieträger.

Abbildung 36: Anteile erneuerbarer Energieträger in Österreich, 2015



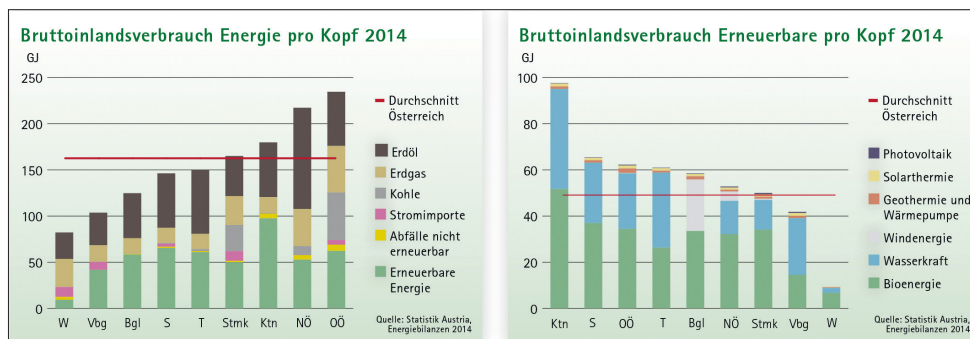
Quelle: Biermayr (2017, S. 14)

Auf Bundesländerebene betrachtet ergeben sich bei den einzelnen Beiträgen der erneuerbaren Energien, aber auch im gesamten Energie-pro-Kopf-Verbrauch sehr große Unterschiede. Die folgende Abbildung 37 zeigt dazu u. a.:

- Wienerinnen und Wiener verbrauchen pro Kopf mit Abstand am wenigsten Energie, genauer gesagt deutlich weniger als die Hälfte der oberösterreichischen und niederösterreichischen Mengen. Zugleich hat Wien im Pro-Kopf-Vergleich den kleinsten Anteil an erneuerbaren Energien mit etwa 13 Prozent. Im Bundesländervergleich sind hier allerdings die unterschiedlichen Industrialisierungsgrade nicht differenziert dargestellt – wahrscheinlich einer der Gründe für den insgesamt höchsten Pro-Kopf-Energieverbrauch, der in Oberösterreich liegt.
- Innerhalb der erneuerbaren Energien liefern die Bioenergien (mit Ausnahme Tirols mit dem höchsten Wasserkraftanteil aller Bundesländer) den jeweils größten Einzelbeitrag.

Gerade für die Biomasse wären zusätzlich wesentlich genauere Aufschlüsselungen interessant, etwa welche Biomassefraktionen über eine längere Zeitreihe welche Beiträge beisteuern – und dies zudem auf regionaler Ebene differenziert. Auch Aussagen über die Entfernungen zwischen den Potenzialflächen und den Kraftwerken wären für die Bilanzierung der Biomasselebenszyklen wichtig, konnten aber im Zuge dieser Forschungsarbeit trotz zeitintensiver Suche nicht gefunden werden.

Abbildung 37: Gesamter Bruttoinlandsverbrauch an Energie sowie erneuerbarer Bruttoinlandsverbrauch pro Kopf in österreichischen Bundesländern, 2014

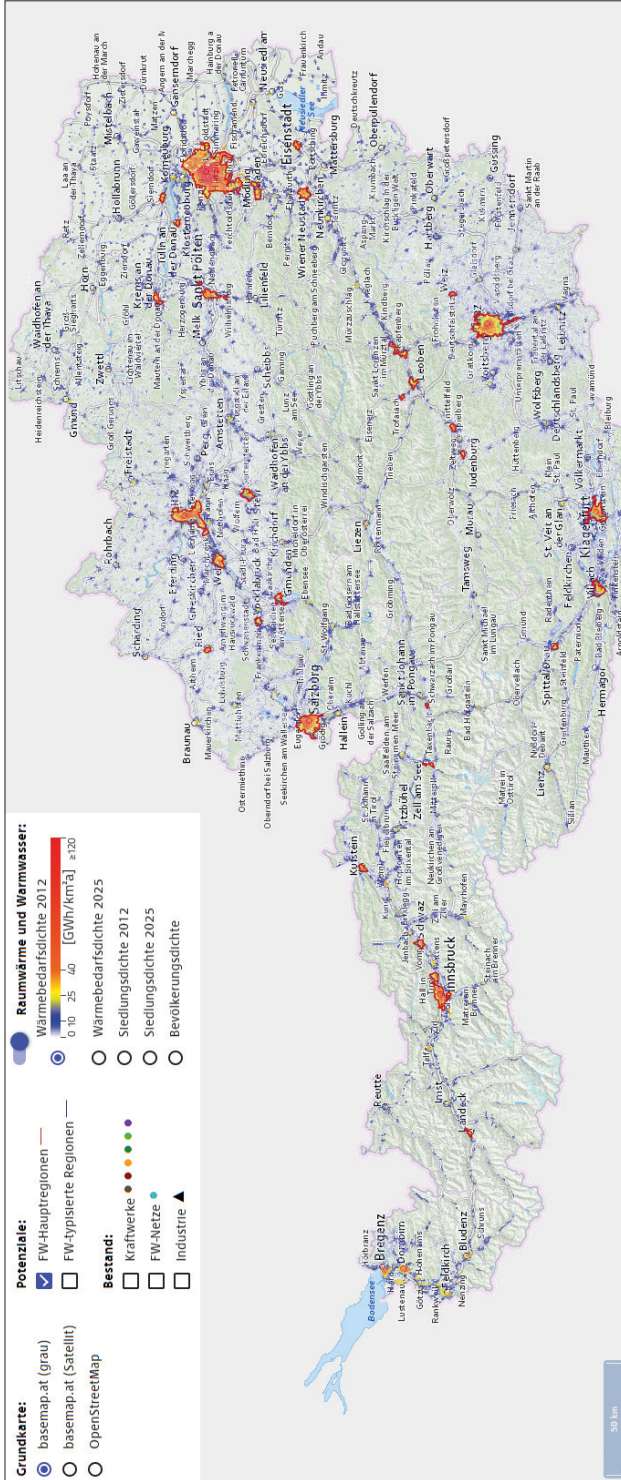


Quelle: Pfemeter, Kahr und Liptay (2016, S. 26)

Nachdem die räumlich bedingten Potenzialunterschiede der Biomasse (sowohl nachfrage- wie angebotsseitig) im Ist-Zustand erörtert wurden, soll dieses Kapitel mit zwei Aspekten zum Soll-Zustand abgerundet werden: der Bedeutung künftiger Veränderung von Wärmenachfragedichten und den Einspeisepotenzialen von Biomethan und Wasserstoff in bestehende Erdgasnetze.

Die Studie „Austrian Heat Map“ (e-think und EEG Energy Economics Group, 2013) hat dazu Wärmenachfragedichten für 2012 und 2020 modelliert. Visualisiert und abgegrenzt wurden aufgrund ihrer Wärmebedarfsdichte u. a. Fernwärme-Hauptregionen (s. Karte 17).

Karte 17: Projekt „Austrian Heat Map“, Potenziale österreichischer Hauptregionen in Bezug auf Fernwärme

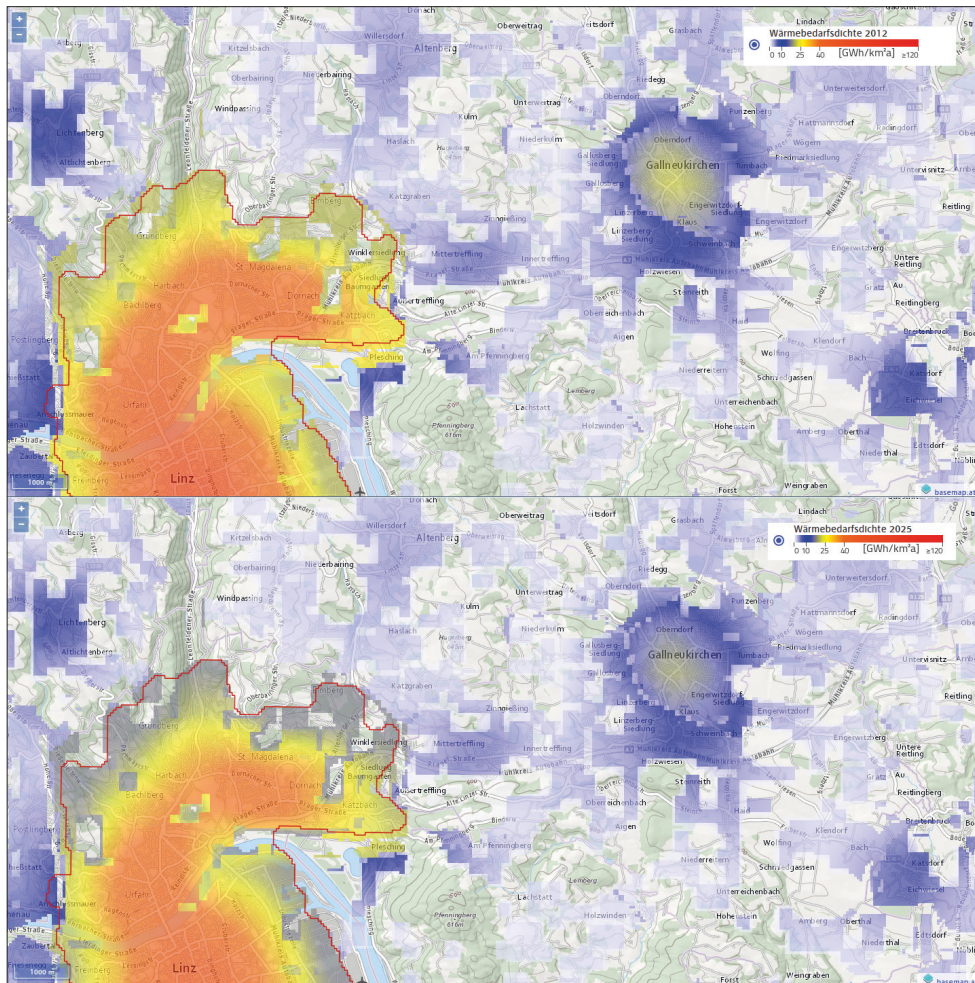


Quelle: e-think und EEG Energy Economics Group (2013)

Die Autorinnen und Autoren sind bei ihren Modellierungen von einem maximalen technischen Gesamtpotenzial mit Wärmedichten von über 10 GWh/km²/a und Anschlussgraden von 90 Prozent bzw. einem reduzierten technischen Potenzial (über 20 GWh/km²/a, Anschlussgrad 45 Prozent) ausgegangen. Dies erklärt, warum die Fernwärme-Hauptregionen (in der Karte 17 mit orangenen Randlinien markiert) flächig klein erscheinen, denn sie enthalten vor allem sehr dicht bevölkerte urbane Kern- und Zentrengelbiete, nicht aber die wesentlich größeren umgebenden Stadtumland- und Speckgürtelgebiete. Insgesamt steht die Studie für einen sehr vorsichtig-optimistischen Blick auf den zusätzlich machbaren Ausbaugrad der Fernwärme und damit auch der biogenen Rohstoffanteile, die zu Fernwärme werden.

Erschwert wird dieser Ausbau auch dadurch, dass zukünftig entlang der jeweiligen jährlichen Raten der thermischen Sanierungen eher mit einer leichten Abnahme der Wärmedichten zu rechnen ist, was die Wirtschaftlichkeit des Netzbetriebes, je nachdem wie stark die Wärmebedarfe sinken, zusätzlich erschweren wird. Umgekehrt sind bei Nachverdichtungen ebenso auch kleinräumige Steigerungen der Wärmenachfragedichte denkbar. Die folgenden beiden Zoomausschnitte in Karte 18 zeigen dazu einen Stadtrandbereich von Linz im Modellvergleich 2012 und 2025.

Karte 18: Projekt „Austrian Heatmap“, Zoom Wärmebedarfsdichten 2012–2025



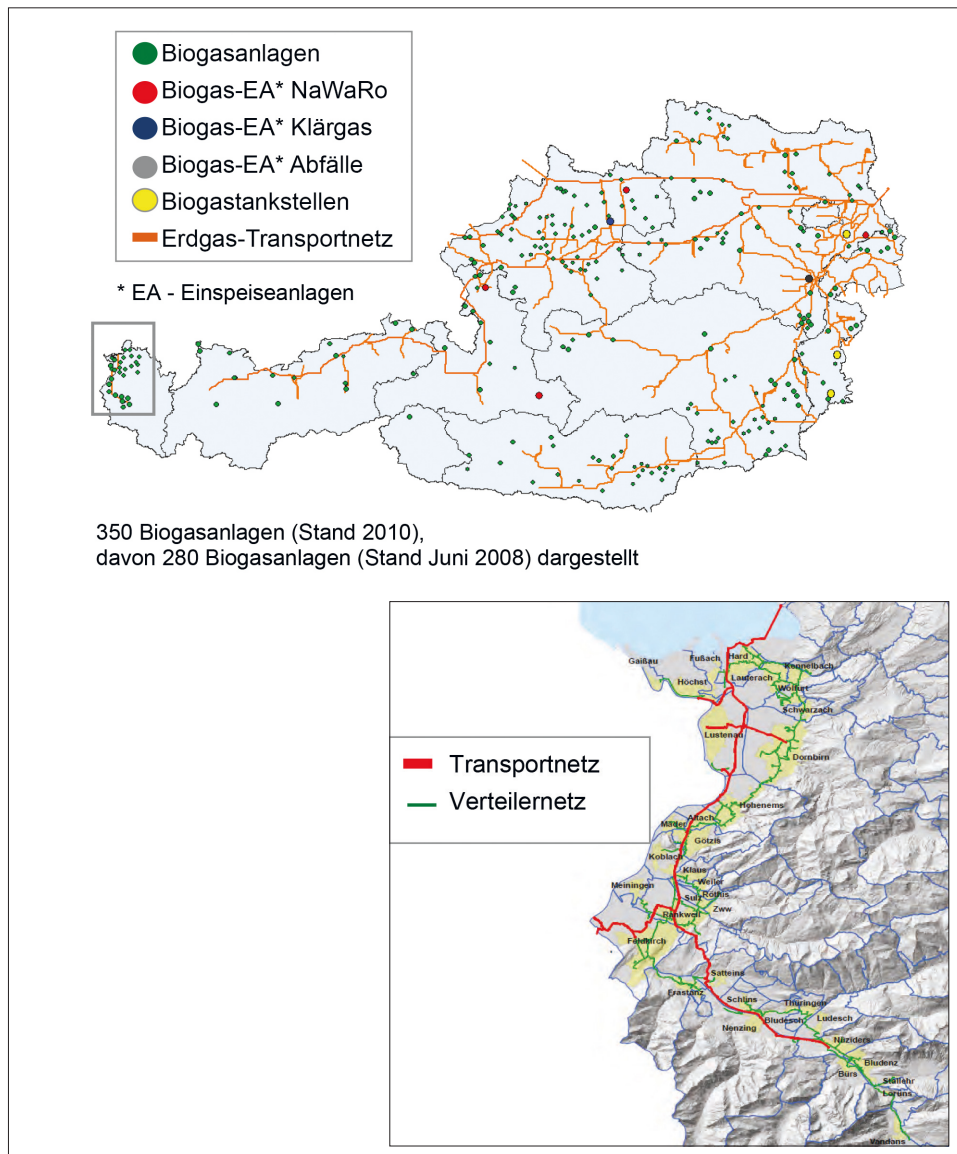
Quelle: e-think und EEG Energy Economics Group (2013)

Die nur geringen Abnahmen der Wärmenachfrage, die diese Ausschnitte sowohl für die dichten als auch für die weniger dichten Siedlungsstrukturen (etwa der Kernstadt Linz und den Umlandgemeinden) zeigen, könnten für sehr vorsichtige Annahmen der thermischen Sanierungsraten stehen, von denen die Autorinnen und Autoren in ihren Modellen ausgegangen sind. Künftig abnehmende Wärmenachfragedichten werden die Wirtschaftlichkeit von Wärmenetzen (unabhängig vom eingesetzten Brennstoff) erschweren, was auch keine günstige Voraussetzung für eine weitere Steigerung der Biomasseanteile darstellt.

Andere Versorgungszuwächse der Biomasse in der künftigen Wärmeversorgung sind aber auch ohne Veränderungen im Gebäudebestand, der an Wärmenetzen

angeschlossen ist, denkbar. Eine dieser Möglichkeiten wäre es, künftig in bestehende Erdgasnetze mehr aufgereinigtes Biomethan oder Wasserstoff einzuspeisen. Wo dieses Potenzial Sinn macht, zeigt die folgende Karte 19.

Karte 19: Biogas-Einspeiseanlagen und ihre Lage zum Erdgasnetz, 2008



Anmerkung: Das feinmaschigere Verteilergasnetz, das die Biogas-Einspeiseanlagen nutzen, ist nicht für ganz Österreich, sondern nur als Zoom für Vorarlberg abgebildet.

Quelle: Pötsch (2008)

Pötsch (2008) kommt beim künftigen Einspeisepotenzial zu folgenden Empfehlungen:

- 2008 gab es nur sechs Biogas-Einspeiseanlagen, davon vier Biogasanlagen mit nachwachsenden Rohstoffen, eine mit Klärgas und eine mit Abfällen betrieben. Viele weitere Biogasanlagen wären nahe genug am Erdgashaupt- und Verteilernetz und auch die Untertageerdgasspeicher in Nieder- und Oberösterreich hätten dafür noch genügend Kapazitäten.
- Aufgrund aktueller Einspeisetarife ist die Gaseinspeisung im Direktvergleich mit der Verstromung einfach nicht lukrativ genug. Für eine Trendwende wird es dazu dauerhafte Änderungen im Ökostromgesetz brauchen.
- Auch der Windstrom hat durch „Power-to-Gas“ (Umwandlung von Windstrom in Wasserstoff oder synthetisches Methan) ein beträchtliches Einspeisepotenzial, räumlich wird dies auch durch die Nähe der Erdgasspeicher im Marchfeld zu den leistungsstarken Windparks im östlichen Niederösterreich und im Nordburgenland begünstigt.

3.8.7 Flächenbedarfe bei der Energieproduktion durch Biomasse

Die Flächenbedarfe der Energieproduktion aus Biomasse setzen sich aus den Rohstoffpotenzialflächen und dem für die Kraftwerksgebäude benötigten Flächen zusammen. Die versiegelten Flächen der Kraftwerke und der zugehörigen Leitungsinfrastruktur beanspruchen nur einen sehr kleinen Teil der horizontal benötigten Gesamtfläche, die auch die Rohstoffpotenzialflächen enthalten. Zu den versiegelten Flächen gehört das Kraftwerksgelände inklusive der Zufahrtswege und des Flächenbedarfs für die Rohstofflagerhallen (Pellets, Hackschnitzel, Getreide, Stroh etc.).

Insbesondere bei leistungsstarken Biomassekraftwerken kann der Lagerplatz aufgrund der geringen Energiedichte der Biomasserohstoffe große Flächen benötigen, die nicht überall in bestehenden Siedlungsstrukturen mobilisierbar sind. Aus diesem Grund stehen viele Biomassekraftwerke im sogenannten ländlichen Raum häufig am Ortsrand.

Gerade im Kontext integrativer Energieraumplanung sind die gewohnten Begriffe „ländlich“ und „urban“ allerdings wenig hilfreich, denn in allen diesen Siedlungsstrukturen gibt es sehr unterschiedlich dichte Energienachfragemuster, die für die Optimierung der Systemgrenzen zwischen Energieangebots- und -nachfragegrenzen relevant sind.

Zur Illustration zeigt Tabelle 27 dazu drei Beispiele für Kraftwerksanlagen, die bewusst mit unterschiedlichen Größenordnungen hinsichtlich Leistung und Jahresarbeit gewählt wurden.

Tabelle 27: Luftaufnahmen und Fotos von Biomassekraftwerken (Hackschnitzel, Stroh, Bioethanol)

		
Waldhackschnitzelkraftwerk, Leistung 1,7 MW, Energie 10.000 MWh th/a, Rankweil, Vorarlberg Foto: Agrargemeinschaft Rankweil-Meinigen (2003)	Strohkraftwerk, Leistung 2,5 MW, Energie 8.333 MWh th/a, Stetteldorf, Niederösterreich Foto: Google (2016)	Österreichs einzige Bioethanolanlage, Energie 177.600 MWh/a, Pischeldorf, Niederösterreich Foto: AGRANA Stärke GmbH (2008)

Quelle: eigene Bearbeitung

Die Flächenbedarfe der Rohstoffpotenziale richten sich zunächst nach dem Energiegehalt der jeweiligen Pflanze pro Fläche und im Energieerzeugungsbetrieb nach der gewünschten Jahresarbeit an Wärme und Elektrizität. Dazu zeigt Tabelle 28 Flächenbedarfe verschiedener Biomassen nach der Anlagengröße.

Tabelle 28: Jährlicher Flächenbedarf unterschiedlicher Biomasseanlagen

	Energieertrag	Kleinanlage	Mittlere Anlage	Großanlage	Sehr große Anlage
	in GJ/(ha a) [in t/(ha a)]	in 1.000 ha			
Rückstände, Nebenprodukte, Abfälle					
Waldrestholz	15 [1]	9,0	90	900	3.600
Stroh ¹	50 [3,4] ¹	2,7	27	270	1.080
Energiepflanzen					
Kurzumtriebsholz ²	150 [10]	0,9	9	90	360
Miscanthus (Chinaschilf) ²	225 [15]	0,6	6	60	240
Mais ³	255 [22]	0,5			
Ganzpflanzensilage ³	175 [15]	0,8			

¹ Annahme: Rund zwei Drittel des gesamten Strohertrags stehen für die energetische Nutzung zur Verfügung.

² biogene Festbrennstoffe

³ Biogassubstrate

Quelle: Kaltschmitt, Hartmann und Hofbauer (2009, S. 182)

Die Abschätzung des Flächenbedarfs der Energieproduktion aus Biomasse, genauer gesagt der Entwurf eines „Bereitstellungskonzeptes“, wird in der Praxis häufig dadurch erschwert, dass Kraftwerksanlagen oft mit mehreren und unterschiedlichen Biomassefraktionen betrieben werden können, die aber nicht homogen sind, sondern in sehr unterschiedlicher Entfernung, Größe und Flächenmischung um das Kraftwerk liegen können. All diese Faktoren definieren das Einzugsgebiet und können zu einer Typisierung nach Vorzugsregionen, günstigen Regionen und ungünstigen Regionen führen. Dazu nennt die folgende Tabelle 29 einfache Typisierungen nach Kilometerebenen für verschiedene Biomassen.

Tabelle 29: Einzugsgebiete von Biobrennstoff für unterschiedliche Anlagengrößen

	Flächenbasis	Klein-anlage	Mittlere Anlage	Groß-anlage	Sehr große Anlage
	in %	in km			
Rückstände, Nebenprodukte, Abfälle ¹					
in Vorzugsregionen	80	3,3	10,4	32,8	65,6
in günstigen Regionen	60	3,8	12,0	37,8	75,7
in ungünstigen Regionen	40	4,6	14,7	46,4	92,7
Energiepflanzen – Festbrennstoffe ²					
in Vorzugsregionen	50	2,7	8,5	26,8	53,5
in günstigen Regionen	20	3,8	12,0	37,8	75,7
in ungünstigen Regionen	10	5,4	16,9	53,5	107,0
Energiepflanzen – Biogassubstrate ³					
in Vorzugsregionen	40	2,1			
in günstigen Regionen	20	2,9			
in ungünstigen Regionen	10	4,1			

¹ Stroh

² Kurzumtriebsplantagenholz

³ Mais

Quelle: Kaltschmitt, Hartmann und Hofbauer (2009, S. 182)

Anhand der Radien der Einzugsgebiete wird deutlich, dass die Dichte, Größe und Nähe der jeweiligen benötigten Rohstoffflächen den Radius bestimmen: Vorzugsregionen haben nahegelegene große Rohstoffflächen des benötigten biogenen Rohstoffmix, bei ungünstigen Regionen liegen diese weiter entfernt und/oder sind kleiner. „Günstig“ meint hierbei sowohl die räumliche als auch die gesamtwirtschaftliche Effizienz des Anlagenbetriebes.

