

GIS-gestützte Potenzialabschätzung von Freiflächen-Solarthermieanlagen für Wärmenetze der 4. Generation in dem Landkreis Borken im Kontext der Wärmewende

Bachelorarbeit

Zur Erlangung des akademischen Grades
„Bachelor of Science“
im Studiengang Geographie (B.Sc.)

vorgelegt am 08.09.2020

von Paul Jonathan Bantelmann
geboren in Alfeld (Leine)

Georg-August-Universität Göttingen
Fakultät für Geowissenschaften und Geographie
Geographisches Institut

Betreuer:
Prof. Dr. Martin Kappas
Dr. Daniel Wyss

Vorwort

Als ich vor über zwei Jahren in einem ICE saß, welcher in der Nähe von Hamm stehen geblieben war, hätte ich nicht gedacht, dass dieser Moment so gesehen der Beginn meiner Bachelorarbeit sein würde. In diesem Zug saß ein paar Reihen vor mir Frau Seidenstücker. Frau Seidenstücker arbeitet im Fachbereich 37: Klimaschutz, Klimawandel Koordinierungsstelle des LANUV NRW und erarbeitete in diesem Zug eine Präsentation, welche mein Interesse erweckte. Ich sprach sie auf diese Präsentation an und ein Jahr darauf durfte ich am Standort Essen mein Praktikum in genau dieser Abteilung durchführen. Dieses Praktikum bereitete mir viel Freude, sodass die Idee einer Bachelorarbeit in Kooperation mit dem LANUV NRW entstand. Aus dieser Idee wurde nun die vorliegende Arbeit. Aufgrund der pandemiebedingten Umstände konnte ich diese nicht vor Ort am Standort Essen schreiben. Dennoch durfte ich das Projekt in Kooperation mit dem LANUV beginnen und wurde von den dortigen Mitarbeiter*innen durch Daten und zahlreiche Anregungen unterstützt. Hierfür möchte ich mich an dieser Stelle beim gesamten Fachbereich 37 bedanken. Besonders bedanken möchte ich mich bei Frau Seidenstücker, welche mit mir die Formalitäten dieser Kooperation erarbeitet hat. Des Weiteren gilt mein Dank insbesondere Nils Dering vom Fachbereich 37 für die inhaltliche Betreuung und die vielen Telefonate während meiner Bachelorarbeit. Ich bin dankbar, dass ich immer mit allen Fragen und Problemen zu dir kommen konnte, du mich gelegentlich geerdet hast und mir geholfen hast, meinen Fokus zu setzen.

Zusätzlich möchte ich mich außerordentlich bei Herrn Prof. Dr. Kappas bedanken, welcher mich in der Entscheidungsfindung meines Bachelorarbeitsthemas unterstützt hat. Des Weiteren hat mich Herr Kappas seitens der Universität betreut. Daher möchte ich mich auch bei Herrn Kappas für die vielen Telefonate und anregende Diskussionen bedanken, auch diese haben geholfen, meinen Fokus immer wieder zu finden. Zusätzlich möchte ich mich bei Herrn Dr. Wyss für die Zweitbetreuung dieser Arbeit bedanken.

Mein abschließender Dank gilt meiner Familie, meiner Freundin und meinen Freunden für die emotionale Unterstützung und insbesondere für das Korrekturlesen dieser Arbeit.

08.09.2020

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel:

„GIS-gestützte Potenzialabschätzung von Freiflächen-Solarthermieanlagen für Wärmenetze der 4. Generation in dem Landkreis Borken im Kontext der Wärmewende“

selbständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen oder anderen Quellen entnommen sind, sind als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen und ist nicht veröffentlicht. Sie wurde nicht, auch nicht auszugsweise, für eine andere Prüfungs- oder Studienleistung verwendet.

Göttingen den 08.09.2020

Ort, Datum

Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	4
Abbildungsverzeichnis	7
Tabellenverzeichnis	10
Abstract Englisch	11
Abstract Deutsch	12
1 Einleitung	13
2 Wärmewende in Deutschland	15
3 Wärmenetze	17
3.1 Wärmenetze der 4. Generation	17
3.2 Betriebsanforderungen.....	20
3.3 Vor- und Nachteile einer leitungsgebundenen Wärmeversorgung für Verbraucher	21
4 Strahlungsgrundlagen	22
5 Aufbau einer Solarthermieanlage	24
5.1 Solarthermische Kollektoren	24
5.1.1 Flachkollektoren	24
5.1.2 Vakuumröhrenkollektoren.....	26
5.1.3 Der Kollektorwirkungsgrad.....	27
5.1.4 Nutzleistung eines Kollektors.....	27
5.2 Wärmespeicher	28
5.2.1 Behälter-Wärmespeicher	29
5.2.2 Erdbecken-Wärmespeicher.....	30
5.2.3 Erdsonden-Wärmespeicher.....	30
5.2.4 Aquifer-Wärmespeicher	31
6 Rechtliche Rahmenbedingungen	32
6.1 Bundesweite gesetzliche Vorgaben	32
6.2 Gesetzliche Vorgaben im Land Nordrhein-Westfalen	32
6.3 Kommunale Bauleitplanung	34
6.4 Subventionierungsmöglichkeiten	35
6.4.1 Progres.nrw- Markteinführung	35
6.4.2 KfW-Programm Erneuerbare Energien „Premium“	36
6.4.3 Bundesförderung effiziente Wärmenetze (Wärmenetzsysteme 4.0).....	37