3.8.8 Beispiele für Biomasseanlagen (nach dem Flächenertrag der Energieproduktion)

Die folgende Tabelle 30 zeigt ausgewählte Zahlenwerte zu Flächenbedarfen und den jeweiligen Energieerträgen verschiedener Biomassekraftwerke. Die Records sind absteigend nach dem Energieertrag pro Fläche sortiert. Die in der Spalte „Fläche“ genannten Werte beinhalten ausschließlich die für die Potenzialrohstoffe benötigte Fläche. In Kapitel 5.4 (Reflexion und Ausbaumöglichkeiten des Flächenbedarfskatalogs der Anlagen erneuerbarer Energieproduktion) werden ergänzend ausgewählte Anlagen nach ihrem Verhältnis zwischen den Kraftwerksflächenanteilen und der Größe der Potenzialrohstoffflächen verglichen. Im Unterschied zu Geothermie, Solarenergie und Windkraft sind bei den Biomassen diese beiden Flächenarten nicht lageident.

Die empirische Recherche zu den Flächenmengen, insbesondere der Biomasserohstoffe, war leider von sehr vielen Fehlschlägen und unvollständigen Records geprägt. Zwar war es möglich, von wenigen Anlagen durch Befragungen den realen Flächenbedarf zu erfragen, aber oft wussten auch die Kraftwerksbetreiber selbst nicht, woher die Rohstoffe kommen oder wie groß die entsprechenden Rohstoffflächen sind. Um im Forschungsdesign konsistent zu bleiben, wurden aber zumindest einige wenige Anlagen-Records gesammelt, auch wenn deren Menge und Validität nicht die Qualität der anderen Katalog-Sachkapitel (Geothermie, Solarenergie, Windkraft) erreicht hat. So konnte immerhin ein Mindestsample der flächenspezifischen Energieerträge dargestellt werden.

Tabelle 30: Beispiele für Biomasseanlagen nach dem Flächenenertrag der Energieproduktion

Name, Lage	Typ	Untertyp	Datenqualität	Fläche (ha)	Leistung (MW th)	Energie (Mwh th/a)	m ² /kWh th/a	kWh th/m ² /a	Rechnerische Volllaststunden (h/a)
Kurzumtrieb (Flächen-default o. Referenzanlage) ¹	Biomasse	agrarisch, Pappeln, Wärme	gut	100	3	7.040	0,142	7,04	2.347
Biogas (Flächen-default o. Referenzanlage) ¹	Biomasse	agrarisch, Mais (Biogas), Wärme	gut	100	3	5.900	0,169	5,90	1.967
Agrana Stärke (Bioethanol), Pischelsdorf, Niederösterreich	Biomasse	agrarisch, Bioethanol	gut	4.291	k. A.	177.600	0,242	4,14	k. A.
Waldbiomassekraftwerk Simmering, Wien	Biomasse	Forst, Hack-schnitzel, Wärme	gut	26.535	37	470.000	0,565	1,77	k. A.
Biomasseheizwerk Rankweil, Vorarlberg, Österreich	Biomasse	Forst, Hack-schnitzel, Wärme	gut	568	1,7	10.000	0,568	1,77	5.882
Strohkraftwerk und Nahwärme Stetteldorf, Niederösterreich	Biomasse	agrarisch, Stroh, Wärme	gut	600	2,5	8.333	0,720	1,39	3.333
Strohkraftwerk und Fernwärme Bockfließ, Niederösterreich	Biomasse	agrarisch, Stroh, Wärme	gut	500	2,5	6.944	0,720	1,39	2.778

¹ Flächen-default o. Referenzanlage bedeutet, dass sich die Energieertrags- und Flächenwerte nicht auf eine real existierende Anlage, sondern auf einen Standardwert aus der Fachliteratur beziehen.

Anmerkungen zu den Datengrundlagen der Flächenermittlung:

- Energieerträge pro Fläche bei Waldhackschnitzeln, Mais, Kurzumtrieb mit Pappeln (Stanzer, Novak, Dumke et al., 2010)
- Energieerträge pro Fläche bei Stroh und Bioethanol (Kaltschmitt, Hartmann und Hofbauer, 2009, S. 182)
- Flächen der Kraftwerksanlagen: eigene Messungen

Quelle: eigene Darstellung

3.8.9 Regelenergiefähigkeit von Energiegewinnung durch Biomasse und ihre Eignung zur Grundlast- und Spitzenlastversorgung

Im Vergleich zur Geothermie, Solarenergie und Windkraft haben die Biomassen die beste Regelenergiefähigkeit. Dies liegt daran, dass Biomassen bereits aus „gespeicherter Solarenergie“ bestehen (s. Kapitel 3.5.1 zur Prozesskette der Energieumwandlung und Nutzenergieformen bei der Geothermie). Energiesystemtechnisch bedeutet das, dass mit Biomassefeuerung schnell, kurz- oder langfristig auf kurze oder längere, geringe oder hohe Energienachfrageunterschiede reagiert werden kann. Diese Eigenschaft haben Geothermie, Solarenergie und Windkraft ohne zusätzliche Energiespeicherlösungen nur sehr bedingt.

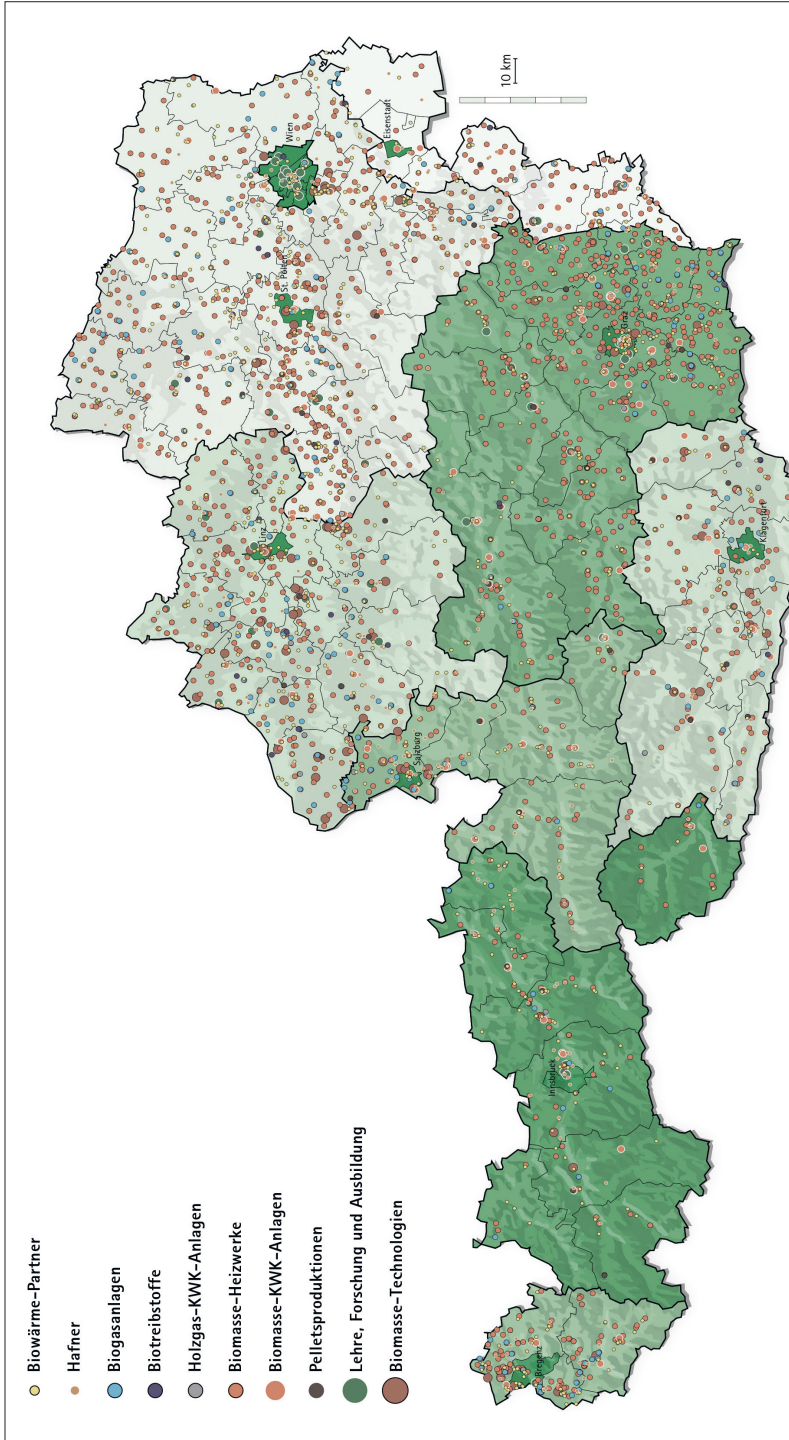
Biomasse eignet sich daher ausgezeichnet nicht nur für die Sicherstellung einer Grundlast- und Spitzenlastversorgung, sondern auch zur Kombination mit anderen erneuerbaren und nichterneuerbaren Energieträgern, weil deren „Unregelmäßigkeit“ sehr gut kompensiert werden kann.

Auch die maximale Spitzenlast- und Grundlastleistung eines Biomassekraftwerkes hat Limits, aber diese sind anlagen- und standorttechnisch und damit nicht durch die Verfügbarkeit der gelagerten biogenen Rohstoffe bedingt. Zwar können auch diese in Schwerlastzeiten (besonders in kalten Wintern) knapp werden, für diese seltenen Fälle haben die meisten Biomassekraftwerke jedoch meist einen mit Erdöl oder -gas befeuerten Reservekessel.

3.8.10 Skalierbarkeit der Energieleistung und -arbeit von Biomasseanlagen

Grundsätzlich haben Biomassebrenner eine sehr gute Skalierbarkeit: Es sind unterschiedlichste Leistungsklassen der verschiedenen Brenner- und Anlagenarten aus Serienproduktionen verfügbar. Die optimale Größe wird bei der Standortplanung eher von den Randbedingungen des gewünschten Energieertrages oder dem lokal und regional mobilisierbaren Rohstoffpotenzialangebot bestimmt und limitiert. In Kapitel 2.1 zur erneuerbaren Energieproduktion in Österreich wurde bereits beschrieben, dass die Bioenergien österreichweit knapp die Hälfte des gesamten erneuerbaren Endenergiebeitrages leisten. Der gesamte erneuerbare Anteil am Endenergieverbrauch betrug 2016 in Österreich 32 Prozent: der Biomasseanteil am Endenergieverbrauch umfasste dabei 7 Prozent, die übrigen Anteile entfielen auf Wasserkraft, Solarenergie, Geothermie, Umgebungswärme und Abfälle. Im Gegensatz zu diesen kleinen absoluten Beitragsmengen aus Biomasse vermittelt die folgende Karte 20 den räumlich völlig anderen Eindruck einer fast „flächendeckenden“ Präsenz von Biomassekraftwerken.

Karte 20: Bioenergie in Österreich, 2016



Quelle: Premeiter, Kahr und Liptay (2016, S. 26)

Die räumlich nahezu flächendeckende Präsenz der Bioenergieanlagen wird deutlich relativiert, wenn man nach den Leistungen der einzelnen Anlagen und aggregiert nach den Brennstoffsummenbeiträgen unterscheidet. Dazu zeigt die folgende Tabelle 31, wie sich die Mengenbeiträge der einzelnen erneuerbaren und nichterneuerbaren Brennstofffraktionen zueinander verhalten.

Tabelle 31: Fernwärme-Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen nach Leistungsklassen und Brennstoffen, 2013

Brennstoff	Summen der thermischen Nennleistungen (MW) je Leistungsklasse									Gesamtergebnis
	4-44	44-84	84-124	124-164	164-204	204-244	244-284	364-404	444-484	
Abfall	40	185				210				435
Biomasse	299									299
Erdgas	18	60	100	427	341	243	250	770	450	2.659
Kohle	17				200	230				447
Öl	35	50	120		200					405
Gesamtergebnis	408	295	220	427	741	683	250	770	450	4.244

Die Leistungsdaten enthalten ausschließlich netzgekoppelte Anlagen.

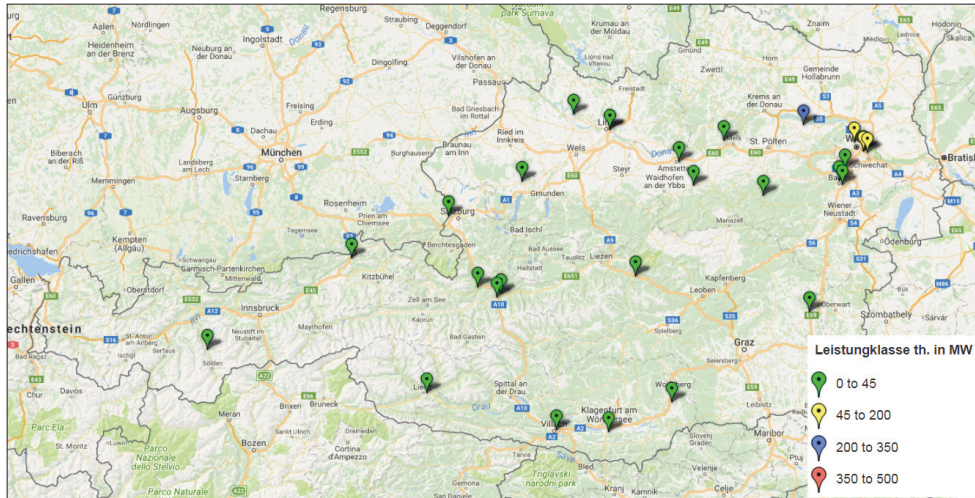
Quelle: Anlagendaten (e-think und EEG Energy Economics Group, 2013), eigene Bearbeitung (Klassifizierung und Pivot-Häufigkeitsauswertung)

In der obenstehenden Tabelle 31 sind Zusammenhänge zwischen absoluten und relativen Mengenverhältnissen der thermischen Leistungen erkennbar:

- 23 Biomassekraftwerke mit maximalen Leistungsklassen bis 45 MW tragen in Summe 7 Prozent bzw. 299 von 4.244 thermischen MW bei.
- Demgegenüber erreichen 20 fossil befeuerte Kraftwerke (Erdgas, Kohle, Öl) in den deutlich größeren Leistungsklassen in Summe 83 Prozent bzw. 3.510 von 4.244 thermischen MW.
- Die restlichen 10 Prozent der Leistungsbeiträge entfallen auf 5 abfallbefeuerte Kraftwerke; hierbei lässt die Datenquelle keine genaue Aufschlüsselung zwischen den erneuerbaren Anteilen (etwa den organischen Fraktionen des Hausmülls) und den nichterneuerbaren Anteilen zu.
- Bei den elektrischen Leistungsbeiträgen (hier nicht tabellarisch dargestellt, aber aus demselben Datensatz wie oben ausgewertet) sind die Beiträge noch stärker ungleichverteilt: 3 bzw. 2 Prozent Beiträge (129 bzw. 72 MW, 6 bzw. 27 Anlagen) aus Abfällen und Biomassen, 95 Prozent (4.661 MW in 27 Anlagen) aus Erdgas, Kohle und Öl.
- Noch wesentlich aussagekräftiger als die Leistungsanteile, aber leider in der Datenquelle nicht enthalten, wären die Wärme- und Elektrizitätsenergiemengen (Jahresarbeit in MWh_{th} und el/a).

Zur räumlichen Übersicht der thermischen Leistungsklassen visualisiert die folgende Karte 21 die Lagen der erneuerbaren und nichterneuerbaren befeuerten Kraftwerke.

Karte 21: Kraftwerksleistungsklassen und -standorte (Biomasse und Abfall), 2013

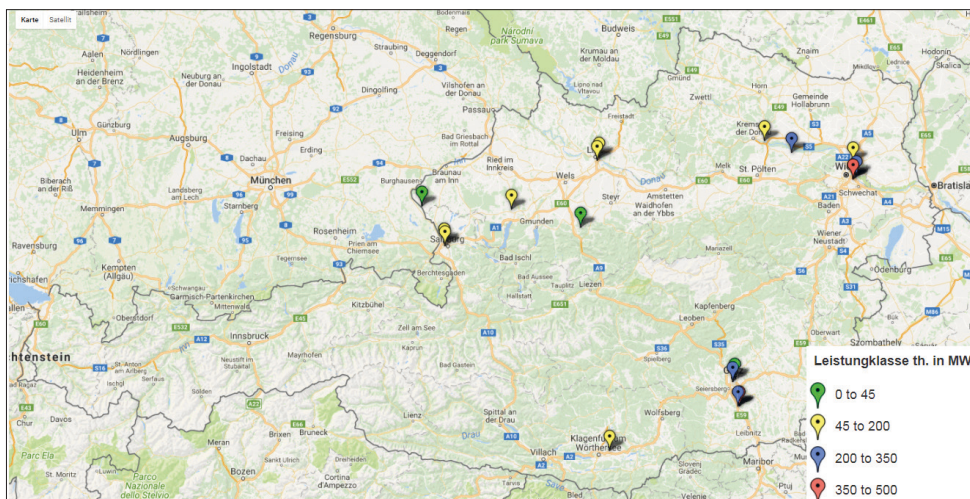


Anmerkung: Deutlich erkennbar sind die vier Müllverbrennungsanlagen mit Leistungsklassen zwischen 45 bis 200 MW (in der Karte mit gelben Icons): die drei Wiener Anlagen Spittelau, Pfaffenu und Simmering mit insgesamt 185 MW und das „stärkste“ österreichische Müllkraftwerk in Zwentendorf/Dürnrohr (blaues Icon). Alle anderen Standorte in der obenstehenden Karte sind biomassebefeuert und ausnahmslos aus der Leistungsklasse bis 45 MW.

Quelle: Basiskarte (Google, 2016), Energieanlagendaten (e-think und EEG Energy Economics Group, 2013) und eigene Darstellung (Verortung der Anlagen)

Als Pendant zu den eher dezentralen Lagen der Biomassekraftwerke zeigt die folgende Karte 22 ein räumlich deutlich konzentrierteres Bild der Lagen von Kraftwerken, die mit Erdgas, Öl und Kohle befeuert werden.

Karte 22: Kraftwerksleistungsklassen und -standorte (Erdgas, Öl und Kohle), 2013



Anmerkung: Die hier gezeigte Standortfilterung nach den Brennstoffen Öl, Kohle und Erdgas enthielt 2013 „nur“ noch sechs ganz oder teilweise ölbefeuerte Kraftwerke (Werndorf-Neudorf und Thondorf, Steiermark; Klagenfurt, Kärnten, Stilllegung 2015; St. Pölten Nord und Süd, Niederösterreich, sowie Salzburg Nord, Salzburg), „nur“ vier ganz oder teilweise kohlebefeuerte (Dürnrohr, VTP, Stilllegung 2015; EVN, Niederösterreich; Mellach, Steiermark; Riedersbach 2, Oberösterreich), alle anderen Standorte sind ausschließlich erdgasbefeuert.

Quelle: Basiskarte (Google, 2016), Energieanlagendaten (e-think und EEG Energy Economics Group, 2013) und eigene Darstellung (Verortung der Anlagen)

3.8.11 Flächenkonkurrenzen bei der Energiegewinnung durch Biomasse

Wegen der erwähnten empirischen Probleme bei der Flächenermittlung für die Katalog-Records zur Biomasse (s. Kapitel 3.8.8) können hier Aspekte sämtlicher Biomassen zur Flächenkonkurrenz nicht erörtert werden. Stattdessen erfolgt eine Bewertung der Biomassearten der wenigen Anlagen, bei denen die Flächenermittlung gelungen ist. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle 32 in den Spalten nach dem jeweiligen Konkurrenzaspekt angeführt. Dazu wird schlagwortartig erklärt, wie der jeweilige Konkurrenzgrad bedingt ist.

Tabelle 32: Qualitative Bewertung der Flächenkonkurrenzen zwischen der Energieerzeugung aus Biomassen (Betriebsphase) und anderen lageidenten Flächenfunktionen

Art erneuerbarer Energie und Endenergieform	Wohnfunktion	Orts- und Landschaftsbildfunktion	Naherholungsfunktion	Großräumige Tourismusfunktion	Sachgüter- und Dienstleistungsfunktion	Nahrungsmittelproduktion	Andere erneuerbare Energieproduktion
Forst, Hackschnitzel, Wärme	keine, nicht lageident	keine funktionale Beeinflussung	gering („Ausräumung“)	keine funktionale Beeinflussung	keine, bei ausschl. Verwertung mindervw. Anteile	keine (weil nicht lageident)	bei Kombination mit Windkraft
Kurzumtrieb, agrarisch, Pappeln, Wärme	keine, Nicht lageident	keine funktionale Beeinflussung	keine funktionale Beeinflussung	keine funktionale Beeinflussung	keine, nicht lageident	hoch	bei Kombination mit Windkraft und/oder Solarenergie
Agrarisch, Bioethanol, Treibstoff (Annahme: Rohstoff Weizen und Zuckerrüben)	keine, nicht lageident	keine funktionale Beeinflussung	keine funktionale Beeinflussung	keine funktionale Beeinflussung	keine, nicht lageident	hoch	bei Kombination mit Windkraft und/oder Solarenergie
Agrarisch, Stroh, Wärme	keine, nicht lageident	keine funktionale Beeinflussung	keine funktionale Beeinflussung	keine funktionale Beeinflussung	Stroh ist auch als Streu oder Tierfutter einsetzbar	Stroh ist auch als Streu oder Tierfutter einsetzbar	bei Kombination mit Windkraft und/oder Solarenergie
Agrarisch, Mais (Biogas), Wärme	keine, nicht lageident	keine funktionale Beeinflussung	keine funktionale Beeinflussung	keine funktionale Beeinflussung	keine, nicht lageident	hoch	bei Kombination mit Windkraft und/oder Solarenergie

Konkurrenzgrad:

keine	gering	indifferent	mittel	hoch
-------	--------	-------------	--------	------

Indifferent: Der Konkurrenzgrad kann verschiedene Ausprägungen (von „kein“ bis „hoch“) einnehmen.

Quelle: eigene Darstellung

Zu diesen Bewertungen in Tabelle 32 sind folgende Erläuterungen und Relativierungen nötig:

- Bei den hier kategorisierten Biomassen werden weder die Orts- und Landschaftsbildfunktion noch die großräumige Tourismusfunktion oder die Naherholungs- und Wohnfunktion konkurrenziert, weil kein funktionaler Einfluss durch die Energieerzeugung entsteht und die Potenzialrohstoffflächen nicht lageident mit Wohngebieten sind.
- Bei Bioethanol und Mais wird bei der hohen Konkurrenzeinstufung zur Nahrungsmittelproduktion von 100 Prozent Flächeneinsatz für die Wärmeerzeugung ausgegangen. Grundsätzlich wäre aber auch dieses Konkurrenzverhältnis relativierbar, weil Kombinationen denkbar sind (z. B. 10 Prozent Nutzung für Wärmeerzeugung, 90 Prozent verbleiben für die Nahrungsmittelproduktion). Es handelt sich somit nicht immer um eine Entweder-oder-Situation. Grundsätzlich ist jede Verbrennung von Nahrungsmitteln oder die Konkurrenzierung der Nahrungsmittelfunktion als ethisch höchst verwerflich einzustufen, wobei es nicht nur um lokale, sondern auch um globale Systemgrenzen geht. Searchinger, Edwards, Mulligan et al. (2015) argumentieren etwa, dass global 25 bis 50 Prozent der Anbauflächen für Bioethanol nicht durch andere Flächen für Nahrungsmittelproduktion ersetzt werden, dagegen kritisiert Lane (2015) bei dieser Argumentation ein völlig falsches Modell von Systemgrenzen und negiert damit die Konkurrenz Ethanol – Nahrungsmittel.
- Beim Stroh besteht eine geringe Konkurrenz zur Nahrungsmittel- und Sachgüterproduktion, weil Stroh auch als Tierfutter und/oder Streu im Viehhaltungsbetrieb eingesetzt wird.
- Die Flächenkonkurrenz zu lageidenten, anderen als biogenen erneuerbaren Energieproduktionsarten ist als indifferent einzustufen. Windkraftanlagen in Wäldern etwa konkurrenzieren nur auf ihren versiegelten Flächenanteilen (Fundamente, Wartungsflächen, Zufahrtswege, Transformatorengebäude etc.) die Biomasseproduktion und die anderen Waldfunktionen, der Konkurrenzgrad richtet sich daher nach den Größenverhältnissen dieser Flächen zur gesamten Waldfläche.
- Noch unterschiedlicher – und daher als indifferente Konkurrenz einzustufen – sind die Kombinationsmöglichkeiten verschiedener erneuerbarer Energieproduktionsarten auf dem Ackerland. In Österreich stehen große Windparks meist ohnehin auf landwirtschaftlichen Flächen, aber zusätzlich wären auch der Einsatz von Solarenergiekollektoren und/oder die Kombination mit Geothermie denkbar, was andere Konkurrenzeinstufungen der jeweiligen Funktionen, Flächenanteile und -konkurrenzen mit sich bringen würde.

3.8.12 Umweltwirkungen von Energieproduktion aus Biomasse

Bei Biomasse spielen nicht nur Umweltwirkungen des Kraftwerksbetriebes, sondern – deutlicher als bei Geothermie, Solarenergie und Windkraft – die Entfernung zwischen der Potenzialquelle und dem Kraftwerk für die gesamte Umweltbilanz eine wesentliche Rolle. Wenn das Kraftwerk nicht unmittelbar bei der Rohstoffquelle steht, fallen Transportwege an. Der Transportaufwand richtet sich nicht nur nach der Entfernung, sondern auch nach der Energiedichte des Rohstoffs. Die folgende Tabelle 33 zeigt,

dass Rapskörner zum Beispiel (obwohl Raps unter den biogenen Brennstoffen dieser Darstellung der flächeneffizienteste Brennstoff ist) bei der Energiedichte nur den halben Wert von Heizöl erreicht. Bei einzelnen biogenen Brennstoffen wie den Pellets kann die Energiedichte durch vorgelagerte Behandlungs- und Verdichtungsschritte erhöht werden. Aber auch diese Arbeitsschritte benötigen Energie, was beim EROEI (s. Kapitel 3.2 zu Erntefaktoren bzw. Energy Returned of Energy Invested bei der Energiegewinnung) im Vergleich zu anderen erneuerbaren Energien zu eher kleinen Erntefaktoren führt.

Tabelle 33: Transportparameter von biogenen und fossilen Brennstoffen, 2008

Umwandlung des Materials	Feuchtigkeit (% w/w)	Energie- gehalt (MJ/kg) ¹	Dichte (kg/m ³) ¹	Energiedichte (MJ/m ³) ¹
Verbrennung				
Stroh	15	15	100–135	1.500–2.025
Weizen	15	15	670–750	10.050–11.250
Raps	9	24,6	700	17.220
Hackschnitzel	40	10,4	235	2.440
Scheitholz (Buche)	20	14,7	400–450	5.880–6.615
Holzpellets	6	14,4	660	9.500
Biogasproduktion				
Grassilage	60–70	3,7	600–700	2.220–2.590
Maissilage	65–72	4,2	770	3.230
städtische organische Abfälle	70	2,4	750	1.800
Dünger	95	0,7	1000	700
Heizöl, leicht	0	42,7	840	36.000
Steinkohle	0	35,3	800–930	28.000–33.000

¹ Alle Zahlen beziehen sich auf frisches Material.

% w/w Wassergehalt an der Gesamtmasse in Prozent

MJ/kg Energiegehalt Megajoule pro Kilogramm

kg/m³ Dichte in Kilogramm pro Kubikmeter

MJ/m³ Energiedichte in Megajoule pro Kubikmeter

Quelle: Gwehenberger und Narodoslawsky (2008)

Häufig wird Biomasse in Wärmenetzen eingesetzt. Die folgende Tabelle 34 vergleicht anschaulich dazu die bekannte Tatsache, dass sich Elektrizität mit erheblich geringeren Verlusten über lange Strecken transportieren lässt, wogegen bei Wärme bereits Transportweiten mit mehr als 10 Kilometern erhebliche wirtschaftliche Verluste mit sich bringen.

Tabelle 34: Effizienzaspekte nach Reichweiten netzgebundener Energieträger

Energieform		Dichte	Reichweite	Einspeisung	Nutzer
Elektrizität	Niederspannung	sehr hoch	10 km	überall	überall
	Mittelspannung	hoch	50 km	überall	überall
	Hochspannung	mittel	500 km	international, Stadt, suburbaner Raum, Kleinstadt	Stadt, suburbaner Raum, Kleinstadt
Gas	Niederdruck	sehr hoch	20 km	Stadt, suburbaner Raum, Kleinstadt, punktuell auf dem Land	Stadt, suburbaner Raum, Kleinstadt
	Hochdruck	sehr gering	1.000 km	international, Stadt	Stadt
Wärme		sehr hoch	10 km	überall	überall
Öl		sehr gering	1.000 km	international, Stadt	Stadt

Quelle: Stöglehner, Narodoslowsky, Steinmüller et al. (2011, S. 219)

In dem Artikel „The Challenge of Utilising Bio-Resources: A Regional Perspective“ (Narodoslowsky, Maier, Kollmann und Eder, 2015) wurden dazu folgende raumrelevanten Tatsachen formuliert, die Limits für die Form und Größe von Wärmenetzen in Siedlungsstrukturen definieren:

- Die Wärmebedarfsdichte (sowohl über die Fläche als auch pro Länge der Wärmeleitungen) ist entscheidend, weil bei einem zu geringen Abnahmewert die Verluste über 25 Prozent steigen können. Siedlungsstrukturell bedeutet das bei künftig tendenziell abnehmender Wärmenachfrage pro Wohngebäude, dass für die dauerhafte Wirtschaftlichkeit des Wärmenetzbetriebes unbedingt Großkunden (wie etwa Schulen, öffentliche Gebäude, Industriebetriebe oder Bürokomplexe) benötigt werden.
- Auch die Leitungsdurchmesser spielen bei der Form des Wärmenetzes eine Rolle, weil die Wärmeverluste bei kleineren Durchmessern größer sind als bei großen.
- Zudem hat biogenes Methan (oder auch Wasserstoff) Zusatzpotenzial in bestehenden Erdgasleitungen, weil diese Gase (entsprechend vorgereinigt) eingespeist werden können. Dies erlaubt eine Steigerung des erneuerbaren Versorgungsanteiles im Netz ohne jede Notwendigkeit von Veränderungen in der Heiztechnik der wärmenachfragenden Gebäude. Die Biogaseinspeisung ist dadurch besonders für dicht besiedelte Städte eine interessante Option, auch weil Städte häufig nur kleine eigene (oder jedenfalls zur Erfüllung der Wärmenachfrage bei Weitem nicht ausreichende) biogene Rohstoffpotenzialflächen haben.

Beim nichtleitungsgebundenen Transport von Biomassen hängt der Transportaufwand (und die damit verbundenen Umweltwirkungen) davon ab, wie effizient der Transport erfolgen kann. Die kritische Ladedichte beschreibt dabei das Verhältnis zwischen Masse und Volumen eines Transportmittels in Kilogramm pro Kubikmeter, d. h., welche Masse ein Fahrzeug maximal pro Volumen bewegen kann. Gemeinsam

mit dem möglichen Gesamtvolumen des Fahrzeuges ergibt sich der Treibstoffaufwand in Megajoule pro transportierte Tonne und Kilometer. Die folgende Tabelle 35 zeigt dazu, dass Eisenbahntransporte um den Faktor 2 bis 6 effizienter transportieren können als Traktoren und Lastkraftwagen. Schiffstransporte (hier nicht dargestellt) hätten nochmals einen erheblich kleineren Treibstoffaufwand pro transportierte Tonne und Kilometer als Züge und alle Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren.

Tabelle 35: Netzeigenschaften netzgebundener Energieträger

Transportmittel	Kritische Ladedichte	Treibstoffaufwand	Anhängervolumen
Traktor	720 kg/m ³	1,2 MJ/tkm	18 m ³
LKW	300 kg/m ³	1,4 MJ/tkm	94 m ³
Eisenbahn	390 kg/m ³	0,2 bis 0,7 MJ/tkm	135 m ³

Quelle: Bio Energy Train (2016)

Wenn man davon ausgeht, dass Effizienz bedeuten würde, möglichst wenig Transportaufwand zu „verschwenden“, lassen sich für verschiedene Biomasse- und Fahrzeugkombinationen maximal gewollte Reichweiten für Biomassetransporte andeuten. Narodoslowsky (2016) geht dazu von maximal einem „gewollten“ Prozent des Energiegehaltes des Transportgutes aus. Daraus ergeben sich folgende Transportweiten, die die Grenzen einer Biomasseenergieregion darstellen:

- Traktor: Stroh 12 km, Gülle 5,7 km, Maissilage 18 km
- Lkw: Stückholz 100 km, Hackschnitzel 40 km
- Eisenbahn: Holzpellets 475 bis 525 km

Die folgende Tabelle 36 zeigt dazu eine Musterrechnung des Strohkraftwerks Stetefeldorf (s. Katalog-Records in Kapitel 3.8.3 Beispiel für Biomasseanlagen nach Lage und Typ) zu CO₂-Gehalten der Transportstrecken im Vergleich zu einer fossilen Wärmeerzeugung. Die angenommenen Musterfahrtweiten liegen bei 10, 100 und 150 Kilometern. Dieses Beispiel zeigt, wie komplex die genaue Berechnung des Transportaufwands bei Biomasse werden kann. Zusätzlich erschweren die vielen verschiedenen Volumendimensionen bei Biomassen (u. a. Schüttmeter, Raummeter, tatro, d. h. „Tonnen absolut trocken“, Festmeter usw.) solche Rechenwege.

Tabelle 36: Musterrechnung zum CO₂-Gehalt eines Strohtransportes vs. das eingesparte CO₂ durch fossile Wärmeerzeugung

Aspekt	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Einheit
Annahme durchschnittlicher Fahrstrecke	10	100	150	km/Fahrt
Gesamte Traktorenfahrleistung	5.000	50.000	75.000	km/a
Dieselbedarf bei 10 l pro 100 km	500	5.000	7.500	L/a
CO ₂ (bei 2,62 kg CO ₂ pro Liter Diesel)	1.310	13.100	19.650	kg CO ₂ /a
CO ₂ (bei 2,62 kg CO ₂ pro Liter Diesel)	1,31	13,1	19,65	t CO ₂ /a
Durch Stroheinsatz eingespartes CO₂ bei der Wärmeerzeugung				
Wärmeproduktion	8.333			MWh/a
Energiegehalt Diesel	11,8			kWh/kg
Diesel für Wärmeproduktion	593.197			L/a
CO ₂ (bei 2,62 kg CO ₂ pro Liter Diesel)	1.554.175			kg CO ₂ /a
CO ₂ (bei 2,62 kg CO ₂ pro Liter Diesel)	1.554			t CO ₂ /a
Verhältnis Transport-CO₂ zu eingespartem CO₂ in %	0,08 %	0,84 %	1,26 %	

Quelle: eigene Darstellung

Zu den Umweltwirkungen des Transportes von Biomasse mit Fahrzeugen, die fossile Brennstoffe verwenden (insbesondere Diesel-LKWs), ist es wichtig, zu berücksichtigen, dass neben dem CO₂ auch andere Emissionen beim Transport entstehen: etwa Stick- und Schwefeloxide, Lärm und Staub. Beim Landtransport sind künftig erheblich geringere Emissionswerte denkbar, wenn in mittelbarer Zukunft elektrisch betriebene Nutzfahrzeuge verfügbar sind: Die Emissionen im Fahrbetrieb wären demnach so umweltfreundlich wie aus den Primärenergiearten der Elektrizitätserzeugung möglich. Hierbei hat gerade Österreich mit aktuell bereits 70 Prozent erneuerbar erzeugtem Strom gute Rahmenbedingungen im Vergleich zu anderen Ländern, die noch erheblich geringere erneuerbare Anteile in ihrem Strommix haben.

Neben dem Transport- und Umwandlungsaufwand, den die verschiedenen Biomassen bis zur Energieumwandlung aufweisen, sind auch die Emissionen der Biomasseverbrennung selbst, auch im Vergleich zu nichterneuerbaren Ressourcen, hoch umweltrelevant. Diese Emissionsunterschiede sind in Tabelle 37 deutlich erkennbar, auch wenn die Gesamtvergleichbarkeit zwischen erneuerbaren und nichterneuerbaren Brennstoffen und die teilweise sehr große Varianz einzelner Biomasseemissionswerte in dieser Quelle nicht vollständig erklärt wird: Die Durchschnittswerte sind mit realen, anlagenspezifischen Messungen vermischt, die Emissionsdaten sind von Anlagen aus dem Jahr 2000 und somit nicht mehr dem Stand der heutigen Brenner- und Filtertechnik entsprechend.

Tabelle 37: Durchschnittliche und anlagenspezifische Emissionsfaktoren

Für Heizwerke über 50 MW (th)

Brennstoff	SO ₂ kg/TJ	NO _x kg/TJ	C _x H _y kg/TJ	CO kg/TJ	Staub kg/TJ
Steinkohle	21	53	1	4	1
Heizöl, schwer	74	69	6	6	2
Erdgas	<1	28	2	8	<1

Für Heizwerke unter 50 MW (th)

Brennstoff	SO ₂ kg/TJ	NO _x kg/TJ	C _x H _y kg/TJ	CO kg/TJ	CO ₂ kg/TJ
Holz und Biomasse	11	143	7	72	0
Heizöl, extra leicht	45	65	6	10	75.000
Heizöl, leicht	92	159	1	10	78.000
Heizöl, mittel	196	159	10	15	78.000
Heizöl, schwer	398	317	10	15	78.000
Öl (gewichtetes Mittel)	125	175	2	11	78.000
Erdgas	< 1	41	2	5	55.000

Grenz- und Messwerte von Anlagen der EVN für CO₂, NO_x und Staub (Auszüge)

Name	Leistung	Brennstoff	CO (mg/m ³) ¹	NO _x (mg/m ³) ¹	Staub (mg/m ³) ¹
Fernheizwerk Mank	1,5 MW (th)	Biomasse (Rinde und Hackgut)	18 250	198 200	11,5 120
Fernheizwerk Pyrha	1,5 MW (th)	Biomasse (Rinde und Hackgut)	119 250	207 300	116 150
Fernheizkraftwerk Allentsteig	5 MW (th)	Biomasse (Rinde und Waldhackgut)	74 100	115 285	1,6 50
Fernheizkraftwerk Lasee	3,15 MW (th)	Stroh	166 250	122 300	5 20

¹ mg/m³ Milligramm pro Kubikmeter (Messwert | Grenzwert)

Quelle: Umweltbundesamt Österreich (2004, S. 64 f)

Die Emissionsunterschiede der drei Tabellen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Biomasse punktet gegenüber den nichterneuerbaren Brennstoffen durch die internationale Konvention von „Null CO₂“ bei der Verbrennung. Allerdings sind bei der Null keinerlei CO₂-Emissionen aus den „Vorketten“ der Energiegewinnung berücksichtigt. Zu den Vorketten gehören u. a. der Aufbereitungs- und Transportaufwand. In den letzten Jahren mehren sich allerdings international Stimmen von Forscherinnen und Forschern wie Greene (2014), die die CO₂-Neutralität der Biomasseverbrennung überhaupt stark relativieren oder auch ganz aberkennen.
- Bei Schwefeloxiden (SO_x), Stickoxiden (NO_x), Kohlenwasserstoffen (C_xH_y), Kohlenstoffmonoxid (CO) und bei Staub zeigt diese Datenquelle das Erdgas „sauber“ als die Biomassen.
- Steinkohle, Erdgas und Öl schneiden bezüglich CO₂ schlechter ab, aber bei den anderen Emissionsarten teilweise auch schlechter oder auch besser als Biomasse.
- Die große Varianz zwischen anlagenspezifischen Werten, auch zwischen Mess- und Grenzwerten (s. dritter Tabellenteil in Tabelle 37), ist aus der Quelle heraus (und ohne nähere Erklärungen) nicht nachvollziehbar. Wahrscheinlich sind die sehr varianten Emissionswerte durch unterschiedliche Rauchgas- und Filterungstechniken bedingt.

Zusammenfassend zu Kapitel 3.8 (Energiegewinnung aus Biomasse) bietet die folgende Tabelle 38 einen Überblick über die Umweltwirkungen der Energieerzeugungsphase aus Biomassen.

Tabelle 38: Qualitative Bewertung der Umweltwirkungen durch Energieproduktion (Betriebsphase) aus Biomasse

Art erneuerbarer Energie und Endenergieform	Visuelle Wirkungen	Ökologische und mikro-klimatische Wirkungen auf den Potenzialflächen	Emissionen: CO ₂	Emissionen: NO _x , SO _x , C _x H _y , Feinstaub	Emissionen: Lärm	Emissionen: Rohstoff-Transport
Forst, Hackschnitzel, Wärme	visuelle Veränderungen nur durch die Kraftwerksanlagen	keine Veränderungen bzw. kein Unterschied zur nichtenergetischen Verwertung	keine, deutlicher CO ₂ -Einsparungseffekt gegenüber nichterneuerbarer Energieproduktion	vorhanden	Lärmemissionen (Kraftwerksbetrieb) vorhanden	abhängig von Transportweite und -volumen
Kurzumtrieb, agrarisch, Pappeln, Wärme	visuelle Veränderungen nur durch die Kraftwerksanlagen	keine Veränderungen bzw. kein Unterschied zur nichtenergetischen Verwertung	keine, deutlicher CO ₂ -Einsparungseffekt gegenüber nichterneuerbarer Energieproduktion	vorhanden	Lärmemissionen (Kraftwerksbetrieb) vorhanden	abhängig von Transportweite und -volumen
Agrarisch, Bioethanol, Treibstoff/kinetische Energie (Annahme: Rohstoff Weizen und Zuckerrübe)	visuelle Veränderungen nur durch die Kraftwerksanlagen	keine Veränderungen bzw. kein Unterschied zur nichtenergetischen Verwertung	keine, deutlicher CO ₂ -Einsparungseffekt gegenüber nichterneuerbarer Energieproduktion	vorhanden	Lärmemissionen (Kraftwerksbetrieb) vorhanden	abhängig von Transportweite und -volumen
Agrarisch, Stroh, Wärme	visuelle Veränderungen nur durch die Kraftwerksanlagen	keine Veränderungen bzw. kein Unterschied zur nichtenergetischen Verwertung	keine, deutlicher CO ₂ -Einsparungseffekt gegenüber nichterneuerbarer Energieproduktion	vorhanden	Lärmemissionen (Kraftwerksbetrieb) vorhanden	abhängig von Transportweite und -volumen
Agrarisch, Mais (Biogas), Wärme	visuelle Veränderungen nur durch die Kraftwerksanlagen	keine Veränderungen bzw. kein Unterschied zur nichtenergetischen Verwertung	keine, deutlicher CO ₂ -Einsparungseffekt gegenüber nichterneuerbarer Energieproduktion	vorhanden	Lärmemissionen (Kraftwerksbetrieb) vorhanden	abhängig von Transportweite und -volumen

Bewertungsstufen der Umweltwirkungen:

positiv	gering positiv	indifferent	gering negativ	negativ
---------	----------------	-------------	----------------	---------

Indifferent: Die Umweltwirkung kann verschiedene Ausprägungen von „positiv“ bis „negativ“ einnehmen.

Quelle: eigene Darstellung

Zu diesen Bewertungen sind folgende Erläuterungen bzw. Relativierungen nötig:

- Es fällt auf, dass die hier genannten Biomassen je Bewertungskategorie sehr ähnlich einzuschätzen sind und die Umweltwirkungen vor allem durch den Kraftwerksbetrieb und die Transportaufwände entstehen.
- Beim CO₂ ist die Unterscheidung zwischen der Klimaneutralität des biogenen Rohstoffes selbst und den Emissionen des Transportaufwands wichtig, weil sie (wie zuvor veranschaulicht wurde) nach Entfernung, Energiedichte des Rohstoffs, Verkehrsmittel usw. eine sehr große Varianz entfalten können und daher hier nur als indifferent zu bewerten sind.
- Gerade bei den Umweltwirkungen wäre eine Ausweitung auf weitere biogene Rohstoffe interessant gewesen, war aber aus empirischen Problemen heraus nicht möglich. Tierische Gülle und andere organische Abfälle haben zwar (im Vergleich zu den hier gezeigten Biomassen) einen geringeren Energieertrag pro Fläche, aber sie emittieren u. a. Methan, welches in CO₂-Äquivalenten laut Paschotta (2014) einen 25-mal höheren Treibhauseffekt hat.

3.8.13 Zusammenfassende Erkenntnisse zum Flächenbedarf von Biomasseanlagen (m²/kWh/Jahr)

Die eingangs gestellte Forschungsfrage nach dem Flächenbedarf (m²/kWh/Jahr) ausgewählter erneuerbarer Energieträger (Geothermie, Solarenergie, Windkraft, Biomassen) und den standörtlichen Energieertragsvarianzen kann durch Beispiele von Biomasseanlagen nur ansatzweise und nicht zufriedenstellend beantwortet werden. Die Gründe lassen sich wie folgt darlegen:

- Die in den Records verwendeten Datenquellen dokumentierten nur in Einzelfällen die horizontale Fläche der biogenen Potenzialrohstoffe. Um trotzdem zu spezifischen Werten zu gelangen, wurden bei den Records entweder Default-Werte (vorgegebene Standardwerte) aus der Fachliteratur eingesetzt oder die Anlagenbetreiber persönlich befragt.
- Besonders schwierig gestaltete sich die Abschätzung der Wärmeezeugung aus forstlicher Biomasse: Hier wussten auch die Anlagenbetreiber nicht, woher genau und aus welchen Entfernungen die Biomassen geliefert werden.
- Insgesamt hat der Anlagenkatalog sowohl bei der Anzahl der Records als auch bei der Vielfalt der biogenen Rohstoffe deutlich zu wenig Aussagekraft.

Unter den wenigen mit „guter Datenqualität“ eingestuften Records bewegen sich die flächenspezifischen Energieerträge zwischen 1,7 kWh/m²/a (Stroh) und 7 kWh/m²/a (Pappeln im Kurzumtrieb). Dazwischen liegen Mais (5,9 kWh/m²/a), Bioethanol (1,4 kWh/m²/a) und Waldhackschnitzel (1,7 kWh/m²/a).

Zu den biogenen Rohstoffen, zu denen keine kraftwerks- und flächenspezifische Energieerträge gefunden werden konnten, gehören u. a. die tierische Gülle (auch Wirtschaftsdünger), Mehrfruchtbewirtschaftungsformen (zwei oder drei Feldfrüchte pro Jahr), Miscanthus (Chinaschilf) und Grünschnitt aus der Viehwirtschaft und der Bewirtschaftung von Parks und Gärten sowie vom Begleitgrün von Straßen- und Schienenanlagen.

4 Ergebnisse: Erneuerbare Energieproduktion im Flächenvergleich

Bisher wurde für vier Arten der erneuerbaren Energieproduktion (Geothermie, Solar-energie, Windkraft und Biomassen) beschrieben, wie die Prozesskette der Energieumwandlung funktioniert, was die Energieerträge pro Potenzialfläche beeinflusst und welche Flächenkonkurrenzen und Umwelteffekte dabei zu beachten sind. In Kapitel 4 werden diese Energieträgereigenschaften integrativ zusammengefasst und die Zahlenwerte aus dem Flächenbedarfskatalog der Anlagen erneuerbarer Energieproduktion (Kapitel 3) mit Zahlenwerten aus der Fachliteratur verglichen.