7 Untersuchungsgebiet Kreis Borken	38
7.1 Allgemeine Informationen.....	38
7.2 Wärmeversorgung	40
8 Methodik zur Berechnung der Potenzialflächen	41
8.1 Grundlegende Annahmen	41
8.2 Datengrundlagen.....	43
8.3 Beschreibung der Methodik.....	45
8.3.1 Aufbereitung der ATKIS-Daten	45
8.3.2 Umwandlung der Verkehrswege in Polygone-Features	48
8.3.3 Aufbereitung der Arten- und Naturschutzgebiete	50
8.3.4 Berechnung der Ausschlussflächen	50
8.3.5 Berechnung der potenziellen Flächen	52
8.3.6 Neuberechnung der Wärmehotspots.....	54
8.3.7 Berechnung des Freiflächenpotenzials	55
8.3.8 Berechnung des jährlichen Wärmeertrags pro Fläche.....	56
8.3.9 Berechnung der Transportverluste	56
8.3.10 Berechnung des solaren Deckungsgrades	57
8.3.11 Bestimmung des Flächen-Hotspot-Indikators	57
8.3.12 Berechnung des Speichervolumens	59
8.3.13 Berechnung des CO ₂ -Einsparpotenzials.....	60
9 Ergebnisse.....	62
9.1 Wärmehotspots	62
9.2 Gesamtwärmebedarf	64
9.3 Freiflächenpotenziale.....	64
9.3.1 Ahaus	67
9.3.2 Bocholt	69
9.3.3 Borken	71
9.3.4 Gescher	73
9.3.5 Gronau (Westf.).....	74
9.3.6 Heek.....	76
9.3.7 Heiden.....	77
9.3.8 Isselburg	78
9.3.9 Legden	79
9.3.10 Raesfeld	80
9.3.11 Reken.....	81
9.3.12 Rhede	82
9.3.13 Stadtlohn.....	83
9.3.14 Südlohn.....	84
9.3.15 Vreden	85
9.4 Speichervolumen	86

10	Diskussion der Ergebnisse	87
11	Diskussion der Methodik	92
12	Fazit.....	96
13	Literatur	99

Abkürzungsverzeichnis

a_1	Erster Verlustkoeffizient [W/K*m ²]
a_2	Zweiter Verlustkoeffizient [W/K*m ²]
AdV	Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland
A_1	Gesamtfläche [m ²]
AGEB	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen
AGFW	Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V.
ATKIS	Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem
BauGB	Baugesetzbuch
BauNVO	Baunutzungsverordnung
BHKW	Blockheizkraftwerk
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
CO ₂	Kohlendioxid
DI	Trassenlänge [m]
DOM	Digitales Oberflächenmodell
$E_{\text{CO}_2; \text{fossile}}$	Theoretische CO ₂ -Emissionen einer KWK-Anlage auf Basis eines fossilen Brennstoffes, welche ein Wärmenetz versorgt

$E_{\text{CO}_2; \text{solar}}$	Theoretisches Einsparpotenzial der CO ₂ -Emissionen durch das Einspeisen einer FSA in ein Wärmenetz
EEWärmeG	Erneuerbare-Energie-Wärmegesetz
EGW	Entsorgungsgesellschaft Westmünsterland mbH
FSA	Freiflächen-Solarthermieanlage
G	Globalstrahlung auf Kollektorebene [W/m ²]
GHD	Gewerbe, Handel, Dienstleistung
GO NRW	Gemeindeordnung Nordrhein-Westfalen
i	Strahlungsintensität [W/m ²]
i_{extra}	Extraterrestrische Strahlungsintensität [W/m ²]
I_{extra}	Extraterrestrische Bestrahlungsstärke [kWh/m ² *d]
IBP	Fraunhofer-Institut für Bauphysik
IT.NRW	Information und Technik Nordrhein-Westfalen (Landesbetrieb)
IWES	Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik
K_f	Kollektorfläche [m ²]
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LANUV NRW	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen
LEP NRW	Landesentwicklungsplan Nordrhein-Westfalen
LINFOS	Landschaftsinformationssammlung
MWIDE	Ministeriums für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen
η_c	Kollektorertrag [-]

η_o	Kollektorwirkungsgrad [%]
Q_{bh}	Gesamtwärmebedarf eines Hotspots [kWh/a]
q_n	Nutzleistung eines Kollektors [%]
Q_p	Wärmeverluste beim Transport [%]
Q_{pds}	Wärmeverluste in Abhängigkeit von der Trassenlänge und dem Wärmeertrag der Fläche [kWh/a]
Q_s	Jährlicher Wärmeertrag der Fläche [kWh/a]
Q_{sh}	Wärmeertrag einer Freiflächen-Solarthermieanlage nach Abzug der Transportverluste [kWh/a]
Q_{tp}	Gesamt produzierter Wärmeertrag [kWh/a]
S_f	Solarer Deckungsgrad [%]
Solites	Steinbeis Forschungsinstitut für solare und zukunftsfähige thermische Energiesysteme
StGB NRW	Städte- und Gemeindebund Nordrhein-Westfalen
T_A	Absorbtemperatur [°C]
T_M	Mittlere Temperatur des Kollektorinneren [°C]
T_U	Umgebungstemperatur [°C]
VZBV	Verbraucherzentrale Bundesverband e.V.
WP	Wärmepumpe
WiE ^{fm}	INTERREG-VA-Projekt „Wärme in der Euregio: fokussieren & modernisieren“