4.1 Vergleich der Katalogwerte kWh/m²/a bei Anlagen mit erneuerbarer Energieproduktion

Die bisherigen Kapitel zu den einzelnen erneuerbaren Energieträgern werden nun vergleichend bewertet. Dazu zeigt die folgende Tabelle 39 Flächen-, Leistungs- und Arbeitswerte in Anlagen mit erneuerbarer Energieproduktion der Geothermie, Solar-energie, Windkraft und Biomasse. Die Records sind absteigend nach der Flächen-ertragseffizienz sortiert, d. h., die Anlage mit der höchsten Flächenproduktivität steht an erster Stelle. Ausgewählt wurden ausschließlich Records mit guter Datenqualität, die auch in den bisherigen Sachkapiteln aufgenommen sind. Zunächst folgen Anlagen der Endenergieart Wärme, danach Anlagen mit der Endenergieart Elektrizität.

Es zeigt sich folgendes Energieertragsranking bei dem Wert kWh th/m²/a:

1. Solarthermie vollflächig-gebäudeintegriert
2. Solarthermie, aufgeständerte Kollektoren
3. Seichte Geothermie, Tiefsondenfelder
4. Seichte Geothermie, Flachkollektorenfelder
5. Biomassen, nach Flächeneffizienz absteigend: Pappeln im Kurzumtrieb, Biogas aus Mais, Bioethanol, Waldhackschnitzel, Stroh

Beim Ranking sind zu den flächenbezogenen Energieertragswerten auch die Unterschiede der Volllaststunden zu berücksichtigen. Wären zwei Anlagen in der Leistung und der Energiepotenzialfläche ident, nicht aber bei den Volllaststunden, würde die Anlage mit der höheren Volllaststundenzahl beim Flächenertrag flächeneffizienter wirken, obwohl das nicht stimmt, denn bei einer Berechnung auf 1.000 Stunden „normiert“ hätten beide Anlagen denselben Wert bei kWh/m²/a. Solche Normierungen wären eine interessante Fortsetzungsaufgabe für den Flächenbedarfskatalog, weil die verschiedenen Anlagen noch besser vergleichbar wären.

Tabelle 39: Flächenertragswerte aus dem Katalog der Anlagen erneuerbarer Energieproduktion (Wärme)

Benennung der Anlage	Typ	Untertyp	Energiepotenzialfläche (ha)	Thermische Leistung (MW)	Energie thermisch (MWh/a)	kWh/m ² /a	Thermische Volllaststunden h/a
Solarthermie-Kleinanlage, Wien, Österreich	Solarenergie	Solarthermie, Schrägdachanlage vollflächig, Kleinanlage auf einem Einfamilienhaus	0,00092	k. A.	2	231,6	k. A.
Solarwärme bei Fleischwaren Berger, Niederösterreich, Österreich	Solarenergie	Solarthermie, für industrielle Prozesswärme, Freiflächenanlage, aufgeständerte Kollektoren (Parabolrinnen), 60 m ³ Speicher	0,214	0,65	489	228,5	752
Solaranlage Vojens Fjernvarme, Dänemark	Solarenergie	Solarthermie, Freiflächenanlage, aufgeständerte Kollektoren, Saisonspeicher in künstlichem See (200.000 m ³), Fernwärmeunterstützung für Haushalte, Schulen und Industriegebäude	23	49	28.000	121,7	571
Almere Solar Island, Niederlande	Solarenergie	Solarthermie, Freiflächenanlage, aufgeständerte Kollektoren, fernwärmeunterstützend, keine Info über Speicher	2,36	4,9	2.472	104,8	505
Vakuurröhren-Druckkollektor-Solaranlage Wels, Oberösterreich	Solarenergie	Solarthermie, Flachdachanlage, aufgeständerte Kollektoren, Fernwärmeunterstützung ohne Speicher	1,57	2	1.500	95,5	750
Geothermie BSU Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt, Hamburg-Wilhelmsburg, Deutschland	Geothermie	seichte Geothermie, Tiefsondenfeld, Fundament-Pfähle	1,18	0,65	858	72,7	1.320
Geothermie Panalpina Logistik-halle, Nürnberg, Deutschland	Geothermie	seichte Geothermie, Tiefsondenfeld	1,04	0,56	670	64,4	1.196
„Agrothermie“ Wüstenrot, Baden-Württemberg, Deutschland	Geothermie	seichte Geothermie, Flachkollektoren	1,5	0,3	600	40,0	2.000

4.1 Vergleich der Katalogwerte kWh/m²/a bei Anlagen mit erneuerbarer Energieproduktion

Benennung der Anlage	Typ	Untertyp	Energiepotenzialfläche (ha)	Thermische Leistung (MW)	Energie thermisch (MWh h/a)	kWh th/m ² /a	Thermische Volllaststunden h/a
Einfamilienhausanlage, Musterrechnung für Österreich (trockener Lehmboden)	Geothermie	seichte Geothermie, Flachkollektoren	0,03	0,006	11	36,0	1.800
Nordbahnhofareal, Wien, Österreich (Projektplanung)	Geothermie	seichte Geothermie, Tiefsondenfeld	46,56	6,17	14.196	30,5	2.301
Kurzumtrieb (Flächendefault o. Referenzanlage ¹)	Biomasse	agrarisches, Pappeln, Wärme	100	3	7.040	7,0	2.347
Biogas (Flächendefault o. Referenzanlage ¹)	Biomasse	agrarisches, Mais (Biogas), Wärme	100	3	5.900	5,9	1.967
Agrana Stärke (Bioethanol), Pischelsdorf, Niederösterreich	Biomasse	agrarisches, Bioethanol	4.291	k. A.	177.600	4,1	k. A.
Biomasse-KWK-Heizwerk Simmering, Wien	Biomasse	Forst, Hackschnitzel, Wärme	26.535	37	470.000	1,8	k. A.
Biomasse-Heizwerk Rankweil, Vorarlberg, Österreich	Biomasse	Forst, Hackschnitzel, Wärme	568	1,7	10.000	1,8	5.882
Strohkraftwerk und Fernwärme Bockfließ, Niederösterreich	Biomasse	agrarisches, Stroh, Wärme	500	2,5	7.830	1,6	3.132
Strohkraftwerk und Nahwärme Stetteldorf, Niederösterreich	Biomasse	agrarisches, Stroh, Wärme	600	2,5	8.333	1,4	3.333

¹ Flächen-default o. Referenzanlage bedeutet, dass sich die Energieertrags- und Flächenwerte nicht auf eine real existierende Anlage, sondern auf einen Standardwert aus der Fachliteratur beziehen.

Anmerkung: Die Tabelle beinhaltet derzeit keine Kombinationslösungen zu Etagenwirtschaften, in denen auf derselben Fläche mehrere erneuerbare Energieträger eingesetzt werden, ein bereits vielfach praktiziertes Beispiel (s. Siedlung „Rosa Zukunft“, Kapitel 3.5.7) ist die Kombination von Photovoltaikstrom mit einem Erdwärmepumpenfeld.

Quelle: eigene Darstellung

Tabelle 40: Flächenertragswerte aus dem Katalog der Anlagen erneuerbarer Energieproduktion (Elektrizität)

Anlagentitel	Typ	Untertyp	Energiepotenzialfläche (ha)	Elektrische Leistung (MW)	Energie elektrisch (MWh/a)	kWh el/ m ² /a	Elektrische Volllaststunden h/a
SmartFlower, Rom, Italien	Solarenergie	Photovoltaik, mobile Einzelanlage mit zweifachiger Nachführung, für Freiflächen	0,003	0,00231	5	170,0	2.208
Middelgrunden Offshore Wind Farm, Kopenhagen, Dänemark	Windkraft	nearshore, Reihe	69	40	89.000	129,0	2.225
Giessenwind, Südholland, Niederlande	Windkraft	onshore, Reihe, an Autobahn	12,7	9	16.077	126,6	1.786
Großwindräder Potzneusiedl, Burgenland, Österreich	Windkraft	onshore, Einzelanlage, Ebene	25	15	30.000	120,0	2.000
„Simon“, Ökostrom-PV-Kleinspaneel, Wien, Österreich	Solarenergie	Photovoltaik, mobiles Kleinspaneel, vollflächig (Neigung und Ausrichtung variabel)	0,000119	0,00015	0,133	111,8	887
Tesla Solarpark Ta'u Island, Amerikanisch-Samoa	Solarenergie	Photovoltaik, Freiflächenanlage, aufgeständerte Kollektoren, mit Akkuspeicher	1,95	1,4	1.801	92,4	1.286
Solar Energy Generating Systems (SEGS), Mojave-Wüste, Kalifornien, USA	Solarenergie	Elektrizität, Freiflächenanlage, Wärme-Parabolspiegel-Sammler	647,5	361	539.000	83,2	1.493
Tauernwindpark, Steiermark, Österreich	Windkraft	onshore, Reihe, Bergkamm	65	22,75	48.000	73,8	2.110
Passiv-Bürohaus SOL 4, Mödling, Österreich	Solarenergie	Photovoltaik, gebäudeintegriert (Fassaden)	0,0215	0,02805	16	72,9	559
PV-Kraftwerk, Kagoshima, Japan	Solarenergie	Photovoltaik, schwimmende Kollektoren	110	70	78.800	71,6	1.126
Audi AG Photovoltaik, Neckarsulm, Deutschland	Solarenergie	Photovoltaik, Flachdachanlage, aufgeständerte Kollektoren	2,7	1,9	1.800	66,7	947
Solarpark Oberzeiring, Steiermark, Österreich	Solarenergie	Photovoltaik, Freiflächenanlage, aufgeständerte Kollektoren, am Windpark	4,81	2	2.500	52	1.250

4.1 Vergleich der Katalogwerte kWh/m²/a bei Anlagen mit erneuerbarer Energieproduktion

Anlagentitel	Typ	Untertyp	Energiepotenzialfläche (ha)	Elektrische Leistung (MW)	Energie elektrisch (MWh/a)	kWh el/m ² /a	Elektrische Volllaststunden h/a
Windpark Hagenbrunn, Niederösterreich, Österreich	Windkraft	onshore, Reihe, Ebene	10,8	1,92	3.716	34,4	1.935
Windpark Neusiedl am See, Burgenland, Österreich	Windkraft	onshore, Cluster, Ebene	785	79	166.320	21,2	2.105
Windpark Noordoozpolder Binnen- und Buitendijk, Niederlande	Windkraft	nearshore und offshore, Cluster	5.700	343,5	937.800	16,5	2.730
Anholt Offshore Wind Farm, Dänemark	Windkraft	offshore, Cluster	14.700	400	1.722.000	11,7	4.305
Offshore-Windpark London Array, Ostküste Englands (Kent), Vereinigtes Königreich	Windkraft	offshore, Cluster	24.700	630	2.500.000	10,1	3.968
Windpark Munderfing, Oberösterreich, Österreich	Windkraft	onshore, Reihe, Bergkamm	150	15	15.000	10,0	1.000

Anmerkung: Diese Tabelle beinhaltet keine Kombinationslösungen von Etagenwirtschaften, in denen auf derselben Fläche mehrere erneuerbare Energieträger eingesetzt werden, ein bereits in Pilotanlagen praktiziertes Beispiel wäre die Kombination Photovoltaik-Solarthermie (PVT).

Quelle: eigene Darstellung

Bei den Werten kWh el/m²/a zeichnet sich zwischen Solarenergie und Windkraft kein eindeutiges Ranking ab. Jedoch sind – bei aller Vorsicht wegen der geringen Anzahl der Records – Tendenzen erkennbar, wie bereits in den Sachkapiteln zur Solarenergie (3.6) und Windkraft (3.7) angedeutet ist:

- Vollflächige gebäudeintegrierte PV-Systeme haben beim Relativwert kWh el/m²/a höhere Energieertragswerte, nicht aber beim absoluten Energieertrag. Hierbei sind die Kraftwerke mit aufgeständerten Kollektoren (unabhängig davon, ob sie gebäudeintegriert oder im Freiland installiert sind) deutlich ertragsstärker. Die flächenspezifischen Erträge der PV-Anlagen bewegen sich zwischen 67 und 170 kWh el/m²/a.
- Die Windkrafterträge haben eine noch größere Bandbreite: 10 bis 130 kWh el/m²/a. Dabei spielt die hohe Varianz der jährlichen Volllaststunden (zwischen 1.000 und 4.305 h/a) eine Rolle, aber auch die Form der Windparks: Einzel- und Reihenformen erzeugen pro Fläche deutlich mehr Elektrizität als die Clusteranordnung. Allerdings erzeugen die Cluster im absoluten Elektrizitätsertrag bei Weitem die größten Strommengen, darunter die Offshore-Cluster nochmals deutlich mehr als die Bauformen der Onshore-Cluster. Zugleich haben die Offshore-Cluster sehr kleine Werte bei den kWh el/m²/a. Im Zuge der Literaturrecherchen konnte dazu keine Begründung gefunden werden, die geringe „Besatzdichte“ mit Windkraftanlagen im Meer könnte möglicherweise damit zusammenhängen, dass es offshore wenig Gründe gibt, horizontal sparsam mit der Fläche umzugehen, oder es könnte auch um Mindestabstandsweiten beim Schiffsverkehr gehen.

4.2 Vergleich der Katalogwerte m²/kWh/a bei Anlagen mit erneuerbarer Energieproduktion

Der Umkehrwert zu kWh/m²/a (s. vorheriges Kapitel 4.1) sind m²/kWh/a: Dieser Quotient betont die Darstellung des Flächenbedarfs pro Energiemenge. Um dazu eine kompakte „österreichische“ Sicht zu visualisieren, wurden aus den Katalogrecords nach den folgenden Kriterien ausgewählte Beispiele zusammengestellt:

- Sie stammen aus existierenden österreichischen Energieanlagen oder enthalten Musterflächenertragswerte der Energie pro Quadratmeter und Jahr.
- Sie enthalten sowohl Wärme als auch Elektrizität als Endenergieform.
- Sie repräsentieren Haupt- und Untertypen des jeweiligen erneuerbaren Energieträgers.
- Sie kommen in der österreichischen Energielandschaft vor.
- Ihre Datenqualität im Katalog ist mit „gut“ eingestuft.

Mit diesen Auswahlkriterien zeigt die folgende Abbildung 38 eine „Tree Map“ für 11 Records (dreimal Windkraft, zweimal Geothermie, zweimal Solarthermie, zweimal Photovoltaik, zweimal Biomasse).

Abbildung 38: Tree Map von Anlagenbeispielen mit erneuerbarer Energieproduktion in Österreich (m²/kWh/a)



Quelle: eigene Darstellung

Die folgende Tabelle 41 enthält dieselben Records wie die obige Abbildung 37, zeigt aber die Flächen-Energieertragseffizienz nicht grafisch als Flächen, sondern mit den jeweiligen Zahlenwerten an.

Tabelle 41: $m^2/kWh/a$ und $kWh/m^2/a$ von Anlagenbeispielen erneuerbarer Energieproduktion in Österreich

Record, Lage	Typ	Untertyp	$m^2/kWh/a$	$kWh/m^2/a$
Musterrechnung, Kleinstanlage Einfamilienhaus	Solarenergie, Wärme	ST, Schrägdachanlage vollflächig	0,0043	232
Großwindräder Potzneusiedl, Burgenland	Windkraft, Elektrizität	Onshore, Einzelanlage, Ebene	0,0083	120
Wien	Solarenergie, Elektrizität	PV, mobiles Kleinstpaneel, vollflächig	0,0089	112
Wels, Oberösterreich	Solarenergie, Wärme	ST, Flachdachanlage, aufgeständerte Kollektoren	0,0105	96
Tauernwindpark, Steiermark	Windkraft, Elektrizität	Onshore, Reihe, Bergkamm	0,0135	74
Oberzeiring, Steiermark	Solarenergie, Elektrizität	PV, Freiflächenanlage, aufgeständerte Kollektoren	0,0192	52
Musterrechnung (Lehmboden)	Geothermie, Wärme	Seichte Geothermie, Flachkollektoren	0,0278	36
Nordbahnhofareal, Wien (Projektplanung)	Geothermie, Wärme	Seichte Geothermie, Tiefsondenfeld	0,0328	30
Windpark Neusiedl am See, Burgenland	Windkraft, Elektrizität	Onshore, Cluster, Ebene	0,0472	21
Musterrechnung	Biomasse, Wärme	Agrarisch, Mais (Biogas)	0,1695	6
Rankweil, Vorarlberg	Biomasse, Wärme	Forst, Hackschnitzel	0,5680	2

Quelle: eigene Darstellung

Die gesamte Bandbreite der Flächenenergieertragseffizienzen geht über zwei Größenordnungen: die Wärmeerzeugung aus forstlicher Biomasse (Hackschnitzel) benötigt 116-mal so viel Fläche für eine Kilowattstunde pro Quadratmeter und Jahr wie die solarthermische Wärmeerzeugung aus einer vollflächig installierten Schrägdachanlage.

4.3 Vergleich der Flächenerträge, Flächenkonkurrenzen und Umweltwirkungen von Anlagen erneuerbarer Energiegewinnung

In den Sachkapiteln 3.5 bis 3.8 wurde bereits erörtert, dass erneuerbare Energieträger nicht alleine aufgrund ihrer Ertragseffizienz beurteilt werden sollten. Eine integrierte Sichtweise muss auch versuchen, Umweltwirkungen, Flächenkonkurrenzaspekte und die Größenordnung des künftigen Zusatzpotenzials zu bewerten.

Im der folgenden Tabelle 42 wird dazu eine bewusst plakative und vereinfachende Darstellung versucht, weil es vor allem um die Unterschiede der Bewertungsausprägung zwischen den einzelnen erneuerbaren Energieträgern gehen soll¹. Zur einfachen Vergleichbarkeit wird die Darstellung auf dieselben Energieanlagen wie im vorigen „Ertragsranking“ beschränkt. Eine hohe Kriteriumsausprägung steht generell für einen schlechten, eine geringe für einen guten Wert.

Tabelle 42: siehe nächste Seite; Energieertragseffizienz, Lageunabhängigkeit, Konkurrenzaspekte und Umweltwirkungen erneuerbarer Energie

Erläuterungen zur Tabelle

Kriterium	Ausprägungsbedeutung	Erläuterungen
m ² /kWh/a	hoch = ineffizient	Zeigt den Flächenbedarf der erneuerbaren Energiepotenzialflächen pro Energiemenge und Jahr
Lageabhängigkeit der Potenziale	hoch = geringe zusätzliche Beiträge zu erwarten	Einschätzung künftiger Zusatzpotenziale für Österreich
Konkurrenzierung anderer Flächenfunktionen	hoch = problematisch	vgl. Kapitel 3.5 bis 3.8
Landschafts- oder Ortsbildeinfluss	hoch = problematisch	vgl. Kapitel 3.5 bis 3.8
CO ₂	hoch = problematisch	Nur auf Energieumwandlungsphase bezogen, ohne vor- und nachgelagerte Prozesse oder Transportaufwände
SO _x , NO _x , C _x H _y , CO, Staub	hoch = problematisch	Nur auf Energieumwandlungsphase bezogen, ohne vor- und nachgelagerte Prozesse oder Transportaufwände

¹ Die genaue Klassifizierung und Quantifizierung aller Bewertungskategorieklassen ist im Rahmen dieser Forschungsarbeit nicht möglich, wäre aber als weiterer Forschungsbedarf (s. dazu Kapitel 5.5) künftig eine wichtige Aufgabenstellung.

Energieanlagentyp	m ² /kWh/a	Lageabhängigkeit der Potenziale	Konkurrenzierung anderer Flächenfunktionen	Landschafts- oder Ortsbildeinfluss	CO ₂	SO _x , NO _x , C _x H _y , CO, Staub
Seichte Geothermie, Wärme, Flach- oder Tiefkollektoren	mittel	gering	gering	gering	gering	gering
Windkraft, Elektrizität, onshore, Cluster, Ebene	mittel	hoch	mittel	hoch	gering	gering
Windkraft, Elektrizität, onshore, Einzelanlage, Ebene	gering	mittel	gering	gering	gering	gering
Windkraft, Elektrizität, onshore, Reihe, Bergkamm	mittel	hoch	mittel	hoch	gering	gering
Solarenergie, Wärme, ST, vollflächige Schrägdachanlage	gering	gering	gering	mittel	gering	gering
Solarenergie, Wärme, ST, Flachdachanlage, aufgeständerte Kollektoren	gering	gering	mittel	gering	gering	gering
Solarenergie, Elektrizität, PV, mobiles Kleinstpaneel, vollflächig	gering	gering	gering	gering	gering	gering
Solarenergie, Elektrizität, PV, Freiflächenanlage, aufgeständerte Kollektoren	mittel	gering	mittel	hoch	gering	gering
Biomasse, Wärme, agrarisch, Mais (Biogas)	hoch	mittel	hoch	gering	gering	mittel
Biomasse, Wärme, Forst, Hackschnitzel	hoch	mittel	gering	gering	gering	mittel

Quelle: eigene Darstellung

4.4 Größenvergleiche zwischen direkten Flächenbedarfen und Energiepotenzialflächen von Anlagen erneuerbarer Energiegewinnung




Im Kontext der Raumplanung ist nicht nur der Flächenbedarf der erneuerbaren Energien relevant, sondern auch, ob eine zusätzliche „Flächeninanspruchnahme“ entsteht. Artverwandte Begriffe sind Bodenverbrauch, Bodenversiegelung, Flächenverbrauch. Die Bezeichnungen Boden- und Flächenverbrauch sind nicht korrekt, weil Boden und Flächen nicht verbraucht werden können, sondern bestimmte Nutzungsformen andere lageidentische Nutzungsformen kurz- oder langfristig konkurrenzieren oder ganz ausschließen. Deshalb sollen nun ausgewählte Katalog-Records in der folgenden Tabelle 43 darstellen, in welchem Größenverhältnis direkte Flächenbedarfe und die Potenzialertragsflächen stehen und ob eine zusätzliche Flächeninanspruchnahme besteht oder nicht.

4.5 Vergleich der flächenspezifischen Energieerträge der Katalog-Records mit Werten aus der Fachliteratur

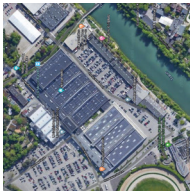


Zum Abschluss des Kapitels zu den Ergebnissen werden nun die Katalog-Records mit Werten aus der Fachliteratur verglichen. Die folgende Tabelle 44 zeigt dazu, dass sowohl zwischen den einzelnen Datenquellen als auch zwischen den Katalog-Records und den Autorenwerten die Beträge der $\text{m}^2/\text{kWh}/\text{a}$ weit auseinanderliegen. Dies spricht nicht gegen die Datenqualität der Records, sondern dafür, künftig anhand größerer Samples, aber auch mit einer Literaturrecherche genauer zu vergleichen, unter welchen Annahmen und mit welchem methodischen Ansatz die flächenspezifischen Energieertragswerte berechnet wurden.

Bei den hier referenzierten Literaturquellen fällt generell auf, dass nicht nach Lage differenziert wurde. Dazu besteht künftig Forschungsbedarf, denn die Records im Katalog der Flächenbedarfe erneuerbarer Energieproduktion beweisen trotz relativ kleiner Samplezahl, wie groß die lageabhängigen Energieertragsunterschiede ausfallen können: etwa nach Windstärke und -dauer, nach Sonnenstunden pro Jahr, nach den Eigenschaften des Erdreichs, nach Unterschieden bei Bodenfruchtbarkeit und der Klimazone von Agrarflächen, nach Feuchtegehalt, Wärmespeicherfähigkeit und Temperatur der seichten und tiefen Erdreichsschichten.