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: ENDENERGIEVERBRAUCH IN DEUTSCHLAND DES JAHRES 2018 NACH SEKTOREN (AGEB 2020: O.S.)	15
ABBILDUNG 2: VERSCHIEDENE WÄRMENETZTYPEN DER 4. GENERATION (EIGENE DARSTELLUNG NACH: PEHNT 2017: 35)	18
ABBILDUNG 3: VEREINFACHTE DARSTELLUNG EINES SOLAREN WÄRMENETZES (EIGENE DARSTELLUNG NACH (SOLITES 2020: O.S.)	20
ABBILDUNG 4: TAGESVERLAUF DER INTENSITÄT DER EXTRATERRESTRISCHEN SONNENSTRAHLUNG (I_{EXTRA}) FÜR DIE REGION KÖLN (STIEGLITZ & HEINZEL 2012: 54)	22
ABBILDUNG 5: JAHRESGANG DER TAGESSUMME DER EXTRATERRESTRISCHEN BESTRAHLUNGSSTÄRKE (I_{EXTRA}) FÜR DIE REGION KÖLN (STIEGLITZ & HEINZEL 2012: 55)	23
ABBILDUNG 6: SCHEMATISCHER AUFBAU EINES FLACHKOLLEKTORS (QUASCHNING 2019: 124)	25
ABBILDUNG 7: AUFBAU EINES HEATPIPE-KOLLEKTORS (QUASCHNING 2019: 128)	26
ABBILDUNG 8: DER WIRKUNGSGRAD EINES FLACHKOLLEKTORS BEI VERSCHIEDENEN EINSTRAHLUNGSINTENSITÄTEN (STIEGLITZ & HEINZEL 2012: 395)	27
ABBILDUNG 9: DIE NUTZLEISTUNG EINES FLACHKOLLEKTORS BEI EINER EINSTRAHLUNGSINTENSITÄTEN VON $I = 800 \text{ W/M}^2$ (STIEGLITZ & HEINZEL 2012: 92)	27
ABBILDUNG 10: SCHEMATISCHER AUFBAU DER DERZEIT AM HÄUFIGSTEN GENUTZTEN SENSIBLEN WÄRMESPEICHER FÜR SOLARE NAHWÄRMENETZE (WESSELAK ET AL. 2013: 684)	29
ABBILDUNG 11: VERORTUNG DES KREISES BORKEN (EIGENE DARSTELLUNG 2020 MIT DATEN AUS: BKG 2020; IT.NRW 2020A) KOORDINATENSYSTEM: ETRS 1989 UTM ZONE 32N	38
ABBILDUNG 12: STRAHLUNGSDATEN DER KLIMANORMALPERIODE 1981-2010 FÜR DEN KREIS BORKEN (EIGENE DARSTELLUNG MIT DATEN AUS: IT.NRW 2020A; LANUV NRW 2020C) KOORDINATENSYSTEM: ETRS 1989 UTM ZONE 32N	39
ABBILDUNG 13: ENDENERGIEVERBRAUCH IM KREIS BORKEN NACH SEKTOREN UND ENDENERGIEFORM (FACHHOCHSCHULE MÜNSTER 2015: O.S.)	40
ABBILDUNG 14: ZUSCHNEIDEN DER ATKIS-LAYER AUF DAS UNTERSUCHUNGSGEBIET ANHAND DES BEISPIELS "LANDWIRTSCHAFT" (EIGENE DARSTELLUNG 2020)	47
ABBILDUNG 15: SELEKTION DER LAYER NACH DEN INFORMATIONEN AUS DEM ATKIS-OBJEKTKATALOG ANHAND DES BEISPIELS "LANDWIRTSCHAFT" (EIGENE DARSTELLUNG 2020)	47
ABBILDUNG 16: AUFBEREITUNG DER VERKEHRSWEGE IM KREIS BORKEN (EIGENE DARSTELLUNG 2020)	48

ABBILDUNG 17: BERECHNUNG DER FAHRBAHNBREITE ANHAND DES BEISPIELS „SONSTIGE_STRASSE“ (EIGENE DARSTELLUNG 2020)	49
ABBILDUNG 18: ZUSCHNEIDEN DER SCHUTZGEBIETE AUF DEN KREIS BORKEN UND ZUSAMMENFASSEN IN EINEM LAYER (EIGENE DARSTELLUNG 2020)	50
ABBILDUNG 19: ERMITTLUNG DER POTENZIELLEN FLÄCHEN ENTLANG BUNDESSTRAßEN TEIL 1 (EIGENE DARSTELLUNG 2020).....	52
ABBILDUNG 20: ERMITTLUNG DER POTENZIELLEN FLÄCHEN ENTLANG BUNDESSTRAßEN TEIL 2 (EIGENE DARSTELLUNG 2020).....	53
ABBILDUNG 21: ZUSAMMENFASSEN DER POTENZIALFLÄCHEN ZU EINEM LAYER (EIGENE DARSTELLUNG 2020).....	54
ABBILDUNG 22: NEUBERECHNUNG DER WÄRMEHOTSPOTS (EIGENE DARSTELLUNG 2020)	55
ABBILDUNG 23: BERECHNUNG DER DISTANZ ZWISCHEN POTENZIELLEN FLÄCHEN UND HOTSPOTS (EIGENE DARSTELLUNG 2020).....	56
ABBILDUNG 24: ÜBERTRAGUNG DER DATEN IN ARCGIS PRO (EIGENE DARSTELLUNG 2020)	59
ABBILDUNG 25: WÄRMEHOTSPOTS IM KREIS BORKEN (EIGENE DARSTELLUNG MIT DATEN AUS: IT.NRW 2020A, 2020B; LANUV NRW 2020B, 2020E) KOORDINATENSYSTEM: ETRS 1989 UTM ZONE 32N	62
ABBILDUNG 26: GESAMTWÄRMEBEDARF FÜR RAUMWÄRME UND WARMWASSER IN GWH/A IM KREIS BORKEN (2020) (EIGENE DARSTELLUNG 2020)	64
ABBILDUNG 27; WÄRMEERTRAG DER FSA NACH DER FLÄCHENART IN MWH/A (EIGENE DARSTELLUNG 2020).....	65
ABBILDUNG 28: ANZAHL DES FSA-POTENZIALS NACH DEN GEMEINDEN UND DEN FLÄCHENTYPEN IM KREIS BORKEN (EIGENE DARSTELLUNG 2020)	65
ABBILDUNG 29: POTENZIALFLÄCHEN IN DER GEMEINDE AHAUS (EIGENE DARSTELLUNG 2020 MIT DATEN AUS: IT.NRW 2020A, 2020B; LANUV NRW 2020B, 2020E) KOORDINATENSYSTEM: ETRS 1989 UTM ZONE 32N	67
ABBILDUNG 30: POTENZIALFLÄCHEN IN DER GEMEINDE BOCHOLT (EIGENE DARSTELLUNG 2020 MIT DATEN AUS: IT.NRW 2020A, 2020B; LANUV NRW 2020B, 2020E) KOORDINATENSYSTEM: ETRS 1989 UTM ZONE 32N	69
ABBILDUNG 31: POTENZIALFLÄCHEN IN DER GEMEINDE BORKEN (EIGENE DARSTELLUNG 2020 MIT DATEN AUS: IT.NRW 2020A, 2020B; LANUV NRW 2020B, 2020E) KOORDINATENSYSTEM: ETRS 1989 UTM ZONE 32N	71
ABBILDUNG 32: POTENZIALFLÄCHEN IN DER GEMEINDE GESCHER (EIGENE DARSTELLUNG 2020 MIT DATEN AUS: IT.NRW 2020A, 2020B; LANUV NRW 2020B, 2020E) KOORDINATENSYSTEM: ETRS 1989 UTM ZONE 32N	73
ABBILDUNG 33: POTENZIALFLÄCHEN IN DER GEMEINDE GRONAU (WESTF.) (EIGENE DARSTELLUNG 2020 MIT DATEN AUS: IT.NRW 2020A, 2020B; LANUV NRW 2020B, 2020E) KOORDINATENSYSTEM: ETRS 1989 UTM ZONE 32N	74