Tabelle 43: Beispiele für Energieanlagen zum Verhältnis direkter Flächenbedarfe (Flächeninanspruchnahme) und der Potenzialertragsfläche

Name der Energieanlage, Art, Lage	F1: Direkte Flächenbedarfe	F2: Potenzialertragsfläche	F1 : F2 Enthält F2 auch F1? (ja/nein)	Situation im Raum (Satellitenbild)	Kommentare zur Flächeninanspruchnahme
Windpark Neusiedl	Masfundamente (44 Windkraftanlagen) und Wartungsflächen, Zufahrtswege 4,4 ha	Windparkfläche 785 ha	1:178 ja		In Windparks sind die direkten Flächenbedarfe (Flächeninanspruchnahme) stets in der Potenzialertragsfläche enthalten und belegen nur einen kleinen Anteil derselben.
Biomasse-Kraftwerk Rankweil, Vorarlberg	Kraftwerksgelände inklusive Hackschnittzeispelicheranlagen 0,74 ha	Waldfläche 568 ha	1:792 nein		Bei Biomassekraftwerken sind die direkten Flächenbedarfe nicht in der Potenzialertragsfläche enthalten. Die Kraftwerksgelände (direkte Flächenbedarfe) sind aufgrund ihrer Größe selten in bestehenden Ortskernen integriert, sondern meist am Ortsrand situiert. Aus der Potenzialertragsfläche entsteht keine zusätzliche Flächeninanspruchnahme.
Strohkraftwerk Stieteldorf, Niederösterreich	Kraftwerksgelände inklusive Strohspeicher 0,58 ha	Getreidefläche 600 ha	1:1034 nein		

4.5 Vergleich der flächenspezifischen Energieerträge der Katalog-Records mit Werten aus der Fachliteratur

Name der Energieanlage, Art, Lage	F1: Direkte Flächenbedarfe	F2: Potenzialertragsfläche	F1 : F2 Enthält F2 auch F1? (ja/nein)	Situation im Raum (Satellitenbild)	Kommentare zur Flächeninanspruchnahme
Solarthermieanlage Messe Wels, Oberösterreich	Kollektorenflächen 0,8 ha	Gesamtfläche des Flachdaches 1,57 ha	1:1,96 ja		Bei Solarthermieanlagen mit aufgeständerten Kollektoren stehen direkte Flächenbedarfe (Kollektorbelegung) zur gesamten Potenzialertragsfläche etwa im Verhältnis 1:2. Gebäudeintegrierte Anlagen verursachen im Gegensatz zu Freilandanlagen keine zusätzliche Flächeninanspruchnahme.
Solarpark Oberzeiring, Steiermark	Kollektorenflächen 2,1 ha	Gesamte Solarparkfläche 4,8 ha	1:2,3 ja		
Geothermie ATRIO Shopping Center Villach, Kärnten, Österreich (seichte Geothermie, Tiefsondenfeld, Fundamentpfähle)	Anlagenbauteile der Heiztechnik (Speicher, Steuerung) Fläche: k. A.	Potenzialertragsflächen- größe des Erdreiches (Fundamentfläche) 2,86 ha	k. A. ja		Bei Anlagen seichter Geothermie in Tiefsondenbauweise entsteht weder aus den gebäudeintegrierten direkten Flächenbedarfen noch aus den „unterirdischen“ Potenzialertragsflächen zusätzliche Flächeninanspruchnahme.
Geothermie Einfamilienhausanlage, Musterrechnung für Österreich (trockener Lehmboden)	Anlagenbauteile der Heiztechnik (Speicher, Steuerung) Fläche: k. A.	Potenzialertragsflächen- größe des Erdreiches 0,03 ha	k. A. ja	Kein Bild vorhanden	Bei Anlagen seichter Geothermie in Flachsondenbauweise entsteht weder aus den gebäudeintegrierten direkten Flächenbedarfen noch aus den „unterirdischen“ Potenzialertragsflächen zusätzliche Flächeninanspruchnahme.

Quelle: Alle Satellitenbilder (Google, 2016), eigene Darstellung (Lage des Windparks Neusiedl)

Tabelle 44: Vergleich der flächenspezifischen Energieerträge der Katalog-Records mit Werten aus der Fachliteratur

Berchtold-Domig, Geitner, Hastik et al. (2015)	m²/kWh/a
E-Ertrag Holz, normaler Wald netto	0,680
Kurzumtrieb Pappel	0,317
Windkraft (ab 4 Winkraftanlagen, Annahme 8,6 ha je Anlage)	0,014
PV-Freifläche bzw. PV-Dachfläche (Annahme 60 % Flächenverlust wegen Schattenwurf)	0,023
Grünland-Gülle – Biogas	4,155
Energiemais – Biogas	0,395
Stanzer, Novak, Dumke et al. (2010)	m²/kWh/a
Kurzumtrieb, Pappeln	0,142
Biogas, Mais	0,169
Forst, Waldhackschnitzel	0,568
Kaltschmitt, Hartmann und Hofbauer (2009, S. 182)	m²/kWh/a
Stroh	0,639
Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (2010, S. 9)	m²/kWh/a
Biomasseanbau	0,490
Biomassereststoffe	0,740
Geothermie	0,020
Windenergie	0,070
Photovoltaik	0,060
Solarthermie	0,030
Umgebungswärme	0,030
Erdwärmesonden	0,110
Abwasserwärme	0,530
Österreichische Katalog-Records (Durchschnitte)	m²/kWh/a
Seichte Geothermie, Tief- oder Flachkollektoren	0,025
Windkraft, Cluster	0,04
Photovoltaik, Freiflächen- oder Dachanlage, aufgeständerte Kollektoren	0,02
Solarthermie, Freiflächen- oder Dachanlage, aufgeständerte Kollektoren	0,01

Anmerkung: eigene Umrechnungen der Einheiten in den o. g. Originalquellen in m²/kWh/a

5 Schlussfolgerungen zur regionalen Energieraumplanung

5.1 Einordnung der empirischen Ergebnisse im Spektrum regionaler Energieraumplanung

Tabelle 45 zeigt, wo die empirischen Erkenntnisse des Kataloges der Flächenbedarfe von Anlagen erneuerbarer Energieproduktion zwischen den räumlichen Steuerungsebenen und den thematischen „Hebeln“ einzuordnen sind. Erst das gesamte Ensemble dieser Steuerungsinstrumente und Aktivitäten (s. dazu auch Kapitel 2.3 Erneuerbare Energien, Energiesparziele, Energieeffizienz und Mobilität in österreichischen Energiestrategien) formt die regionale Energieraumplanung. Der Katalog könnte dabei in und zwischen allen Steuerungsebenen bei der Mobilisierung erneuerbarer Energiepotenziale eingesetzt werden.

Tabelle 45: Steuerungshebel der Stadt- und Raumplanung, nach Ebenen differenziert

Steuerungshebel der Stadt- und Raumplanung	Steuerungsebenen		
	Gemeinde	Region	Bundesland
Eigenschaften des „Gebäudeparks“	Instrument: Baugenehmigung Aktivität: Bauberatung	Aktivität: Bewusstseinsbildung	Instrument: Wohnbauförderung, Bauordnung
Siedlungsstruktur, Funktionsmix, Dichte	Instrument: Quartiersentwicklungskonzept (Dichte, Erdgeschossnutzungen, zentrale und dezentrale Versorgungsinfrastrukturen) Instrument: Energiekonzept mit Karten- und Textteil als Ergänzung zum örtlichen Entwicklungskonzept	Aktivität: Interkommunale Abstimmungen zu Betriebsstandortentscheidungen	Instrument: Betriebsstandortreglements in Raumordnungsgesetzen
Erneuerbare Energiepotenziale	Empirische Erkenntnisse aus dem Katalog der Flächenbedarfe von Anlagen erneuerbarer Energieproduktion: m ² /kWh/a Flächenkonkurrenzen und Umweltwirkungen		
	Instrument: Energie-Layer im örtlichen Entwicklungskonzept Aktivität: Ist und Soll für Quartiere und Landschaftseinheiten definieren	Instrument: Energie-Layer im regionalen Entwicklungskonzept Aktivität: Flächenmanagement und Gemeindetypisierung	Instrument: Vorrang- und Ausschlusszonen (überörtliches Sachkonzept) Aktivität: Grundlagenforschung, Potenzialkartierungen, Open Data

Mobilitätsinfrastruktur	Instrument: Kommunales Mobilitätskonzept (lokaler ÖV, Mikro-ÖV, Rad- und Fußverkehrsangebote inklusive Walkability und Bikeability ¹), Energie-Layer im örtlichen Entwicklungskonzept	Aktivität: Interkommunale Abstimmungen zum Regional- und Alltags-ÖV sowie zu gemeindeübergreifenden Radwegen	
Mobilitätsmanagement	Instrument: Kommunales Mobilitätskonzept	Aktivität: Bewusstseinsbildung	Instrumente: Tarifgestaltung, Stellplatzverordnungen
Energiestrategien	Instrument: e5 (europaweit), EKKO (Burgenland, Österreich), EGEM (Oberösterreich, Österreich), 2000-Watt-Gemeinde (Deutschland, Schweiz, Österreich) usw.	Instrument: e5 für Regionen ²	Instrument: Energiestrategie des Bundeslandes

¹ e5 für Regionen (Standard: für Gemeinden) ist noch im Aufbau und bisher erst in wenigen Regionen im Testbetrieb.

² Die „Walkability“ und „Bikeability“ beinhalten Gestaltungsplanungsgrundsätze, welche die Verwendung der Rad- und Fußgängerinfrastruktur nicht nur möglich, sondern auch sicher, bedienungsfreundlich und komfortabel machen.

Quelle: eigene Darstellung

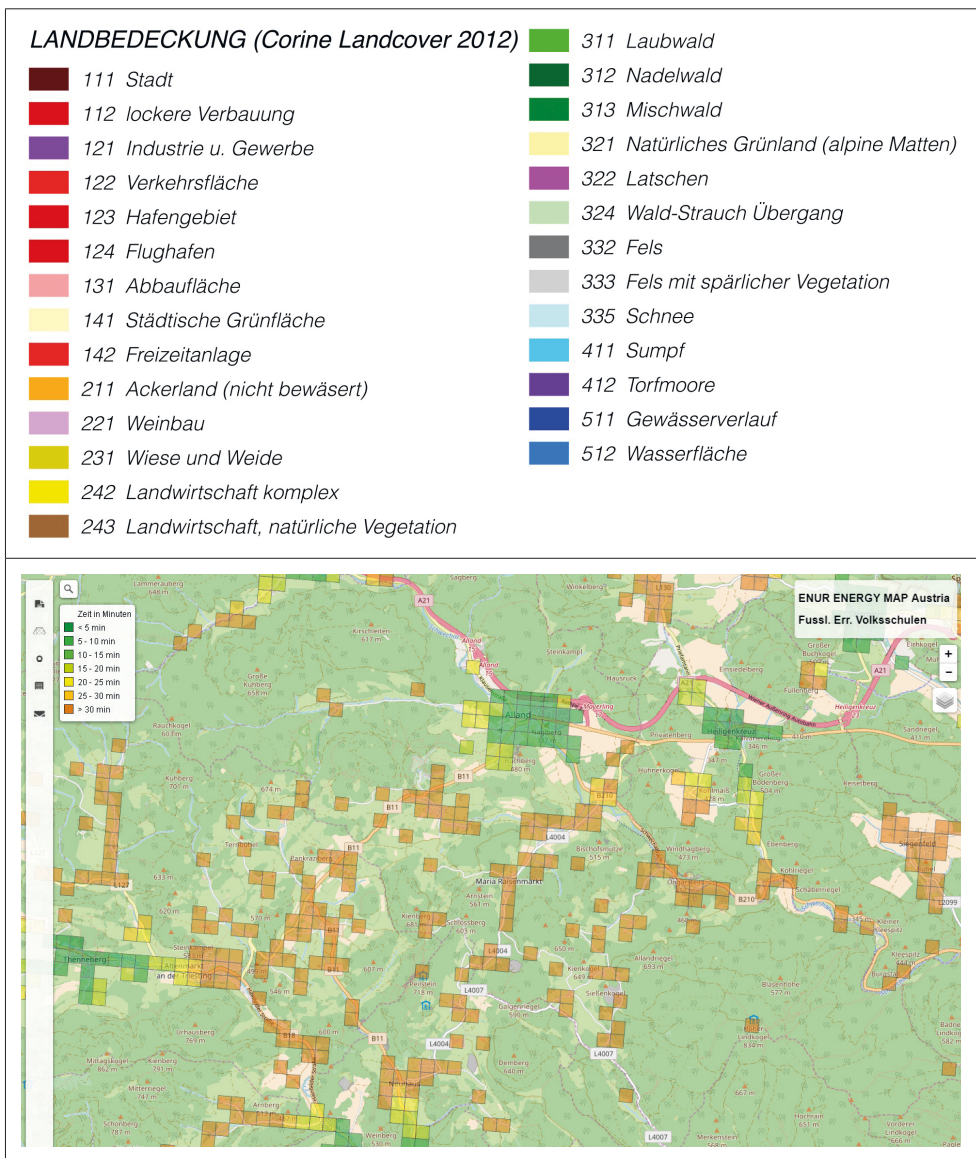
5.2 Räumliche Bezugssysteme für die regionale Energieraumplanung

Je nach Steuerungsebene stellt sich im Forschungsbetrieb stets die Frage nach räumlichen Bezugssystemen, die jeweils zu einer bestimmten „Flughöhe“ passen sollen. Dazu sind auf den Ebenen der Bundesländer, Regionen und Gemeinden unterschiedliche Bezugssysteme im Einsatz, die Vor- und Nachteile im Einsatz für die regionale Energieraumplanung aufweisen.

Für Übersichtskarten auf Bundeslandebene wäre es denkbar, mit den Einheiten entlang der von Thalhammer und Stöglehner (2011) definierten Systematik von „Kernstädten, urbanen Räumen, suburbanen Räumen, Kleinstädten und ländlichem Raum“ bundeslandweite Karten zu erstellen.

In der nächstniedrigeren Flughöhe, für Aufgabenzwecke der bundeslandweiten und der regionalen Energieraumplanung können Rasterkarten, etwa in der Auflösung 250 x 250 Meter je Rasterzelle, verwendet werden. Abbildung 39 zeigt Beispiele für Kartenausschnitte aus der Corine Landcover Systematik (Umweltbundesamt Österreich, 2017) und aus einem GIS-Modell des Projektes „ENUR“ (Department für Raumplanung, 2013).

Abbildung 39: Beispiele für Rasterkarten (Corine Landcover, Erreichbarkeit von Volksschulen)



Quelle oben: Umweltbundesamt Österreich (2017); Karteninhalte der Corine Landcover Systematik;

Quelle unten: Department für Raumplanung (2013); Screen aus einer Rasterkarte zur fußläufigen Erreichbarkeit von Volksschulen

Auch wenn Karten der Corine Landcover Systematik nicht immer mit der realen Flächennutzung übereinstimmen, bieten sie eine gute und differenzierte räumliche Übersicht der für erneuerbare Energiepotenziale sehr wichtigen Landnutzungskategorien,

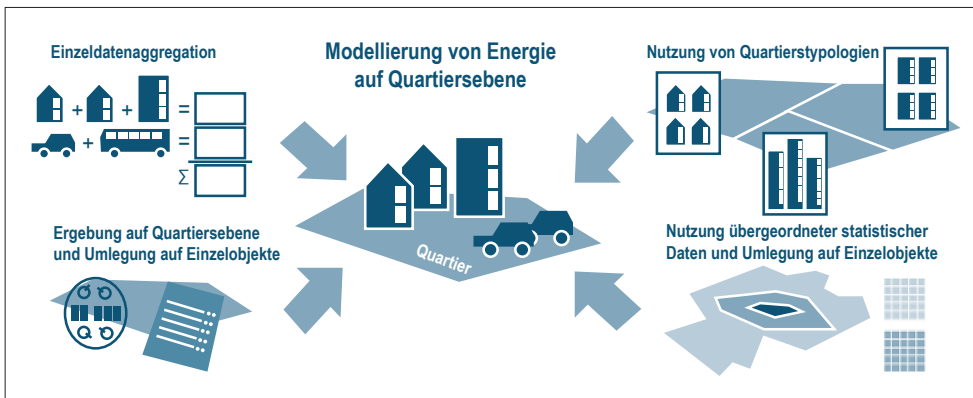
sowohl im bebauten als auch im unbebauten Raum. Außerdem sind sie flächen-deckend und gratis verfügbar. Dies gilt häufig nicht für komplexe GIS-Modelle und -Karten, die meist nur für sehr kleine Projektgebiete angefertigt werden.

Im Sinne der Energieraumplanung auf teilregionaler und lokaler Ebene erscheinen Siedlungen als geeignete Zugangsgröße. Dabei sind grundsätzlich zwei Arbeitsweisen möglich: Entweder die Siedlungsgrenzen werden pragmatisch nach der Datenverfügbarkeit oder nach komplexeren integrativeren Datenmodellen gezogen.

Davon unabhängig gibt es Parameter, die in Summe die Energieperformance einer Siedlung ausmachen: die Energiebedarfe für die Raumwärme, das Warmwasser, die elektrische Energie und die Energiebedarfe der Mobilität. Durch den Klimawandel und auch durch geänderte Komfortvorstellungen spielt mittlerweile auch der Kühlbedarf eine wachsende Rolle – aber der Kühlenergiebedarf ist als Strombedarf oft ununterscheidbar im gesamten Strombedarf „versteckt“ und daher nicht getrennt darstellbar. Auch beim Heizen mit Strom ist die Situation ähnlich: Aus Verbrauchsdaten mit einer einzigen Wattstundenanzahl pro Jahr ist nicht zwischen Haushalts- und Heizstrom zu unterscheiden.

Die folgende Abbildung 40 zeigt die oben erwähnten Arbeitsweisen für Siedlungs- und Quartiersabgrenzungen: per Datenverarbeitung top-down aus übergeordneten Statistiken *in* die Quartiersebene oder bottom-up *aus* der Aggregation von einzelnen Gebäudedaten.

Abbildung 40: Beispielstrukturen innerer und äußerer Siedlungsstrukturen



Quelle: bearbeitet nach Schlump und Malottki (2013, S. 17)

Energieraumplanung sollte auf der Quartiersebene (oder wenn möglich bis auf die Gebäudeebene) und auch für Landschaftseinheiten Unterschiede zwischen der Ist- und Soll-Performance einer Siedlung enthalten, denn ohne künftigen „Veränderungsvektor“ wäre es keine Planung, sondern nur eine Status-quo-Analyse. Unter Ist und Soll können Zieldimensionen verstanden werden, die in dieser Untersuchung als essenziell für die Energieraumplanung genannt werden: der Energiebedarf von

Gebäuden, der Versorgungsanteil aus erneuerbaren Energien, die aus Mobilität induzierten Energiebedarfe einer Siedlung.

Als Beispiele dafür folgen nun zwei Modelle, die in Richtung Energieraumplanung weisen, da die verwendeten Quartierseigenschaften auch für künftige Entwicklungszustände verortet werden. Walchhofer (1999) nennt dazu in der folgenden Abbildung 40 vier Siedlungstypen, die sich nach Bebauungsdichte, ökologischem Reproduktionspotential und energetischer Ressourceneffizienz unterscheiden. Die Schweizer Energierichtplanung (Abbildung 41) stellt in ihren Plänen auch die künftig durch bestimmte erneuerbare Energieträger zusätzliche Versorgungsbarkeit und „Rückzugsgebiete“ für nichterneuerbare Energieträger verortet dar.

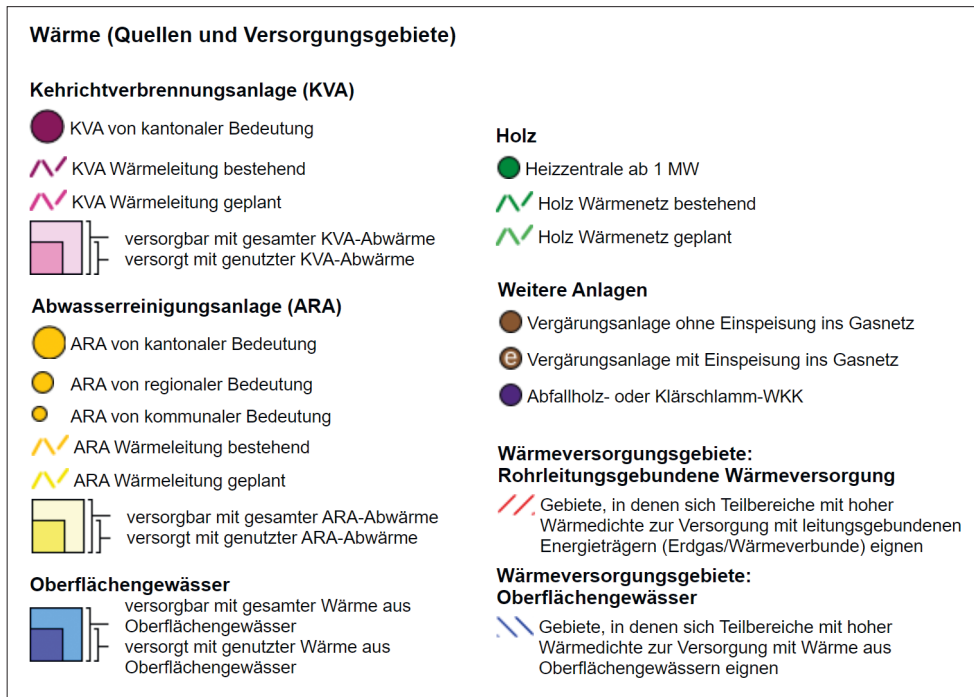
Abbildung 41: Vier energieräumliche Siedlungstypen

- Dichtbebaute Wohn- und Mischgebiete mit geringem Reproduktionspotential und hoher energetischer Ressourceneffizienz (Typ 1)
- Dichtbebaute Wohn- und Mischgebiete mit vorhandenem bzw. ausbaufähigem Reproduktionspotential und mittlerer energetischer Ressourceneffizienz (Typ 2)
- Einzelhausbebauung und verdichtete Einfamilienhausbebauung mit geringer Ressourceneffizienz (Fläche) (Typ 3)
- Standorte für Industrie, Gewerbe und Infrastruktur (Verkehr, Ver- und Entsorgung, etc.) mit geringer Ressourceneffizienz (hinsichtlich Energie und Fläche) (Typ 4)

Die weitere Typisierung des städtischen Landschaftsraumes kann in Parkanlagen und Großerholungsgebiete, Brachen, Agrarräume, walddominierte Gebiete erfolgen, sie ist aber für die vorliegende Arbeit nicht unmittelbar von Bedeutung.

Quelle: Walchhofer (1999, S. 205)

Abbildung 42: Inhalte des Energierichtplanes Zürich, 2013



Quelle: Kanton Zürich (2013)

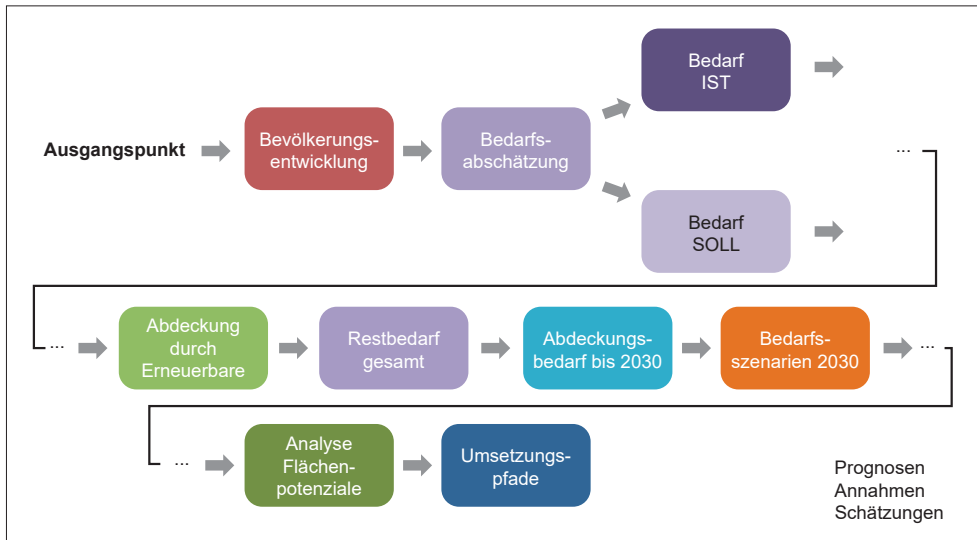
5.3 Der Katalog im Praxischeck: Fallstudie Vorderland-Feldkirch

Das Forschungsprojekt „ERP_hoch3“ (Dumke, Eder, Fischbäck et al., 2017) hat im Modul „Interkommunale Potenziale erneuerbarer Energien“ viele für diese Analyse relevante Fragestellungen behandelt. Untersuchungsregion der Fallstudie war die Vorarlberger Region Vorderland-Feldkirch mit etwa 64.000 Einwohnerinnen und Einwohnern. Die Aufgabenstellungen, um die es in diesem Projektmodul ging (ebd., S. 256), haben eine hohe Übertragbarkeit auf andere Regionen:

- Was kann getan werden, wenn quantitative Vorbereitungsmethoden (etwa GIS-Modellierungen und Szenarien, Befragungen, Datenrecherchen) aufgrund fehlender, intransparenter, unvollständiger, inkonsistenter Daten scheitern oder gar nicht erst begonnen werden können?
- Wie ist ein Flächenmanagement auf regionaler Ebene visualisierbar und haptisch begreifbar, das räumlich zwischen Energienachfragedichten und dem Flächenangebot von erneuerbaren Energiepotenzialen vermittelt?
- Welche Partizipationsformate helfen lokalen Politikerinnen und Politikern, aber auch interessierten Bürgerinnen und Bürgern dabei, sich überhaupt regional als „Managementeinheit“ über die Gemeindegrenze hinweg zu begreifen?

In dieser Arbeitssituation wurde vom Projektteam entschieden, anstatt des ursprünglichen Forschungsdesigns, das GIS-Modelle, Befragungen und Datenrecherchen vorgesehen hatte, ein Planspiel zu entwickeln, das in einer Fokusgruppensituation „Bewusstseinsschübe“ entwickeln kann. Zunächst wurde ein einfaches Ist-Soll-Szenario entwickelt, das für die Entwicklung zwischen 2015 und 2030 von folgenden, in Abbildung 43 dargestellten Einflussgrößen ausging.

Abbildung 43: Ablaufdiagramm zur Szenarienbildung, Ist 2015 – Soll 2030



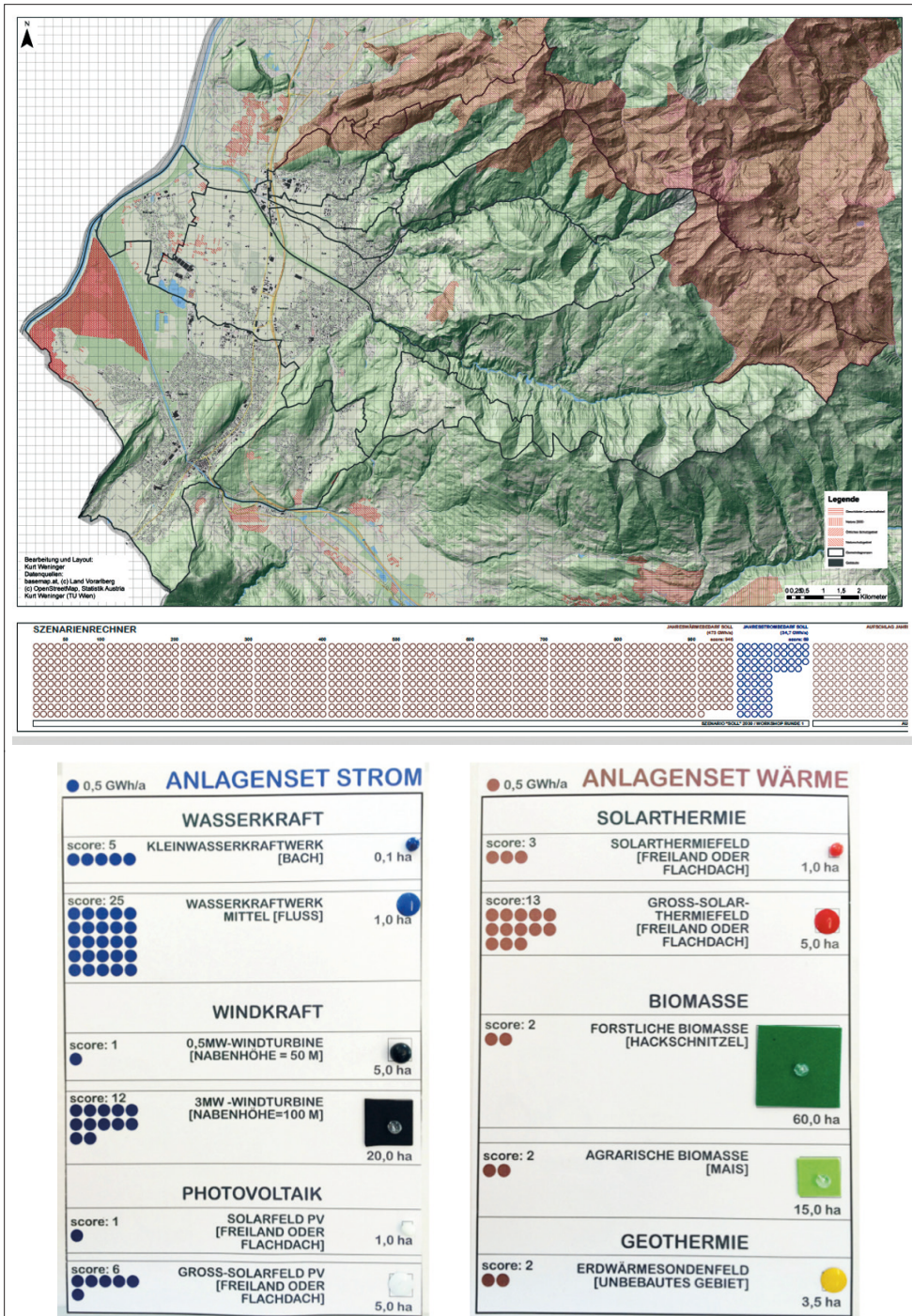
Quelle: Dumke, Eder, Fischbäck et al. (2017, S. 256)

Pro-Kopf-Werte für Raumwärme, Warmwasser und Elektrizität (die Energiebedarfe der Mobilität wurden ausgeklammert) wurden aufsummiert und bereits bestehende aktive erneuerbare Energiepotenziale vom gesamten Energiebedarf abgezogen.

Die verbleibende, bis jetzt nichterneuerbar bereitete Energiemenge war die „Spielmasse“ für ein Planspiel und durch Verortung von Potenzialflächen- und Kraftwerksstandorten zu erreichen. In einem Fokusgruppenworkshop, der am 25.02.2016 in Rankweil (Vorarlberg) stattfand, wurde in mehreren Tischgruppen zu ca. acht Personen in 60 Minuten dieses regionale Energieszenario 2015 bis 2030 „bedient“. Dazu stand ein Spielbrett mit aufsteckbaren, maßstäblichen Energiepotenzialeinheiten und Kraftwerken zur Verfügung.

Aufgabenstellung an die Teilnehmerinnen und Teilnehmer war es zusätzlich, „live“ den erreichten „Füllstand“ an erneuerbarer Energie zu notieren. Dafür gab es auf dem Spielbrett ein „scoreboard“. Die folgende Abbildung 43 zeigt die Arbeitskarte, das Steckset der Anlagen erneuerbarer Energiegewinnung und die Kartengrundlage. In diesem Planspiel kam eine „Urform“ des in dieser Untersuchung weiterentwickelten Kataloges der Flächenbedarfe zum Einsatz.

Abbildung 44: Spielbrett, Legende und Workshopfotos des Projekts „ERP_hoch3“





Quelle: Dumke, Eder, Fischbäck et al. (2017)

Methodisch gehört das hier vorgestellte Spiel- und Workshopset zu den qualitativen Methoden der entwurfsbezogenen Forschung. Albrechts (2010) und Shipley (2002) schreiben dazu, dass zur Erfüllung solcher Spielziele viele unterschiedliche Lösungsansätze erlaubt und gewollt sind, welche von einem Team partizipativ und konsensual anstatt in einer „von oben verordneten Variante“ erarbeitet werden müssen. Zusammenfassend sind aus der hier beschriebenen Fallstudie folgende Reflexionen zu Chancen und Limits des Katalogs der Flächenbedarfe von Anlagen erneuerbarer Energieproduktion im Praxiseinsatz möglich:

Chancen

- Es finden Bewusstseinsseffekte für den wirklichen Flächenbedarf der erneuerbaren Energiepotenziale statt. Größenverhältnisse zwischen den Siedlungsteilen und den Flächenbedarfen erneuerbarer Energiepotenziale werden unmittelbar sichtbar.
- Teilnehmerinnen und Teilnehmer begreifen, dass es die regionale Kooperation braucht, wenn Ziele wie „100 % erneuerbare Energie“ räumlich ernst genommen werden soll, und dass solche Ziele nur im Ausnahmefall innerhalb der Systemgrenze einer einzelnen Gemeinde erfüllbar sind.
- Diese „Aha-Erlebnisse“ sind auch mit sehr wenigen verfügbaren Status-quo-Daten vorbereitbar und wiederholbar.

- Lokales Spezialwissen kann unmittelbar visualisiert werden (etwa die beste Stelle für ein Kleinwasserkraftwerk).

Limits

- Die Katalogmethode vermittelt eine Einfachheit, die es so nicht gibt. Sämtliche Aspekte der Speicherung und Verteilung der erneuerbaren Energien in der Siedlungsstruktur werden ausgeblendet.

Erkenntnisse, die aus einem „Flächenspiel“ und auch mit der „Katalogmethode“ gewonnen werden können, sind als erster Schritt und bewusstseinsbildend bei einem strategisch orientierten Energiekonzept hilfreich, können und sollen aber keinesfalls methodisch komplexere Szenarien-, GIS- oder Potenzialmodelle ersetzen, die als zweiter Arbeitsschritt erfolgen müssen (Anmerkung: Im Projekt „ERP_hoch3“ wurde eine Post-GIS-Analyse der Workshopergebnisse durchgeführt).

5.4 Reflexion und Ausbaumöglichkeiten des Flächenbedarfs-katalogs der Anlagen erneuerbarer Energieproduktion

Die in dieser Untersuchung vorgestellte Katalogmethode, die reale Flächenbedarfe, Leistungen, Jahresarbeiten und die Lage im Raum für Anlagen der erneuerbaren Energien zeigt und vergleicht, ergibt verschiedene Qualitäten von Antworten – je nach erneuerbarem Energieträger. Für die erneuerbaren Energieträger Windkraft und Solarenergie ist das Ergebnis bzw. die Antwort zufriedenstellend, für die Geothermie und die Biomassen bleiben trotz sehr bemühter Empirie zu viele Fragenbestandteile offen. Bei den Biomassen liegt dies eher an der Nichtfeststellbarkeit realer Flächenbedarfe der standort- und anlagenspezifischen biogenen Rohstoffmengen, weniger an den fehlenden „Ertrags-Benchmarks“ dazu. Bei der Geothermie gibt es nur sehr wenige praxiserprobte Benchmarks und Ertragsklassen des Wärmeentzuges aus dem seichten und tiefen Erdreich. Auch hier besteht Forschungsbedarf.

Die Katalogmethode bräuchte künftig zwecks Validierung der Records eine erheblich größere Anzahl der „Datenbankzeilen“ und mehr Überprüfung zwischen gemessenen Flächenbedarfen und Benchmarkwerten zum flächenspezifischen Energieertrag erneuerbarer Energien aus der Fachliteratur. Sollte dies gelingen, könnte aus dem dann erweiterten Katalog (eventuell in Kombination mit Teilen dieser Untersuchung) ein für Regionen wertvolles „Decision Support Tool“ entstehen.

Ansatzweise ist diese Funktionalität bereits jetzt gegeben, weil die Katalogdatenbank als Google Fusion Table den standortunabhängigen und bedienungsfreundlichen „Internetbesuch“ des Katalogs erlaubt.

Die Ausbaumöglichkeiten des Katalogs könnten außerdem in der simultanen Verwendung durch mehrere Forscherinnen und Forscher, aber auch durch eine Kategorieerweiterung auf weitere erneuerbare Energieträger wie Wasserkraft und Umgebungswärmearten bestehen.

5.5 Weiterer Forschungsbedarf

Aus den Forschungsergebnissen ergibt sich weiterer Forschungsbedarf bezüglich noch offen gebliebener Punkte im empirischen Teil dieser Untersuchung .

5.5.1 Erforschung von Zusatzpotenzialen der in Österreich noch nicht hochausgebauten erneuerbaren Energien

Aus den in dieser Untersuchung referenzierten Grundlagenstudien hat sich gezeigt, dass Geothermie und Solarenergie aktuell erst sehr geringe Beiträge an den gesamten erneuerbaren Energien leisten (in Summe etwa 3,5 Prozent vom Gesamtanteil der erneuerbaren Energien am Endenergieverbrauch Österreichs; s. Biermayr, 2017, S. 16). In der integrativen Betrachtung von Umweltwirkungen, Flächenkonkurrenzen und flächenspezifischen Energieerträgen hat der Flächenbedarfskatalog einen überwiegend positiven Gesamteindruck der Referenzanlagen und auch eine überzeugend hohe Wiederholbarkeit dieser standörtlichen Energieertragsfaktoren gezeigt. Zu erforschen wäre daher, wo Großanlagen² der seichten Geothermie im Freiland, Photovoltaik (gebäudeintegriert und im Freiland) und Solarthermie mit Wärmenetzkopplung ein großes zusätzliches Potenzial haben und wie die „serielle“ energieraumplanerische Arbeitsweise zur Umsetzung solcher Anlagen aussieht.

5.5.2 Erforschung der Zusatzpotenziale von in Österreich bereits hochausgebauten erneuerbaren Energien

Aus den in dieser Analyse referenzierten Grundlagenstudien hat sich gezeigt, dass Windkraft und Biomasse bereits die größten Anteile unter den erneuerbaren Energien ausmachen. In der integrativen Betrachtung zwischen Umweltwirkungen, Flächenkonkurrenzen und flächenspezifischen Energieerträgen hat der in der Untersuchung entwickelte Katalog verschiedene Forschungsbedarfe aufgezeigt:

- Für große Windparks ebenso wie für Einzel- und Reihenanlagen wären Überlegungen zur Nachverdichtung anzustellen. Aus den Katalogbeispielen ist klar ersichtlich, dass dadurch ohne zusätzlichen Flächenbedarf deutlich höhere Energieerträge je Standort möglich wären. Die Windkraftanlagen sind in Österreich räumlich teilweise „zersiedelt“: Zu erforschen wäre daher, wie dieser „energy sprawl“ sowohl durch vertikale als auch horizontale Nachverdichtung von Windkraftanlagen erfolgen kann und was das in der erneuerbaren Energiebilanz bewegen könnte. Angesichts der sehr unterschiedlichen rechtlichen Windkraftreglements je Bundesland stellt sich dabei im Weiteren die Frage, ob ein einheitliches nationales verbindliches Windkraftkonzept für Österreich im Sinne einer Rahmenplanung hilfreich wäre.

² Hiermit sind jedenfalls keine „privaten Kleinstanlagen“ gemeint, sondern Anlagen mit mehreren Megawatt Leistung, die in der jeweiligen Bezugssystemgrenze deutliche Zuwächse beim Anteil der erneuerbaren Energien am Endenergiekonsum bewegen können.

- Welche Zuwachspotenziale welche Biomassen künftig in Österreich haben, ist ebenfalls ein ungeklärter Punkt. Weder die Katalog-Records noch die Analyse der Grundlagenstudien können dazu ein klares Bild vermitteln. Um künftig zu integrativeren Potenzialeinschätzungen zu kommen, braucht es genauere Systemgrenzen- und Nachhaltigkeitskriterien zu den Biomassen, die auch ethische Aspekte enthalten könnten, etwa das klare Nein zur Verbrennung von Nahrungsmitteln, die aber auch die gerade bei den biogenen Rohstoffen nicht unerheblichen Vorleistungsaufwände (Aufbereitung der Stoffe und Transport) stärker betonen.

5.5.3 Erforschung von Etagenwirtschaften erneuerbarer Energien

Sowohl die in dieser Forschungsarbeit referenzierten Grundlagenstudien als auch die Katalog-Records zeigen, dass Etagenwirtschaften erneuerbarer Energien ein möglicherweise sehr großes Zusatzpotenzial haben. Dazu zeigt die folgende Abbildung 45 ein fiktives Kombinationsbeispiel aus den Katalogertragswerten.

Abbildung 45: Fiktives Beispiel einer „energetischen“ Etagenwirtschaft

Der Ist-Zustand (Etagenwirtschaft 1)

Windpark auf einer landwirtschaftlich genutzten Fläche (Nahrungsmittelproduktion),
30 kWh/m²/a

Der Soll-Zustand (Etagenwirtschaft 2)

Seichte Geothermie, Flachkollektoren + Photovoltaik (Freiflächenanlage mit aufgeständerten Kollektoren) + Windkraft = 40 + 50 + 30 = 120 kWh/m²/a. Flächengleiche Nahrungsmittelproduktion nur mehr sehr eingeschränkt oder gar nicht mehr möglich.

Ertragsverhältnis Ist-Soll 1:4.

Quelle: eigene Darstellung

Zu den Etagenwirtschaftskombinationen erneuerbarer Energien stellen sich folgende Forschungsfragen:

- Welches Potenzial haben großflächige Kombinationen aus Windkraft, Biomasse, Geothermie und Solarenergie? Wie gelingt die Netzintegration, Verteilung und Speicherung der verschiedenen Endenergieformen Wärme und Elektrizität?
- Welches Potenzial hat die Windkraft in wenig attraktiven Siedlungsstrukturen, etwa in Industriegebieten und entlang von Autobahnen? Wie ist das Know-how von Ländern, die dies schon praktizieren (z. B. die Niederlande), auf Österreich übertragbar?
- Welches Potenzial haben große Kombinationskraftwerke der Solarenergie und Geothermie in dicht bebauten, bestehenden Siedlungsstrukturen?

5.5.4 Definition von neuen Energiebündnissen zwischen Stadt und Land

Die bisher genannten Forschungsbedarfe zum Ausbaugrad der erneuerbaren Energien, aber auch die Katalogbeispiele zu neuen erneuerbaren Etagenwirtschaften zeigen, dass das gewohnte, aber stark vereinfachende Quellen-Senken-Modell der Stadt als Raum mit deutlich mehr Energienachfrage als Energieproduktionspotenzial und des „Lands“ als Raum mit deutlich mehr Energieproduktionspotenzial als Energienachfrage nicht ausreichen wird, um den Systembeitrag der erneuerbaren Energien künftig deutlich auszubauen. „Energiequelle“ wäre in diesem einfachen Modell eher das Land – „Energiesenke“ eher die Stadt. Deshalb sollte erforscht werden, wie neue Kooperationsformen aussehen, die organisatorisch, logistisch und energietechnisch sicherstellen, dass Stadt und Land ihre vielfältigen räumlichen Mischformen zwischen klarer energetischer Senken- oder Quellencharakteristik erkennen, verorten und nutzen können. In einer weiterentwickelten Form könnte dabei der Katalog der Flächenbedarfe von Anlagen erneuerbarer Energiegewinnung in Fokusgruppenworkshops eingesetzt werden.

5.5.5 Erforschung der Kombinationen aus sozialwissenschaftlichen und energietechnischen Methoden für regionale Entscheidungsprozesse

In dieser Untersuchung werden Studienreferenzen genannt, die sowohl sozialwissenschaftliche Methoden wie Leitfadeninterviews, Mapping von Akteurinnen und Akteuren, Governanceanalysen als auch nichtsozialwissenschaftliche Methoden wie GIS-Analysen oder Ist- und Soll-Modelle der Energienachfrage kombiniert eingesetzt haben. Wesentlich häufiger findet man Studien, die entweder rein sozialwissenschaftlich oder rein physisch-technisch mit Gebäude- oder Infrastrukturdaten gearbeitet haben. Daher besteht Forschungsbedarf zur Frage, ob diese Methodenkombination neue Erkenntnisse dazu liefern könnte, wie Entscheidungsprozesse in regionalen Energiekonzepten künftig einfacher, schneller und häufiger gelingen könnten und wie ein dazu passendes Forschungsdesign beschaffen wäre. Dazu könnten etwa sozialräumliche und energietechnische Erfolgskriterien in einer größeren Anzahl von langjährig aktiven Energieregionen analysiert werden. Produkt solcher Metaforschung wäre ein Erfolgsfaktorenkatalog, der Aussagen zur Wirkungsstärke sozialräumlicher und nichtsozialräumlicher „Hebel“ in regionalen Entscheidungsprozessen für Energieszenarien treffen kann.

5.5.6 Erneuerbare Energien als Kernelement in regionalen Energieraumplänen

Ein regionaler Energieraumplan sollte Inhalte zu Ist und Soll der Energienachfrage und der Energieerzeugungspotenziale, aber auch zu Mobilitätsaspekten enthalten. Aufgrund der sehr unterschiedlichen räumlichen und sozialräumlichen Rahmenbedingungen in Österreichs Regionen besteht Forschungsbedarf dazu, wie solche

regionalen Energieraumpläne, differenziert nach verschiedenen Regionstypen, künftig funktionieren könnten. Das beinhaltet folgende Aufgabenstellungen:

- Welche Planungsebene (Bund, Land, Regionen, Gemeinden) übernimmt in welcher Region die Lenkungsverantwortung für den „Weg zum regionalen Energieraumplan“?
- Welche Inhalte sollte ein Energieraumplan haben und welche Planungsebene trägt für welche Grundlagendaten die Verantwortung?
- Wie können die Inhalte in einem Ist- und Soll-Zustand im Energieraumplan verortet werden und wie ist ihre Verbindlichkeit mit den „klassischen“ örtlichen Raumplanungsinstrumenten (Flächenwidmungsplan, Bebauungsplan, örtliches Entwicklungskonzept), aber auch über regionale Vorrang- oder Ausschlusszonen der Potenziale erneuerbarer Energien abzusichern?

Abschließend entwirft die folgende Tabelle 46 zum weiteren Forschungsbedarf einen Basisentwurf, der vorschlägt, welche Kooperationsprodukte der Weg zum regionalen Energieraumplan beinhalten und wer bei diesen Produkten die Haupt- und Mitarbeitungsverantwortung tragen könnte.

Insgesamt wird mit dieser Übersicht zum Forschungsbedarf deutlich ersichtlich, dass die Hürden auf dem Weg zum regionalen Energieraumplan als Instrument für die Umsetzung der Energiewende vor allem im sozialen Raum zu verorten sind. Diese Hürden können nicht (nur) energietechnisch überwunden werden, sondern brauchen integrative Planungs- und Beteiligungsprozesse. Der Kooperationsraum Region bietet dafür besondere Potenziale.