ABBILDUNG 34: POTENZIALFLÄCHEN IN DER GEMEINDE HEEK (EIGENE DARSTELLUNG 2020 MIT DATEN AUS: IT.NRW 2020A, 2020B; LANUV NRW 2020B, 2020E) KOORDINATENSYSTEM: ETRS 1989 UTM ZONE 32N	76
ABBILDUNG 35: POTENZIALFLÄCHEN IN DER GEMEINDE HEIDEN (EIGENE DARSTELLUNG 2020 MIT DATEN AUS: (IT.NRW 2020A, 2020B; LANUV NRW 2020B, 2020E) KOORDINATENSYSTEM: ETRS 1989 UTM ZONE 32N	77
ABBILDUNG 36: POTENZIALFLÄCHEN IN DER GEMEINDE ISSELBURG (EIGENE DARSTELLUNG 2020 MIT DATEN AUS: IT.NRW 2020A, 2020B; LANUV NRW 2020B, 2020E) KOORDINATENSYSTEM: ETRS 1989 UTM ZONE 32N	78
ABBILDUNG 37: POTENZIALFLÄCHEN IN DER GEMEINDE LEGDEN (EIGENE DARSTELLUNG 2020 MIT DATEN AUS: IT.NRW 2020A, 2020B; LANUV NRW 2020B, 2020E) KOORDINATENSYSTEM: ETRS 1989 UTM ZONE 32N	79
ABBILDUNG 38: POTENZIALFLÄCHEN IN DER GEMEINDE RAESFELD (EIGENE DARSTELLUNG 2020 MIT DATEN AUS: IT.NRW 2020A, 2020B; LANUV NRW 2020B, 2020E) KOORDINATENSYSTEM: ETRS 1989 UTM ZONE 32N	80
ABBILDUNG 39: POTENZIALFLÄCHEN IN DER GEMEINDE REKEN (EIGENE DARSTELLUNG 2020 MIT DATEN AUS: IT.NRW 2020A, 2020B; LANUV NRW 2020B, 2020E) KOORDINATENSYSTEM: ETRS 1989 UTM ZONE 32N	81
ABBILDUNG 40: POTENZIALFLÄCHEN IN DER GEMEINDE RHEDE (EIGENE DARSTELLUNG 2020 MIT DATEN AUS: IT.NRW 2020A, 2020B; LANUV NRW 2020B, 2020E) KOORDINATENSYSTEM: ETRS 1989 UTM ZONE 32N	82
ABBILDUNG 41: POTENZIALFLÄCHEN IN DER GEMEINDE STADTLOHN (EIGENE DARSTELLUNG 2020 MIT DATEN AUS: IT.NRW 2020A, 2020B; LANUV NRW 2020B, 2020E) KOORDINATENSYSTEM: ETRS 1989 UTM ZONE 32N	83
ABBILDUNG 42: POTENZIALFLÄCHEN IN DER GEMEINDE SÜDLOHN (EIGENE DARSTELLUNG 2020 MIT DATEN AUS: IT.NRW 2020A, 2020B; LANUV NRW 2020B, 2020E) KOORDINATENSYSTEM: ETRS 1989 UTM ZONE 32N	84
ABBILDUNG 43: POTENZIALFLÄCHEN IN DER GEMEINDE VREDEN (EIGENE DARSTELLUNG 2020 MIT DATEN AUS: IT.NRW 2020A, 2020B; LANUV NRW 2020B, 2020E) KOORDINATENSYSTEM: ETRS 1989 UTM ZONE 32N	85
ABBILDUNG 44: WÄRMESPEICHERVOLUMEN NACH DER WÄRMESPEICHERART UND DEM SOLAREN DECKUNGSGRAD (EIGENE DARSTELLUNG 2020).....	86

Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: AUFLISTUNG DER AUSGEWÄHLTEN ATKIS-DATEN (EIGENE DARSTELLUNG 2020 NACH: (ADV 2008: O.S.).....	46
TABELLE 2: WÄRMHOTSPOTS IM KREIS BORKEN NACH GEMEINDEN UNTERGLIEDERT (EIGENE DARSTELLUNG 2020).....	63
TABELLE 3: POTENZIAL SOLARTHERMISCHER FREIFLÄCHENANLAGEN IN DER GEMEINDE AHAUS (EIGENE DARSTELLUNG 2020)	68
TABELLE 4: POTENZIAL SOLARTHERMISCHER FREIFLÄCHENANLAGEN IN DER GEMEINDE BOCHOLT (EIGENE DARSTELLUNG 2020)	70
TABELLE 5: POTENZIAL SOLARTHERMISCHER FREIFLÄCHENANLAGEN IN DER GEMEINDE BORKEN (EIGENE DARSTELLUNG 2020).....	72
TABELLE 6: POTENZIAL SOLARTHERMISCHER FREIFLÄCHENANLAGEN IN DER GEMEINDE GESCHER (EIGENE DARSTELLUNG 2020).....	73
TABELLE 7: POTENZIAL SOLARTHERMISCHER FREIFLÄCHENANLAGEN IN DER GEMEINDE GRONAU (WESTF.) (EIGENE DARSTELLUNG 2020)	75
TABELLE 8: POTENZIAL SOLARTHERMISCHER FREIFLÄCHENANLAGEN IN DER GEMEINDE HEEK (EIGENE DARSTELLUNG 2020)	76
TABELLE 9: POTENZIAL SOLARTHERMISCHER FREIFLÄCHENANLAGEN IN DER GEMEINDE HEIDEN (EIGENE DARSTELLUNG 2020)	77
TABELLE 10: POTENZIAL SOLARTHERMISCHER FREIFLÄCHENANLAGEN IN DER GEMEINDE ISSELBURG (EIGENE DARSTELLUNG 2020)	78
TABELLE 11: POTENZIAL SOLARTHERMISCHER FREIFLÄCHENANLAGEN IN DER GEMEINDE LEGDEN (EIGENE DARSTELLUNG 2020)	79
TABELLE 12: POTENZIAL SOLARTHERMISCHER FREIFLÄCHENANLAGEN IN DER GEMEINDE RAESFELD (EIGENE DARSTELLUNG 2020).....	80
TABELLE 13: POTENZIAL SOLARTHERMISCHER FREIFLÄCHENANLAGEN IN DER GEMEINDE REKEN (EIGENE DARSTELLUNG 2020).....	81
TABELLE 14: POTENZIAL SOLARTHERMISCHER FREIFLÄCHENANLAGEN IN DER GEMEINDE RHEDE (EIGENE DARSTELLUNG 2020).....	82
TABELLE 15: POTENZIAL SOLARTHERMISCHER FREIFLÄCHENANLAGEN IN DER GEMEINDE STADTLOHN (EIGENE DARSTELLUNG 2020).....	83
TABELLE 16: POTENZIAL SOLARTHERMISCHER FREIFLÄCHENANLAGEN IN DER GEMEINDE SÜDLOHN (EIGENE DARSTELLUNG 2020).....	84
TABELLE 17: POTENZIAL SOLARTHERMISCHER FREIFLÄCHENANLAGEN IN DER GEMEINDE VREDEN (EIGENE DARSTELLUNG 2020).....	85

Abstract Englisch

The aim of this thesis is to estimate the potential of open space solar thermal systems for 4th generation district heating systems in the district of Borken. Therefore, basic assumptions were made from different literature sources, which are necessary for the potential assessment. The potential estimation was carried out with the geoinformation software ArcGIS pro 2.5 and with the help of the spreadsheet program Excel 2019. The methodology was chosen in such a way that a transfer to other districts in the state of North Rhine-Westphalia is possible. The methodology can thus serve as a basis for a state-wide estimation of potential. The results of this work suggests that two-thirds of all heating hotspots in the district of Borken can be supplied at least partially by open space solar thermal systems. A total of 323 potential areas could be determined. Although the potential areas are not homogeneously distributed in the study area, the potential is large enough that 23 % of the total heat demand for space heating and hot water in the building sector can be supplied by district heating systems with a solar thermal share. Thus, open-space solar thermal systems for 4th generation heating networks can make a significant contribution to the heating system transformation in the district of Borken and help to make existing buildings climate-neutral by 2050.

Abstract Deutsch

Ziel dieser Arbeit ist es, das Potenzial von Freiflächen-Solarthermieanlagen für Wärmenetze der 4. Generation für den Kreis Borken abzuschätzen. Hierfür wurden, unter Berücksichtigung unterschiedlicher Literaturquellen, Grundannahmen getroffen, welche für die Potenzialabschätzung vonnöten sind. Die Potenzialabschätzung erfolgte durch die Geoinformations-Software ArcGIS pro 2.5 und mithilfe des Tabellenkalkulationsprogramms Excel 2019. Die Methodik wurde so gewählt, dass eine Übertragung auf andere Kreise im Land Nordrhein-Westfalen möglich ist. Die Methodik kann somit als Grundlage für eine landesweite Potenzialabschätzung dienen. Die Ergebnisse dieser Arbeit legen nahe, dass zwei Drittel aller Wärmehotspots im Kreis Borken durch Freifläche-Solarthermieanlagen zumindest anteilig versorgt werden könnten. Insgesamt konnten 323 Potenzialflächen ermittelt werden. Das ermittelte Potenzial reicht aus, um 23 % des Gesamtwärmebedarfs für Raumwärme und Warmwasser im Gebäudebereich durch Freiflächen-Solarthermieanlagen mittels Wärmenetze bereitzustellen. Es ist zu beachten, dass die verfügbaren Potenzialflächen nicht homogen in dem Untersuchungsgebiet verteilt sind, sodass die Potenziale auf Gemeindeebene stark variieren. Somit können Freiflächen-Solarthermieanlagen mit Wärmenetzen der 4. Generation einen bedeutenden Beitrag zur Wärmewende im Kreis Borken leisten und dazu beitragen, den Gebäudebestand bis zum Jahr 2050 klimaneutral zu gestalten.

1 Einleitung

„Wir werden ohne eine erfolgreiche Wärmewende die Energiewende nicht stemmen und die Ziele bis 2030 nicht erreichen“ (Altmaier 2018: o.S.).