Tabelle 46: Entwurf zu einem regionalen Energieraumplan – Produkte und Verantwortungen zwischen Bundesland, Regionen und Gemeinden

Kooperationsprodukt	Inhalte der Kooperationsprodukte	Land	Region	Gemeinden
Potenzialkarten: Biomasse und Biogas, Windkraft, Solarthermie, Photovoltaik, Wasserkraft, Abwärme, Geothermie	Flächen im bebauten und unbebauten Raum, die ein zusätzlich (zum bereits aktiven Potenzial) mögliches erneuerbares Energiepotenzial enthalten.	X	(X)	(X)
Status quo des Energiesystems: Kraftwerke (Leistungen und Energiemengen pro Jahr), Lage und Zustand von Elektrizitäts- und Wärmenetzen, Speicherkraftwerken und des Gas- und Stromnetzes	Übersicht systemrelevanter, interkommunal bedeutsamer Anlagen. Bei der Leitungsinfrastruktur braucht es die Kooperation mit den Energieversorgungsunternehmen.	X	(X)	
Potenzialstudie „Virtuelles regionales Kraftwerk“	Auf Basis der zeitlich vorgelagerten Potenzialkarten: Ausschluss- und Eignungskriterien für erneuerbare Energiepotenziale auf regionaler Ebene inklusive einfacher Abschätzung des Selbstversorgungsgrades	X	(X)	
Regionaler Energieraumplan, mit Ist- und Soll-Inhalten zu Energiebedarfen, Anteil der erneuerbaren Energieversorgung und Mobilitätsaspekten	Grenzen energieräumlicher Typologien auf regionaler Ebene (Siedlungs- und Landschaftsteile), Vorschläge für quartiersgenaue „Untertypen“		X	(X)
Detailpotenzialkarten: Geothermie, Solarenergie, Einsparungen beim Heizwärmebedarf, thermische Sanierungen, Nachverdichtungen	Räumliche und zeitliche Entwicklungsprioritäten, Fokus auf Bestandskonversion		(X)	X
Kooperationsvertrag zur Priorisierung der Umsetzungs- und Maßnahmen-schritte inklusive „Wartungsdesign“ des regionalen Energieraumplanes	Agreement über Finanzierung, Ziele und Monitoring der energieraumplanerischen Kooperation	(X)	X	(X)
Bewertung der Auswirkungen des regionalen Energieraumplans auf die Energiestrategie des Bundeslandes und auf die Ziele internationaler Klimaschutzvereinbarungen	Kriterien-Set (etwa CO ₂ -Emissionen) zur Überprüfung der Policy-Wirksamkeit	X		

Rolle in der Kooperation zu Produkten des regionalen Energieraumplanes:

X Federführung und Hauptverantwortung

(X) Kontrolle, Mitarbeit

Quelle: eigene Darstellung

Literaturverzeichnis

- Agemar, T., Alten, J., Ganz, B., Kuder, J., Kühne, K., Schumacher, S., und Schulz, R. (2017). GeotIS – Geothermisches Informationssystem für Deutschland. Geothermische Standorte und geothermische Potenziale, hg. v. Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik. Verfügbar unter <https://www.geotis.de/geotisapp/geotis.php>. Zugriff am 01.06.2017.
- Agentur für erneuerbare Energien (2016). Wie funktioniert oberflächennahe Geothermie? Verfügbar unter www.unendlich-viel-energie.de/mediathek/grafiken/wie-funktioniert-oberflaechennahe-geothermie. Zugriff am 23.03.2020.
- Akademie für Raumforschung und Landesplanung (Hrsg.) (2005). Handwörterbuch der Raumordnung. Hannover: Akademie für Raumforschung und Landesplanung.
- Albrechts, L. (2010). How to Enhance Creativity, Diversity and Sustainability in Spatial Planning: Strategic Planning Revisited. In: Making Strategies in Spatial Planning: Knowledge and Values, hg. v. M. Cerrera, G. Concio und V. Monno. Dordrecht: Springer Netherlands, S. 3–25. DOI: 10.1007/978-90-481-3106-8-1.
- Amme, J. (2013). Empfehlungen zum Einsatz kleiner Windenergieanlagen im urbanen Raum – Ein Leitfaden, hg. v. Jochen Tweele HTW Berlin. Verfügbar unter www.aee-now.at/cms/fileadmin/downloads/allgemein/Kleinwind/Kleinwind_Handlungsempfehlungen_HTW-Berlin.pdf. Zugriff am 19.04.2016.
- Amt der NÖ Landesregierung (2019). NÖ Energiefahrplan 2030. Kurzfassung. Verfügbar unter www.noel.gv.at/noel/Energie/Klima-_und_Energiefahrplan_2020_2030.pdf. Zugriff am 20.10.2019.
- Amt der steiermärkischen Landesregierung (o. J.). Energiestrategie Steiermark 2025. Verfügbar unter www.umwelt.graz.at/cms/dokumente/10260085_6740671/8c9aaa2b/Energie-strategie_2025_inkl_Vorwort%20FINAL_20100816.pdf. Zugriff am 23.03.2020.
- Austrian Wind Power GmbH und RaumUmwelt Planungs-GmbH (2010). Umweltverträglichkeitsklärung gem. § 6 UVP-G 2000 Windpark Andau/Halbtürn. Verfügbar unter https://www.eib.org/attachments/pipeline/20100482_nts1_de.pdf. Zugriff am 23.03.2020.
- Bartelmus, P. (2014). Nachhaltigkeitsökonomik. Eine Einführung. Wiesbaden: Springer Gabler.
- Berchtold-Domig, M., Geitner, C., Hastik, R., Meusburger, P., und Steurer, P. (2015). Musterhektar: Beschreibung der Methode und Anwendung, hg. v. Regionalentwicklung Vorarlberg eGen. Verfügbar unter www.recharge-green.eu/wp-content/uploads/2012/12/15-03-11_recharge-green_Musterhektare-booklet150.pdf. Zugriff am 23.03.2020.
- Biermayr, P. (2017). Erneuerbare Energie in Zahlen 2017. Entwicklung in Österreich Datenbasis 2016, Wien: Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus. Download unter www.bmlrt.gv.at/umwelt/energie/wende/erneuerbare-energie-in-zahlen-2018.html. Zugriff am 23.03.2020.
- Blatter, M. (2014). Atlas der erneuerbaren Energien. Norderstedt: Books on Demand. Verfügbar unter <http://www.energie-atlas.ch/12-downloads/978-3-7347-3750-3-gratiskarten.pdf>.
- BMWFJ (Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend) und BMLFUW (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft) (2010). EnergieStrategie Österreich. Verfügbar unter www.bmwfw.gv.at/Ministerium/Staatspreise/Documents/energie-strategie_oesterreich.pdf. Zugriff am 23.08.2016.
- Boos, M. (o. J.). Wärmepumpe Kennzahlen – Leistungszahl, Jahresarbeitszahl, Primärenergiefaktor, hg. v. mb-netzwerk. Verfügbar unter www.waermepumpen-portal.de/waermepumpe_kennzahlen.html. Zugriff am 19.03.2020.
- Bronin, S. C. (2012). Building-Related Renewable Energy and the Case of 360 State Street. In: Vanderbilt Law Review (65) 6. Verfügbar unter https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2181635. Zugriff am 19.03.2020.
- Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (2010). Genügend Raum für den Ausbau erneuerbarer Energien? BBSR-Berichte Kompakt 13/2010. Bonn: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR). Verfügbar unter www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/BerichteKompakt/2010/DL_13_2010.pdf?__blob=publicationFile&v=2. Zugriff am 23.03.2020.

- Bundesverband der landwirtschaftlichen Berufsgenossenschaften e. V. (2008). Biomasse Heizanlagen. Verfügbar unter www.gesetze-im-internet.de/biomassev/BiomasseV.pdf. Zugriff am 12.04.2017.
- Bundesverband Geothermie (2005). Direkte Nutzungsformen der Erdwärme. Verfügbar unter www.geothermie.de/geothermie/geothermische-technologien.html. Zugriff am 22.06.2017.
- Bundesverband WindEnergie (o. J.). Größen- und Leistungsklassen von Windenergieanlagen. Verfügbar unter www.wind-energie.de/themen/anlagentechnik/funktionsweise/. Zugriff am 01.09.2017.
- David-Freihsl, Roman (2012). Wiener Geothermie-Plan in Aspern muss begraben werden. In: Der Standard, 13.12.2012. Verfügbar unter <http://derstandard.at/1353209116668/Wiener-Geothermie-Plan-in-Aspern-muss-begraben-werden>. Zugriff am 23.03.2020.
- Dell, G. (2017). Energie Leitregion OÖ 2050. Die Energiestrategie Oberösterreichs. Verfügbar unter www.land-oberoesterreich.gv.at/files/publikationen/esv_Energiestrategie_Leitregion.pdf. Zugriff am 23.03.2020.
- Department für Raumplanung (2013). ENUR – Energie im urbanen Raum, TU Wien. Verfügbar unter <http://enur.project.tuwien.ac.at/>. Zugriff am 25.01.2014.
- Der Standard (2016). Wie die Sanierungsquote steigen könnte, 11.03.2016. Verfügbar unter <http://derstandard.at/2000032756971/Wie-die-Sanierungsquote-steigen-koennte>. Zugriff am 23.03.2020.
- Deutscher Rat für Landespflege (2006). Die Auswirkungen erneuerbarer Energien auf Natur und Landschaft. Schriftenreihe des deutschen Rates für Landschaftspflege 79. Verfügbar unter www.landspflege.de/aktuelles/tagung%20EE/DRL-Stellungnahme-79_ErnEng.pdf. Zugriff am 23.03.2020.
- Dumke, H., Eder, M., Fischbäck, J., Hirschler, P., Kronberger-Nabielek, P., Maier, S., et al. (2017). EnergieRaumPlanung für Smart City Quartiere und Smart City Regionen (ERP_hoch3), Berichte aus Energie- und Umweltforschung 16/2017, hg. v. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien. https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/sdz_pdf/berichte/enderbericht_2017-16_erphoch3.pdf. Zugriff am 23.03.2020.
- Eckl, M., Ernst, M., Hörl, B., Kalasek, R., Linzer, H., Mintscheff, I., Mayerhofer, R., Spruck, M., Voigt, A., und Walchhofer, H. (2015). Die energieautarke und klimaneutrale Stadt – Regionale Smart Grids (Wärme, Kälte und elektrischer Strom) aus erneuerbaren Energien. In: Raumplanung. Jahrbuch des Departments für Raumplanung der TU Wien 2015 (Jahrbücher des Departments für Raumplanung der TU Wien, Bd. 3, 1. Aufl., neue Ausgabe), hg. v. J. S. Dangschat, M. Getzner, M. Haslinger und S. Zech, Wien: NWV Verlag, S. 81–101.
- Energie Burgenland (o. J.). Windlexikon. Verfügbar unter www.energieburgenland.at/oekoenergie/windkraft/windlexikon/windlexikon.html?tx_sgglossary_pi1%5Bsearchmode%5D=1&tx_sgglossary_pi1%5Bsearch%5D%5Babc%5D=A. Zugriff am 08.09.2017.
- Energie Burgenland Gruppe (2017). Online Messwerte, Erzeugung und Verbrauch im Burgenland. Verfügbar unter www.netzburgenland.at/kundenservice.html. Zugriff am 23.03.2020.
- energiwerkstatt, rsa iSPACE, meteotest und Wegener Center der Uni Graz (2011). AuWiPot – Interaktiver Windatlas Österreich. Verfügbar unter www.windatlas.at/index.html. Zugriff am 23.03.2020.
- E-think und EEG Energy Economics Group (2013). Austrian Heat Map. Fernwärme- und Kraft-Wärme-Kopplung in Österreich. Verfügbar unter www.austrian-heatmap.gv.at/das-projekt/. Zugriff am 24.03.2017.
- Eurostat (2013). Anteil erneuerbarer Energien am Energieverbrauch in der EU 2013 auf 15 % gestiegen. Verfügbar unter <http://ec.europa.eu/eurostat/documents/2995521/6734517/8-10032015-AP-DE.pdf/18a48a8b-84cd-4960-9d25-e97c94b4a4b5>. Zugriff am 23.03.2020.
- Faninger, G. (2013). Energiestrategie für Kärnten 2050, IKN, Alpen-Adria Universität Klagenfurt. Verfügbar unter www.uni-klu.ac.at/iff/ogi/downloads/Energie-Knt-2050.pdf. Zugriff am 07.09.2017.
- Geier, S. (2009). Möglichkeiten für eine nachhaltige Energiewirtschaft durch die Raumordnung in Niederösterreich. Diplomarbeit, TU Wien, Fakultät für Architektur und Raumplanung. <http://repositum.tuwien.ac.at/obvutwhs/download/pdf/1609505?originalFilename=true>. Zugriff am 23.03.2020.

- Götzl, Gregor (2007). Geothermie in Österreich. In: Geo-Atlas Österreich (Hg.): Die Vielfalt des geologischen Untergrundes. Unter Mitarbeit von Thomas Hofmann und Hans P. Schönlaub. Wien: Böhlau, S. 66–67.
- Götzl, G., Ostermann, V., Kalasek, R., Heimrath, R., Steckler, P., Zottl, A., Novak, A., Haindlmaier, G., Hackl, R., Shadlau, S., und Reitner H. (2010). GEO-Pot: Seichtes Geothermie Potenzial Österreichs. Überregionale, interdisziplinäre Potenzialstudie zur Erhebung und Darstellung des oberflächennahen geothermischen Anwendungspotenziales auf Grundlage eines regelmäßigen Bearbeitungsrasters. In: Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 62, S. 120–129.
DOI: 10.1007/s00506-010-0185-2.
- Goldbrunner, J., und Novak, H. (1991). Energetische Nutzung der Geothermie. Wien: Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie. Verfügbar unter www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/BE006.pdf. Zugriff am 23.03.2020.
- Gowdy, J. (2005). The approach of ecological economics. In: Cambridge Journal of Economics 29 (2), S. 207–222. DOI: 10.1093/cje/bei033.
- Greene, N. (2014). Biomass: Not Carbon Neutral and Often Not Clean. NRDC, 08.04.2014, verfügbar unter www.nrdc.org/experts/nathanael-greene/biomass-not-carbon-neutral-and-often-not-clean. Zugriff am 23.03.2020.
- Gwehenberger, G., und Narodoslowsky, M. (2008). Sustainable processes – The challenge of the 21st century for chemical engineering. In: Process Safety and Environmental Protection (86) 5, S. 321–327. DOI: 10.1016/j.psep.2008.03.004.
- Hall, C. A. S., Lambert, J. G., und Balogh, S. B. (2014). EROI of different fuels and the implications for society. In: Energy Policy 64, S. 141–152. DOI: 10.1016/j.enpol.2013.05.049.
- Hegger, M. (2003). Von der passiven Nutzung zu einer smarten Solararchitektur. In: Solares Bauen. Strategien, Visionen, Konzepte, hg. v. C. Schittich. München/Basel: Institut für internationale Architektur-Dokumentation und Birkhäuser, S. 12–25.
- hitech (2014). Rosa und energieeffizient, 23.7.2014. Verfügbar unter www.hitech.at/rosa-und-energieeffizient/. Zugriff am 23.03.2020.
- Kleinwasserkraft Österreich (2017). Kleinwasserkraft Österreich. Verfügbar unter www.kleinwasserkraft.at/fakten/. Zugriff am 06.09.2017.
- IG Windkraft Österreich (2015). Abstandsregelungen für österreichische Windkraftanlagen. Verfügbar unter [www.igwindkraft.at/?xmlval_ID_KEY\[0\]=1240](http://www.igwindkraft.at/?xmlval_ID_KEY[0]=1240). Zugriff am 01.09.2016.
- IG Windkraft Österreich (2017a). Downloads der IG Windkraft. Verfügbar unter https://www.igwindkraft.at/?mdoc_id=1007668. Zugriff am 23.03.2020.
- IG Windkraft Österreich (2017b). Windkraft-Landkarte. Verfügbar unter [https://www.igwindkraft.at/?xmlval_ID_KEY\[0\]=1055](https://www.igwindkraft.at/?xmlval_ID_KEY[0]=1055). Zugriff am 23.03.2020.
- Institut für Philosophie und Wissenschaftstheorie (2017). Ökologische Ökonomie. IWP WIKI, Institut für Philosophie und Wissenschaftstheorie. Verfügbar unter www.iwp.jku.at/wiki/index.php/%C3%96kologische_%C3%96konomie. Zugriff am 27.03.2017.
- Jilek, W. (2001). Energiebericht 2001, Land Steiermark. Verfügbar unter www.lev.at/download/EB2001g.pdf. Zugriff am 23.03.2020.
- Joanneum Research, Geoteam und Energie AG oberösterreichische Wärme (2014). GeoEnergie2050. Verfügbar unter www.energieforschung.at/assets/project/downloads/834451-Endbericht-GeoEnergie2050-30062014-final.pdf. Zugriff am 01.10.2017.
- Joint Research Centre, Institute for Energy and Transport (2017). PV Potential Estimation Utility. Verfügbar unter re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html. Zugriff am 02.08.2017.
- Jüttemann, P. (o. J.). Bauformen und Konstruktionstypen kleiner Windkraftanlagen. Verfügbar unter www.klein-windkraftanlagen.com/technik/bauformen/. Zugriff am 23.03.2020.
- Kaltschmitt, M., Hartmann, H., und Hofbauer, H. (2009). Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren. Berlin/Heidelberg: Springer.
- Kaltschmitt, M., Streicher, W., und Wiese, A. (2006). Erneuerbare Energien. Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte. Berlin/Heidelberg/New York: Springer.
- Kaltschmitt, M., Streicher, W., und Wiese, A. (2014). Erneuerbare Energien. Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte. 5. Aufl., erw. und korr. Nachdruck. Berlin: Springer.

- Kanton Zürich (Hrsg.) (2013). Energieplan des Kantons Zürich. Verfügbar unter <http://maps.zh.ch/>. Zugriff am 18.10.2016.
- KBB Underground Technologies (o. J.). Geothermie – Zuverlässige Energie aus den Tiefen unserer Erde. Verfügbar unter www.kbbnet.de/fachbereiche/geothermie/. Zugriff am 02.10.2017.
- Kettner, C., Köppl, A., und Streicher, G. (2015). Klima- und Energiemodellregionen. Effekte im Energiesystem und in der (regionalen) Wirtschaft, Wien: WIFO Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung. Verfügbar unter http://www.wifo.ac.at/jart/prj3/wifo/resources/person_dokument/person_dokument.jart?publikationsid=58383&mime_type=application/pdf. Zugriff am 23.03.2020.
- Krenn, A., Winkelmeier, H., Wölfler, T., Tiefenbacher, K., Hantsch, S., und Näherer, U. (2013). IEA Windenergie Task 19: Windenergie in kalten Klimazonen. Wien: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie. Verfügbar unter https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/iea_pdf/endbericht_201327_iea_windenergie_task19.pdf. Zugriff am 23.03.2020.
- Landwirtschaftskammer Niederösterreich, Abteilung Betriebswirtschaft und Technik (2016). Biomasse – Heizungserhebung 2015. Verfügbar unter www.biomasseverband-ooe.at/uploads/media/Downloads/Publikationen/Heizwerkserhebung/Biomasseheizungserhebung_2015.pdf. Zugriff am 23.03.2020.
- Lane, J. (2015). Why Tim Searchinger Is Dead Wrong About Biofuels and Land Use. *BiofuelsDigest*, 18.02.2015. Verfügbar unter www.biofuelsdigest.com/bdigest/2015/02/18/why-tim-searchinger-is-dead-wrong-about-biofuels-and-land-use/. Zugriff am 23.03.2020.
- Latzer, D. (2013). Potentialabschätzung von Kleinwindenergie im urbanen Raum. Strategische Standortsuche mit GIS Methoden. Diplomarbeit, TU Wien. Verfügbar unter www.ub.tuwien.ac.at/dipl/2013/AC10774871.pdf. Zugriff am 23.03.2020.
- Leibniz-Institut für Informationsinfrastruktur (Hrsg.) (2013). Seismische Messungen an potenziellen Geothermiestandorten, BINE-Informationdienst. Verfügbar unter www.bine.info/publikationen/publikation/tiefe-geothermie-dauerhaft-nutzen/messungen-mit-vibrationsfahrzeugen/. Zugriff am 23.03.2020.
- Magistrat der Stadt Wien, MA 18 (2014). Smart City Wien. Rahmenstrategie. Verfügbar unter https://smartcity.wien.gv.at/site/wp-content/blogs.dir/3/files/2014/08/Langversion_SmartCityWienRahmenstrategie_deutsch_doppelseitig.pdf. Zugriff am 23.03.2020.
- Mertens, K. (2015). Photovoltaik: Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis. München: Carl Hanser.
- Michaud-Larivière, J. (2015). Newwind R & D. Verfügbar unter electrek.co/2016/12/06/newwind-wind-turbine-tree/. Zugriff am 15.05.2015.
- Ministerium für ein lebenswertes Österreich (2017). LEADER, 86 Lokale Aktionsgruppen, BMLFUW. Verfügbar unter www.bmlrt.gv.at/land/laendl_entwicklung/leader/leaderprojekte15.html. Zugriff am 20.04.2017.
- Moroni, S., Antoniucci, V., und Bisello, A. (2016). Energy sprawl, land taking and distributed generation: towards a multi-layered density. In: *Energy Policy* 98, S. 266–273. DOI: 10.1016/j.enpol.2016.08.040.
- Narodoslawsky, M. (2016). Towards a Sustainable Balance of Bio-resources Use Between Energy, Food and Chemical feedstocks. In: *Renewable Energy* (1) 2, S. 45–107. DOI: 10.1561/27000000001.
- Narodoslawsky, M. und Krotscheck, C. (1996). The Sustainable Process Index a new dimension in ecological evaluation. In: *Ecological Engineering* 6 (4), S. 241–258. DOI: 10.1016/0925-8574(95)00060-7.
- Narodoslawsky, M., Maier, S., Kollmann, R., und Eder, M. (2015). The Challenge of Utilising Bio-Resources: A Regional Perspective. Verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/289379013_The_Challenge_of_Utilising_Bio-Resources_A_Regional_Perspective/link/568c38cd08ae197e4268a3ea/download. Zugriff am 25.03.2016.
- NREL (2014). Concentrating Solar Power Research – Concentrating Photovoltaic Technology, hg. v. U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. Verfügbar unter de.m.wikipedia.org/wiki/Datei:Best_Research-Cell_Efficiencies.png. Zugriff am 15.06.2016.