Obwohl Peter Altmaier im Jahr 2018 in Berlin mit dieser Aussage auf die Notwendigkeit einer Wärmewende hinweist, wird in der Gesellschaft insbesondere über die Stromversorgung der Zukunft diskutiert. In diesem Diskurs wird die Wärmewende häufig nur anteilig berücksichtigt. Dies ist überraschend, da der Endenergieverbrauch für Wärme in den Sektoren Haushalt, Gewerbe, Handel und Dienstleistung (GHD) und in der Industrie den größten Anteil ausmacht (vgl. Abbildung 1).

Damit die bis 2030 formulierten Ziele der Energiewende erreicht werden, müssen politische, gesellschaftliche und wirtschaftliche Anstrengungen unternommen werden. Zusätzlich bedarf es weiterführende Forschungen (BMU 2019: 28ff.). Vor allem Wärmenetze der 4. Generation können erneuerbare Wärme sehr effizient bereitstellen. Allerdings wurden bislang nur vereinzelt Pilotanlagen realisiert. Es fehlt an Impulsen, um diese Konzepte in größeren Maßstäben umzusetzen (BMU 2019: 75). Damit erneuerbare Wärmenetze sinnvoll geplant und errichtet werden können, bedarf es einer Gegenüberstellung erneuerbarer Wärmequellen und potenzieller Verbraucher.

Für das Land Nordrhein-Westfalen wurden bereits Potenzialstudien verschiedener klimafreundlicher Wärmequellen veröffentlicht, unter anderem für die industrielle Abwärme, die Geothermie und die Biomasse-Energie (LANUV NRW 2019: o.S., 2015b: o.S., 2014: o.S.). In dem Bereich der Solarthermie wurden bislang lediglich die Dachflächenpotenziale analysiert (LANUV NRW 2013: 83–88, 2020a: o.S.).

Insbesondere im ländlichen Räumen können solarthermische Freiflächenanlagen in Kombination mit Wärmenetzen zukünftig an Bedeutung gewinnen und einen Beitrag zur Wärmewende leisten. Hervorzuheben sind hier die Wärmenetze der 4. Generation, welche auf die Einbindung erneuerbarer Energien ausgelegt sind. In Dänemark wurden bereits große Freiflächen-Solarthermieanlagen (FSA) für Wärmenetze realisiert. Aus diesen Projekten lassen sich wichtige Grundlagen für eine Potenzialabschätzung ableiten (vgl. Kapitel 3). Im Land Nordrhein-Westfalen ist unter anderem der Kreis Borken prädestiniert für eine solche Potenzialabschätzung, da in diesem bereits Wärmevorrangzonen ausgewiesen wurden, welche für eine leitungsgebundene Wärmeversorgung geeignet sind. Diese sogenannten Hotspots wurden durch das INTERREG-VA-

Projekt „Wärme in der Euregio: fokussieren & modernisieren“ (WiE^{fm}) der Fachhochschule Münster analysiert (Wetter et al. 2019: o.S.).

Das Ziel dieser Arbeit ist es das Potenzial solarthermischer Freiflächenanlagen für den Kreis Borken abzuschätzen.

Die übergeordneten Forschungsfragen dieser Arbeit lauten daher:

Wie kann das Potenzial solarthermischer Freiflächenanlagen für Wärmenetze der 4. Generation abgeschätzt werden?

Wie hoch ist das Potenzial solarthermischer Freiflächenanlagen für Wärmenetze der 4. Generation in dem Kreis Borken?

Die Methodik dieser Potenzialabschätzung folgt der Prämisse, dass diese auf andere Kreise im Land Nordrhein-Westfalen übertragen werden kann.

Im Kontext dieser Fragestellungen werden in den Kapiteln 3 bis 5 die technischen Grundlagen von Wärmenetzen, sowie der solarthermischen Kollektoren und der Wärmespeicher beschrieben. In Kapitel 6 werden rechtliche Rahmenbedingungen für solarthermische Freiflächenanlagen dargelegt. Das Kapitel 7 dient dazu, den Kreis Borken zu beschreiben und insbesondere die derzeitige Wärmeversorgung darzulegen.

Auf Basis der Literaturrecherche werden in dem Kapitel 8.1 Annahmen getroffen, welche die Grundlagen der Potenzialabschätzung darstellen. Die Methodik wird in Kapitel 8 beschrieben und die Ergebnisse in Kapitel 9 ausgewertet. Die Diskussionen der Ergebnisse und der Methodik erfolgen in Kapiteln 10 und 11.

Zu Beginn der Arbeit wird in Kapitel 2 die Wärmewende in Deutschland beschrieben. Weiterhin wird das Ziel eines klimaneutralen Gebäudebestandes im Jahr 2050 sowie das Etappenziele der Wärmewende bis 2030 erläutert.

2 Wärmewende in Deutschland

Am 04.11.2016 trat das Pariser Klimaschutzabkommen in Kraft. Infolgedessen hat sich die Weltgemeinschaft dazu verpflichtet, die Erderwärmung auf unter +2 °C im Vergleich zum vorindustriellen Zeitalter zu begrenzen. Weiterführend sollen Anstrengungen unternommen werden, um den Temperaturanstieg auf +1,5 °C zu beschränken (BMU 2019: 21). Die weiterführenden Ziele für alle Sektoren der Bundesrepublik Deutschland wurden im Klimaschutzplan 2050 festgeschrieben, so auch das Leitbild einer Treibhausgasneutralität bis Mitte des 21. Jahrhunderts (BMU 2019: 6). Da 2014 noch etwa 40 % der Treibhausgasemissionen in Deutschland aus der Energiewirtschaft stammten, ist die Energiewende von zentraler Bedeutung, um dieses Ziel zu erreichen (BMU 2019: 34). Die Abbildung 1 zeigt, dass der Endenergieverbrauch in Deutschland im Jahr 2018 bei 8.996 PJ lag. Insbesondere in den Sektoren Haushalte, Gewerbe-Handel-Dienstleistungen (GHD) und in der Industrie, hat die Nutzenergieform Wärme den größten prozentualen Anteil am Endenergieverbrauch in Deutschland (AGEB 2020: 1).

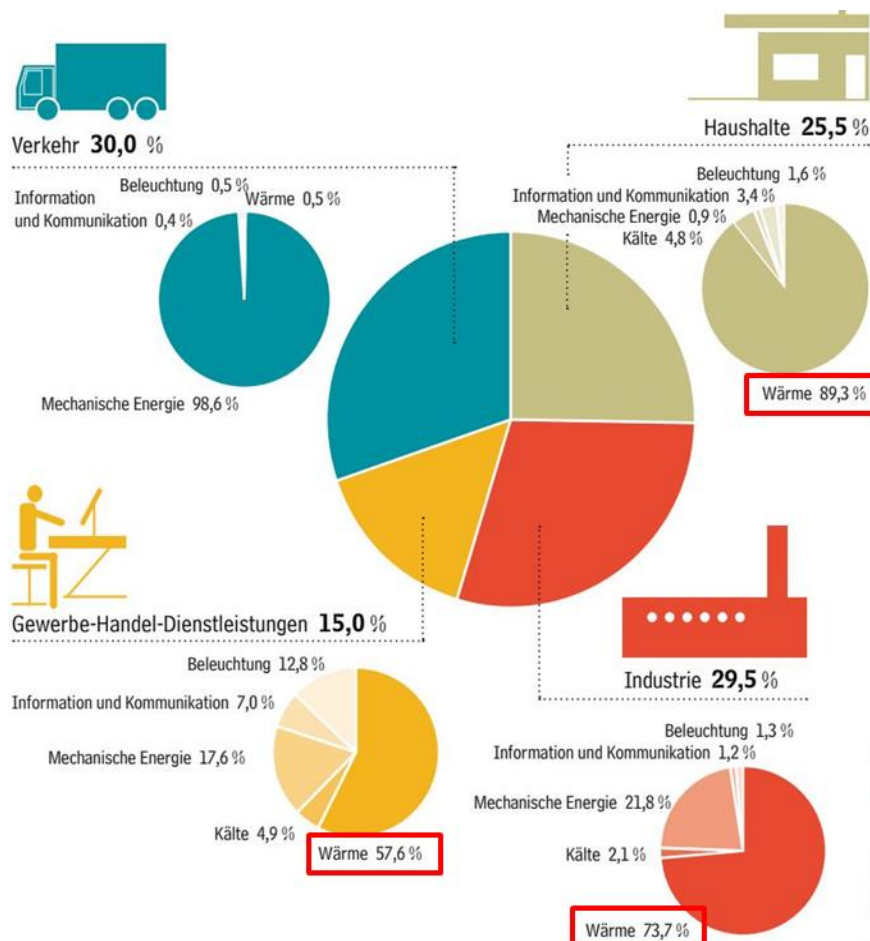


Abbildung 1: Endenergieverbrauch in Deutschland des Jahres 2018 nach Sektoren (AGEB 2020: o.S.)

Somit ist die angestrebte Energiewende gleichzeitig auch eine Wärmewende. Das zentrale Ziel der Wärmewende ist es, einen nahezu klimaneutralen Gebäudebestand im Jahr 2050 zu erreichen (BMWi 2015: 9). Die Grundlage für dieses Ziel stellt die Energieeffizienzstrategie Gebäude dar. Diese legt fest, dass der Primärenergiebedarf im Gebäudebereich um 80-95 % bis zum Jahr 2050 gegenüber den Werten von 2008 gesenkt werden soll. Das kann durch eine Kombination aus Energieeffizienzmaßnahmen und einem höheren Anteil an erneuerbaren Energien erreicht werden (BMWi 2015: 5).

Durch die Energieeffizienzmaßnahmen kann der Wärme-Endenergieverbrauch in Haushalten und in Gewerbe- und Industriehallen um circa 40-60% gegenüber dem Jahr 2008 reduziert werden. Die restliche Endenergie muss in Zukunft folglich in hohem Maße aus objektnaher erneuerbarer Wärme oder aus dekarbonisierten Wärmenetzen stammen (IWES & IBP 2017: 8).

Der Anteil von Wärmenetzen im Gebäudebereich kann sich in Zukunft von heute circa 10 % des Endenergiebedarfs auf 15 % bis 21 % im Jahr 2030 erhöhen. Bis zum Jahr 2050 ist eine Erhöhung um bis zu 23 % möglich. Der Ausbau von Wärmenetzen auf Basis erneuerbarer Energien muss bis zum Jahr 2030 vor allem dann gesteigert werden, wenn das Maximalziel von 95 % weniger Treibhausgasemissionen im Jahr 2050 angestrebt wird. (IWES & IBP 2017: 41). Die BMU-Langfristszenarien sind verschiedene Studien, welche seit dem Jahr 2000 durchgeführt wurden, um Leitszenarien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland zu entwickeln (Nitsch et al. 2012: 41). In dem Schlussbericht der BMU-Langfristszenarien wird unter anderem abgeschätzt, dass im Jahr 2050 über 50 % der erneuerbaren Wärme, durch erneuerbare Nahwärmenetze erfolgen wird. In diesem Szenario können solare Nahwärmenetze im Jahr 2030 etwa 14 TWh/a und im Jahr 2050 circa 43,5 TWh/a Wärmeenergie bereitstellen (Nitsch et al. 2012: 128f.).

3 Wärmenetze

Wärmenetze dienen als technische Infrastruktur, welche zur Verteilung von thermischer Energie zwischen einer meistens zentralen Wärmequelle und den Verbrauchern genutzt wird. Wärmenetze sind in der Regel ein geschlossenes, leitungsgebundenes System. Die Transportmedien der thermischen Energie sind hauptsächlich Wasser oder Wasserdampf. Ab einer Distanz von mehr als einem Kilometer zwischen Wärmequelle und Verbraucher, können Wärmenetze als Fernwärmenetze definiert werden. Nahwärmenetze weisen überwiegend eine Distanz von unter einem Kilometer auf. (Esch et al. 2011: 12).