- Österreichische Energieagentur (2017). Klima und Energie: Wissen kompakt, hg. v. Klima- und Energiefonds. Verfügbar unter www.klimaundenergiemodellregionen.at/assets/Uploads/Downloads/Member-Bereich/Klima-und-Energie-Wissen-kompakt-2017.pdf. Zugriff am 23.03.2020.
- Österreichischer Biomasse-Verband (2017). Basisdaten Bioenergie Österreich 2017. Verfügbar unter https://www.biomasseverband.at/wp-content/uploads/Basisdaten_Bioenergie_2017.pdf. Zugriff am 23.03.2020.
- ORC Fachverband e.V. (2017). Was ist die ORC-Technologie? Verfügbar unter <https://orc-fachverband.jimdofree.com/informationen/was-ist-die-orc-technologie/>. Zugriff am 23.03.2020.
- Paschotta, R. (2014). RP-Energie-Lexikon – Grundbegriffe, Fakten und Zusammenhänge im Fachbereich Energie, sachlich neutral, verständlich und praxisnah erklärt, Fachartikel, RP Photonics Consulting GmbH. Verfügbar unter www.energie-lexikon.info/kontakt.html. Zugriff am 28.08.2014.
- Pfemeter, C., Kahr, S., und Liptay, P. (Hg.) (2016). Bioenergie Atlas Österreich. Österreichischer Biomasse-Verband; Österreich. Wien: Österreichischer Biomasse-Verband (Klimaaktiv). Verfügbar unter <http://www.gbv.de/dms/tib-ub-hannover/880217545.pdf>. Zugriff am 17.03.2017.
- Pötsch, E. M. (2008). Potentiale der energetischen Nutzung im Alpenen Grünland. Verfügbar unter www.raumberg-gumpenstein.at/cm4/de/?option=com_r_fodok&Itemid=200881&task=detail&pubInr=5137. Zugriff am 06.11.2017.
- Quaschnig, V. (2015). Regenerative Energiesysteme. Technologie – Berechnung – Simulation. 9., aktualisierte und erw. Aufl. München: Hanser.
- Schlaich, J., Schiel, W. (1995). The Solar Chimney: Electricity from the Sun: National Book Network. Verfügbar unter https://www.researchgate.net/profile/Wolfgang_Schiel2/publication/282859303_The_Solar_Chimney_Electricity_from_the_sun/links/561fae0908ae93a5c9241b51/The-Solar-Chimney-Electricity-from-the-sun.pdf.
- Schlump, C., und Malottki, C. v. (Hrsg.) (2013). Anforderungen an energieeffiziente und klimaneutrale Quartiere (EQ). Werkstatt: Praxis 81. Berlin: Bundesinstitut für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung (BMVBS). Online verfügbar unter https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/ministerien/bmvbs/wp/2013/heft81_DL.pdf. Zugriff am 23.03.2020
- Schönwandt, W. L. (2002). Planung in der Krise? Theoretische Orientierungen für Architektur, Stadt- und Raumplanung. Stuttgart: Kohlhammer.
- Schweizerischer Erdbeendienst (2017). Induzierte Erdbeben im Nachgang des eingestellten Geothermieprojekts in Basel, ETH Zürich. Verfügbar unter http://www.seismo.ethz.ch/export/sites/sedsite/home/galleries/pdf_home/Induzierte-Erdbeben-im-Nachgang-des-eingestellten-Geothermieprojekts-in-Basel.pdf. Zugriff am 23.03.2020.
- Searchinger, T., Edwards, R., Mulligan, D., Heimlich, R., und Plevin, R. (2015). Do biofuel policies seek to cut emissions by cutting food? In: Science (347) 6229. S. 1420–1422. Verfügbar unter <http://science.sciencemag.org/content/sci/347/6229/1420.full.pdf>. Zugriff am 23.03.2020.
- Selle, K. (2005). Planen. Steuern. Entwickeln. Über den Beitrag öffentlicher Akteure zur Entwicklung von Stadt und Land. Dortmund: Dortmunder Vertrieb für Bau- und Planungsliteratur.
- Shiple, R. (2002). Visioning in Planning. Is the Practice Based on Sound Theory? In: Environment and Planning A, 34 (1), S. 7–22. DOI: 10.1068/a3461.
- Stanzer, G., Novak, S., Dumke, H., Plha, S., Schaffer, H., Breinesberger, J., Kirtz, M., Biermayer, P., und Spanring, C. (2010). REGIO Energy – Regionale Szenarien erneuerbarer Energiepotenziale in den Jahren 2012/2020. Verfügbar unter http://regioenergy.oir.at/sites/regioenergy.oir.at/files/uploads/pdf/REGIO-Energy_Endbericht_201013_korr_Strom_Waerme.pdf. Zugriff am 23.03.2020.
- Stöglehner, G., Erker, S., und Neugebauer, G. (2014). ÖREK-Partnerschaft Energieraumplanung. Ergebnispapier der ExpertInnen. Verfügbar unter www.oerok.gv.at/fileadmin/Bilder/2.Reiter-Raum_u_Region/1.OEROK/OEROK_2011/PS_Energieraumplanung/Ergebnispapier_Energieraumplanung_2014-06.pdf. Zugriff am 23.03.2020.
- Stöglehner, G., Narodoslawsky, M., Steinmüller, H., Steinger, K., Weiß, M., Mitter, H.,

- Neugebauer G. C., Weber, G., Niemetz, N., Kettl, K.-H., Eder, M., Sandor, N., Pflügmayer, B., Markl, B., Kollmann, A., Friedl, C., Lindorfer, J., Luger, M., und Kulmer, V. (2011). PlanVision – Visionen für eine energieoptimierte Raumplanung. Projektendbericht. Gefördert aus Mitteln des Klima- und Energiefonds. Wien. Verfügbar unter http://www.boku.ac.at/fileadmin/data/H03000/H85000/H85500/materialien/planvision/Endbericht_PlanVision.pdf. Zugriff am 23.03.2020.
- Thalhammer, W., und Stöglehner, G. (2011). ÖREK-Schriftenreihe Nr. 192 – Partnerschaft „Energieraumplanung“: Zusammenfassung. Verfügbar unter http://www.oerok.gv.at/fileadmin/Bilder/5.Reiter-Publikationen/Schriftenreihe_Kurzfassung/Schriftenreihe_192_Zusammenfassung_DE.pdf. Zugriff am 23.03.2020.
- TOB – Technologieoffensive Burgenland (2013). Energiestrategie Burgenland 2020. Verfügbar unter www.tobgld.at/uploads/tx_mddownloadbox/Energiestrategie_Burgenland_2020__01.pdf. Zugriff am 23.03.2020.
- Umweltbundesamt Österreich (2004). Emissionen aus Verbrennungsvorgängen zur Raumwärmeerzeugung. Verfügbar unter http://www.iwo-austria.at/fileadmin/user_upload/umwelt/EmissionenRaumwaermeEndfassung060904.pdf. Zugriff am 23.03.2020.
- Umweltbundesamt Österreich (2017). CORINE Landcover Nomenklatur. Verfügbar unter http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/umweltthemen/raumplanung/1_flaechennutzung/corine/CORINE_Nomenklatur.pdf. Zugriff am 23.03.2020.
- RIS des Bundes (XX), UVP-G 2000, BGBl. I Nr. 111/2017 (2020): Bundesgesetz über die Prüfung der Umweltverträglichkeit (Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz 2000 – UVP-G 2000), vom BGBl. I Nr. 111, 24.03.2020. Verfügbar unter <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10010767>, Zugriff am 30.09.2017.
- VDE ETG Energietechnische Gesellschaft. (o. J.). Biomassekraftwerke. Verfügbar unter <https://www.vde.com/de/etg/arbeitsgebiete/informationen/biomassekraftwerke>. Zugriff am 23.03.2020.
- Vogl, B. (2017). Energierahmenstrategie der Stadt Wien. Teil 2. Wien: MA 20 Energieplanung Stadt Wien. Verfügbar unter www.wko.at/service/w/umwelt-energie/Vogl_Energie-Rahmenstrategie_Wien.pdf. Zugriff am 23.03.2020.
- Vorarlberger Landesregierung (2011). Schritt für Schritt zur Energieautonomie in Vorarlberg. Maßnahmenplan bis 2020, Schlussbericht. Verfügbar unter https://www.kleinwasserkraft.at/fileadmin/PDF/Bundesländer_spezifisch/Vorarlberg/schlussberichtmassnahmenp.pdf. Zugriff am 23.03.2020.
- Walchhofer, H.-P. (1999). Ressourceneffiziente Bebauungsstrukturen (1 Band). Dissertation, TU Wien.
- Wang, H.-Q., Batentschuk, M., Osvet, A., Pinna, L., und Brabec, C. J. (2011). Rare-Earth Ion Doped Up-Conversion Materials for Photovoltaic Applications. In: *Advanced Materials* 23 (22–23), S. 2675–2680. DOI: 10.1002/adma.201100511.
- Wien Energie, AIT, Geologische Bundesanstalt, Geo5, Heinemann Oil (HOL), Montanuniversität Leoben et al. (2017). Projektplattform „Geo Tief Wien“. Verfügbar unter www.geotiefwien.at/eportal3/. Zugriff am 23.03.2020.
- Wikipedia (2017). Erntefaktor (Energy Returned on Energy Invested). Verfügbar unter <https://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=161415219>. Zugriff am 19.03.2020.
- Windstill (2017). Infraschall von Windkraftanlagen als Gesundheitsgefahr. Verfügbar unter <https://www.windstill.at/infraschall-von-windkraftanlagen-als-gesundheitsgefahr/>. Zugriff am 15.09.2017.
- Winkelmeier, H., Krenn, A., und Zimmer, F. (2014). Das realisierbare Windpotential Österreichs für 2020 und 2030. Follow-up Studie zum Projekt „Windatlas und Windpotentialstudie Österreich“. Verfügbar unter <http://www.energiewerkstatt.org/wp/wp-content/uploads/2015/02/Pr%C3%A4sentationWinkelmeier-AWES-2014.pdf>. Zugriff am 23.03.2020.
- Wonka, E. (2008). Neuabgrenzung des Dauersiedlungsraumes. In: *Statistische Nachrichten* 5, S. 432–442. Verfügbar unter www.oerok-atlas.at/documents/neuabgrenzung_des_dauersiedlungsraums.pdf. Zugriff am 23.03.2020.
- Zech, S., und Giffinger, R. (2013). Vorwort. In: *Energie und Raum (Forum Raumplanung, Bd. 20)*, hg. v. R. Giffinger und S. Zech. Wien: Lit.

Bildnachweis

- AEE – Arbeitsgemeinschaft ERNEUERBARE ENERGIE Dachverband (2008). Foto der Solaranlage am Fernheizwerk/AEVG-Gelände, Graz. Verfügbar unter www.aee.at/aee/images/Bilder-fuer-Zeitungen/2008-03/images/02_0.gif. Zugriff am 10.10.2010.
- AGRANA Stärke GmbH (2008). Foto der Agrana Stärke (Bioethanol), Pischelsdorf, Niederösterreich. Verfügbar unter www.energievision.com/files/2017/07/Agrana01a-e1499854276858.jpg. Zugriff am 05.09.2010.
- Agrargemeinschaft Rankweil-Meiningen (2003). Foto des Biomasse-Heizwerkes Rankweil, Vorarlberg. Verfügbar unter www.rankweil.at/veranstaltungen/10-jahre-energieautonomie-vorarlberg/@@images/d9299674-b120-43de-883d-2c55f8002310.jpeg. Zugriff am 15.07.2012.
- Akazienblau (2009). Foto des Solarparks Lieberose. Verfügbar unter <https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:LieberoseSolarpark.jpg>. Zugriff am 12.12.2012.
- Arcon-Sunmark A/S (2015). Foto der Solaranlage Vojens Fjernvarme, Dänemark. Verfügbar unter www.sunwindenergy.com/sites/default/files/field/image/markt_st_arcon-sunmark_merger.jpg. Zugriff am 05.04.2016.
- ATRIO Shopping Center GmbH (2007). Foto des ATRIO Shopping Center, Villach. Verfügbar unter <https://media.holidaycheck.com/data/urlaubsbilder/images/146/1168607393.jpg>. Zugriff am 01.04.2012.
- Audi AG (2010). Foto der Audi AG Photovoltaik, Neckarsulm, Deutschland. Verfügbar unter <https://p5.focus.de/img/fotos/origs1067670/9315382992-w800-h533-o-q75-p5/144077-Audi-Mit-Strom-aus-der-Sonne.jpg>. Zugriff am 01.01.2014.
- Bakken (2011). Foto der Offshore-Windpark London Array, Ostküste Englands (Kent), Vereinigtes Königreich. Verfügbar unter <https://news-cdn.softpedia.com/images/news2/World-s-Largest-Offshore-Wind-Farm-Delivers-Record-Output-436507-2.jpg>. Zugriff am 30.04.2012.
- BSU Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt, Hamburg-Wilhelmsburg, Deutschland © LGV (2015). Verfügbar unter <https://i.ytimg.com/vi/SUHwLahKwhQ/maxresdefault.jpg>. Zugriff am 03.07.2015.
- Danish Wind Industry Association (2000). Foto der Wind farm Middelgrunden Offshore Wind Farm, Kopenhagen, Dänemark. Verfügbar unter http://web.mit.edu/nature/archive/student_projects/2007/cherryj/urban-nature/img/copenhagen3.jpg. Zugriff am 15.08.2015.
- Energetica Industries GmbH (2014). Foto der mobilen PV-Anlage „SmartFlower“. Verfügbar unter www.energetica-pv.com/wp-content/uploads/2015/07/portfolio-smartflower3.jpg. Zugriff am 10.10.2014.
- Energetica Industries GmbH (2015). Foto der PV Kleinstanlage „Simon“. Verfügbar unter <http://simon.energy/Content/uploads/home/balkonhelden-slide3.jpg>. Zugriff am 01.09.2015.
- Energie Burgenland AG (2003). Foto des Windparks Neusiedl am See, Burgenland, Österreich. Verfügbar unter www.energieburgenland.at/fileadmin/_migrated/pics/oeko_windpark_entwicklung_02.jpg. Zugriff am 10.02.2013.
- EWS Consulting GmbH (2014). Windpark Munderfing, Oberösterreich. Verfügbar unter www.ews-consulting.com/system/html/03-007ff420.jpg. Zugriff am 08.12.2015.
- Fleischwaren Berger Ges.m.b.H. & Co KG (2015). Foto der Solarwärmeanlage bei Fleischwaren Berger, Niederösterreich. Verfügbar unter www.berger-schinken.at/wp-content/uploads/2015/01/philosophie-nachhaltigkeit.jpg. Zugriff am 12.12.2015.
- Frans Lemmens (2012). Foto der Almere Solar Island, Niederlande, Alamy Stock Photo. Verfügbar unter <http://i7.alamy.com/zooms/4a9e5a6af3234be093843a45a140e5f6/the-netherlands-almere-nuon-solar-island-solar-panels-aerial-ctfhc4.jpg>. Zugriff am 03.03.2012.
- FWG-Fernwärmeversorgung Bockfließ (2013). Foto des Strohkraftwerkes und Fernwärme Bockfließ, Niederösterreich. Verfügbar unter http://wordpress.fernwaerme-bockfliess.at/wp-content/uploads/2015/08/cropped-1421152_243800775776430_1420093400_o.jpg. Zugriff am 01.06.2014.

- GeoENERGIE Konzept GmbH (2015). Foto des Zentrums für berufliche Bildung und Weiterbildung, Duisburg. Verfügbar unter www.geoenergie-konzept.de/fileadmin/user_upload/1145_Duisburg_2.jpg. Zugriff am 16.08.2016.
- Geothermie Wärmegesellschaft Braunau-Simbach mbH (2015). Anlagenfoto der Geothermieanlage Braunau-Simbach. Verfügbar unter www.geothermie-braunau-simbach.com/Zentrale-Ilo.jpg?w=1024&h=0&bf=true&s=LERmE5ts&hp=101. Zugriff am 14.01.2015.
- Geox GmbH (2015). Geothermiekraftwerk Landau. Verfügbar unter www.dw.com/image/3789111_404.jpg. Zugriff am 25.10.2015.
- Google Maps (2016). Map Data © 2016 Google. Verfügbar unter www.google.com/permissions/geoguidelines/attr-guide/
- HEI Eco Technology GmbH (2014). Foto des SQL Passiv-Bürohauses, Mödling. Verfügbar unter www.solarfassade.info/img/projektbeispiele/sol4_2.jpg. Zugriff am 11.11.2015.
- ImWind GmbH (2011). Foto der Großwindräder Potzneusiedl, Burgenland, Österreich. Verfügbar unter https://fm4v3.orf.at/v2static/storyimages/site/fm4/2013015/windpark%20potzneusiedl_body.JPG. Zugriff am 09.09.2013.
- Insider Monkey (2010). Foto Windpark Gansu (Jiuquan Wind Power Base), am Rande der Wüste Gobi, China. Verfügbar unter www.ibcentre.tech/wp-content/uploads/2019/07/Gansu2.jpg. Zugriff am 03.04.2014.
- Kluge, J. (2014). Einpflügen des Agrothermierohrs, Doppelacker GmbH. Verfügbar unter www.doppelacker.com/images/bilder/wr/DSC_0812_kl.jpg. Zugriff am 05.01.2017.
- Kwaliteits Atlas Groene Hart (2017). Foto der Windkraftanlage Giessenwind, Südholland. Verfügbar unter <https://kwaliteitsatlas.nl/wp-content/uploads/2015/03/Giessenwind.jpg>. Zugriff am 05.01.2017.
- Kyocera Corporation (2013). Foto der schwimmenden PV-Anlage in Kagoshima, Japan. Verfügbar unter http://www.sunwindenergy.com/sites/default/files/field/image/news_markt_pv_70_mw_pv-anlage_kyocera.jpg. Zugriff am 05.01.2017.
- Magistrat der Stadt Wien, Magistratsabteilung 1 – Stadtteilplanung und Flächennutzung (2014). Entwurf des Stadtentwicklungsgebietes Nordbahnhof. Verfügbar unter www.wien.gv.at/stadtentwicklung/projekte/nordbahnhof/grundlagen/images/leitbild-2014-gr.jpg. Zugriff am 05.05.2014.
- Mayer, B. (2012). Foto des Tauernwindparkes, Steiermark. Verfügbar unter <https://de.wikipedia.org/wiki/Tauernwindpark#/media/Datei:TanzstattSolarenergyWindturbines.JPG>. Zugriff am 05.06.2013.
- Laan, M. P. van der (2013). Foto der Anholt Offshore Wind Farm, Dänemark. Verfügbar unter www.researchgate.net/profile/M_Paul_Van_Der_Laan/publication/317562706/figure/fig1/AS:613924202369056@1523382344589/Location-and-layout-of-the-Anholt-offshore-wind-farm-Top-left-plot-Denmark-bottom-left.png. Zugriff am 10.09.2014.
- SolarCity (2016). Foto der Tesla PV-Freiflächenanlage in Samoa. Verfügbar unter <https://i.insider.com/58346474e02ba7e5008b5c01?width=300&format=jpeg&auto=webp>. Zugriff am 18.04.2016.
- Süddeutsche Zeitung (2016). Foto der Geothermieanlage Grünwald (Laufzorn), Bayern, Deutschland. Verfügbar unter <http://media-cdn.sueddeutsche.de/image/sz.1.3026936/680x382?v=1465407938000>. Zugriff am 12.01.2016.
- Torresol Energy (2011). Foto der Gemasolar-Anlage, Spanien. Verfügbar unter <https://torresolenergy.com/wp-content/uploads/2017/11/planta-termosolar-gemasolar-hi1-600x400.jpg>. Zugriff am 07.06.2013.
- US Government, BLM – Bureau of Land Management (1984). Foto der Solar Energy Generating Systems (SEGS), Mojave-Wüste, Kalifornien. Verfügbar unter https://de.wikipedia.org/wiki/Solar_Energy_Generating_Systems#/media/Datei:Solar_Plant_kl.jpg. Zugriff am 10.10.2010.
- Verein repowermap.org (2015). Foto der Panalpina Logistik. Verfügbar unter www.repowermap.org/bilderortner/b000000000000003__sq5ei60ditkmzck722qbd4k7.jpg. Zugriff am 25.03.2015.
- Viessmann Werke GmbH & Co KG (o. J.). Schemagrafik einer kleinen Solarthermiehausanlage (Schrägdach). Verfügbar unter http://viessmann.solar-software.de/images/haus_system_ww_klein.jpg. Zugriff am 16.12.2016.
- Vortex Bladeless Company (2017). Vortex Bladeless, Wind Generation Development. Verfügbar unter www.vortexbladeless.com/. Zugriff am 20.09.2017.

-
- WEB Windenergie AG (2003). Foto des Windparks Hagenbrunn, Niederösterreich. Verfügbar unter <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRnf36gp0ITay7cNXonu2Qf74OhlsBS-ObWj2D06j28VOPJbtGVZ&s>. Zugriff am 05.05.2014.
- Wien Energie(2006). Foto des Biomasse-KWK-Heizwerkes Simmering, Wien. Verfügbar unter www.wienenergie.at/media/img/2015/image_12095_c0,341,3334,4050_s800,600.jpg. Zugriff am 18.09.2016.
- Wind Minds International (2015). Foto des Windparks Noordoostpolder Binnen- und Buitendijk, Niederlande. Verfügbar unter <http://flevozine.nl/wp-content/uploads/2015/01/Windpark-Noordoostpolder-2.jpg>. Zugriff am 06.06.2016.
- Z22 (2010). Foto des Alta Wind Energy Center, Kalifornien, USA. Verfügbar unter https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/d/d2/Alta_Wind_Energy_Center_from_Oak_Creek_Road.jpg/330px-Alta_Wind_Energy_Center_from_Oak_Creek_Road.jpg. Zugriff am 05.05.2016.

Anhang

Anmerkungen zur Verfügbarkeit des Flächenbedarfskataloges von Anlagen erneuerbarer Energieproduktion

Die in dieser Untersuchung genannten Energieanlagen (insgesamt 88 Records) wurden systematisch in einer Datenbank erfasst. Softwarebasis ist Google Fusion Tables, eine Kombination aus einer webbasierten Datenbank mit einfachen Geoinformationssystemfunktionen. Letztes Kontrolldatum aller Bilder- und Datenquellen ist der 30.10.2017. Die Records der Datenbank verwenden aus technischen Gründen den Punkt als Dezimalzeichen.

Da die Records urheberrechtlich geschütztes Material enthalten (insbesondere Bilder und Kartenausschnitte), kann der Katalog in dieser Publikation leider nicht vollständig zur Verfügung gestellt werden. Per E-Mail-Anfrage (hartmut.dumke@tuwien.ac.at) kann der Katalog jedoch im KML-Format bezogen werden. KML Shapefiles können mühelos per GIS-Software oder auch in Tabellenkalkulationen wie MS Excel, LibreOffice und auch in Google Earth geöffnet werden.

Die untenstehende Tabelle 47 zeigt anhand eines „befüllten“ Muster-Records exemplarisch Struktur und Inhalte aller Felder, die der Katalog enthält.

Tabelle 47: Muster-Record aus dem Katalog der Flächenbedarfe von Anlagen erneuerbarer Energieproduktion

Name, Lage: SmartFlower, Rom, Italien					
Typ: Solarenergie Untertyp: Photovoltaik, mobile Einzelanlage mit 2-achsiger Nachführung, für Freiflächen Koordinaten: 41.8388305, 12.4604268					
<Lageausschnitt Satelliten- und Situationskarte, kleinmaßstäblich> <Lageausschnitt Satelliten- und Situationskarte, großmaßstäblich>					
Standort- und Energie-Details: Fertigmodul, leicht auf- und abbaubar. Funktion auch direkt als Solartankstelle möglich (selbst ohne Netzanschluss). Faltet sich bei Dunkelheit oder bei zu starkem Wind automatisch zusammen. Laut Herstellerangaben: insgesamt bis +40 % im Vergleich zu fix aufgeständerter Anlage, durch die zweiachsige Nachführung, die Software, die Kollektorkühlung und die Selbstreinigung der „Blütenblätter“ („smart tracking, cooling, cleaning“) beim Zusammenfallen. Datenqualität: gut Energiepotenzialfläche (ha): 0,003 Fläche der Anlagen-Bauten (ha):					
Werte zur thermischen und elektrischen Leistung (P in MW) und der Energie (in MWh/a)					
	P (MW)	E (MWh/a)	kWh/m ² /a	m ² /kWh/a	Volllaststunden h/a
el.	0,00231	5,1	170	0,00588	2.208
th.					
Bild-Quellen: GoogleMaps 2017, www.energiewolf.at/files/Energiewolf/Downloads/SmartFlower_1.jpg Daten-Quellen: www.smartflower.com/assets/smartflowerpop-de-ef8ea64b07f1957c36614a1c3a5a8850.pdf					

Quelle: eigene Darstellung



Hartmut Dumke hat an der TU Wien Raumplanung und Raumordnung studiert. Seit seinem Diplom 1997 arbeitet und publiziert er zu Themen der Regionalplanung, der grenzüberschreitenden Planung, zur Energieraumplanung und der Energie-Governance.

Seine Dissertation „Erneuerbare Energien für Regionen – Flächenbedarfe und Flächenkonkurrenzen“ (2017), in Form vorliegenden Buches publiziert, hat einen Rudolf-Wurzer-Anerkennungspreis 2018 der Fakultät für Architektur und Raumplanung und den Sixtus-Lanner-Preis 2019 in der Kategorie „Entwicklung des ländlichen Raumes“ gewonnen. Aktuell arbeitet Hartmut Dumke an der TU Wien, Institut für Raumplanung, im Forschungsbereich Regionalplanung und Regionalentwicklung.

Wenn die Energiewende gelingen soll, müssen die Versorgungsanteile der erneuerbaren Energien am gesamten Energiebedarf erheblich steigen. Dafür sind Flächen für die Nutzung der erneuerbaren Energiepotenziale zu mobilisieren, die momentan noch nicht oder nicht ausschließlich der Energiegewinnung dienen.

Die vorliegende Publikation zeigt zunächst in einem Katalog von Anlagen erneuerbarer Energieproduktion, wie

gering oder hoch die Energieernte pro Fläche bei der Energieproduktion mit Geothermie, Wind- und Solarenergie sowie Biomasse ist. Im Weiteren werden Flächenkonkurrenzen und Umwelteffekte aufgezeigt, die bei der erneuerbaren Energiegewinnung auftreten. Aus Sicht der Energieraumplanung wird abschließend diskutiert, welche Pläne, Kooperationen und Steuerungsverantwortungen künftig bedeutend werden und welche besondere Rolle Regionen dabei spielen.

ISBN 978-3-85448-040-2



www.tuwien.at/academicpress