3.1 Wärmenetze der 4. Generation

Wie in Kapitel 2 angedeutet, können Wärmenetze in Zukunft einen größeren Anteil am Wärmemarkt einnehmen und somit einen Beitrag leisten, den Gebäudebestand bis 2050 nahezu klimaneutral zu gestalten. Allerdings hat die Studie von Pfnür et al. von 2016 ergeben, dass Wärmenetze nicht per se ökologischer sind als herkömmliche dezentrale Versorgungssysteme. Vielmehr sind die Erzeugungsstrukturen zu betrachten und über den Primärenergiefaktor zu berechnen (Pfnür et al. 2016: 75ff.). Jedoch ist eindeutig zu erkennen, dass Wärmenetze, welche aus einer Kraft-Wärme-Kopplungsanlage (KWK-Anlage) mit erneuerbaren Brennstoffen, industrieller Abwärme und erneuerbaren Energien (Solarthermie, Geothermie, Bioenergie etc.) gespeist werden, deutlich ökologischer sind, als andere Wärmenetze oder die von Pfnür et al. analysierten dezentralen Wärmequellen (Pfnür et al. 2016: 71ff.). Damit Wärmenetze in Zukunft ökologischer werden und mehr erneuerbare Energien eingespeist werden können, bedarf es einer neuen Generation von Wärmenetzen, den sogenannten Wärmenetzen der 4. Generation. Diese Wärmenetze werden wie folgt definiert:

„Wärmenetzsysteme 4.0 sind innovative Wärmeinfrastrukturen auf Basis von Wärmenetzen mit niedrigen Temperaturen (20 bis max. 95 °C). Die Wärmebereitstellung erfolgt unter Kriterien des Klimaschutzes und der perspektivisch kostengünstigen Wärmeversorgung überwiegend auf Basis von erneuerbaren Energien und Abwärme.“ (Pehnt 2017: 21).

Wärmenetze der 4. Generation ermöglichen durch ein optimales Zusammenwirken einzelner Komponenten das Nutzen fluktuierender, erneuerbarer Energien und industrieller Abwärme. Um dies zu erreichen, müssen die Netzverluste verringert und die

Netztemperatur gezielt abgesenkt werden. Die Wärme für Wärmenetze der 4. Generation soll fast ausschließlich auf Basis erneuerbarer Energien und der industriellen Abwärme bereitgestellt werden, so dass diese Netze einerseits den Kriterien des Klimaschutzes entsprechen und andererseits in Zukunft kostengünstiger als andere Wärmequellen sein können. Ebenfalls streben Wärmenetze der 4. Generation eine effiziente Sektorkopplung an (Pehnt 2017: 21).

Wärmenetze der 4. Generation lassen sich in unterschiedliche Netztypen unterteilen. In der Abbildung 2 werden die Netztypen mit solarem Anteil dargestellt, welche nicht an ein weiteres Wärmenetz angeschlossen werden.

	Solares Netz/ Modell Dänemark		Kalte Nahwärme		Bio-Solar-Netz	
Erzeugung		KWK		Dezentrale WP		Biomasse-BHKW
		WP				
		Solar via WP/ saisonaler Speicher				
		Solar		Solar		Solar
Speicherung	Erdbecken-Wärmespeicher		Eisspeicher		Kein Speicher	
Innovationen	40.000 m ² Solarfeld mit systemdienlicher Betriebsweise		Beheizung Bestandsgebäude über außenliegende Wandheizung		Biomasse-BHKW wird in den Sommermonaten abgeschaltet; Bürgerfinanzierung (Genossenschaften)	

Abbildung 2: Verschiedene Wärmenetztypen der 4. Generation (Eigene Darstellung nach: Pehnt 2017: 35)

Die solaren Wärmenetztypen der 4. Generation aus Abbildung 2 zeigen, dass mehrere Wärmequellen zur Deckung des Wärmebedarfs miteinander kombiniert werden (Pehnt 2017: 24). Als besonders geeignete Energiequellen gelten neben der Biomasse, Biogas und Biomethan, vor allem Tiefengeothermie, Solarthermie und Wärmepumpen (WP), sowie industrielle Abwärme (Pehnt 2017: 25).

Erneuerbaren Energiequellen, wie beispielsweise Solarthermie oder die Umgebungswärme haben den Vorteil, dass sie pro Kilowattstunde erzeugter Wärme nur sehr wenig Kohlendioxid (CO₂) ausstoßen. Daher kann vereinfacht ein CO₂-Emissionsfaktor von 0 g/kWh angenommen werden (Kirchner et al. 2015: 11f.). Zum Vergleich: Ein Nahwärmenetz auf Basis einer KWK-Anlage mit fossilen Brennstoffen erzeugt 158 g/kWh CO₂. Des Weiteren lässt sich aus der Studie von Pfnür et al. ableiten, dass dezentrale Versorgungssysteme tendenziell mehr CO₂ ausstoßen als Nahwärmenetze

auf Basis einer KWK-Anlage mit fossilen Energieträgern. Fernwärme aus Heizwerken mit fossilen Energieträgern weisen deutlich höhere CO₂-Emissionen auf (Pfnür et al. 2016: 71f.).

In der Vergangenheit wurden Wärmenetze der 4. Generation mit einem hohen solaren Deckungsgrad hauptsächlich in Dänemark realisiert (Pehnt 2017: 25).

Die in Dänemark errichteten Freiflächen-Solarthermieanlagen (FSA) erreichen in etwa ein solaren Deckungsgrad (SF) von 20 % beziehungsweise 40 % mit einem großen saisonalen Wärmespeicher (Trier et al. 2018: 29). Aber auch kleinere solare Deckungsgrade bis zu 0,4 % wurden in Dänemark bereits realisiert (Trier et al. 2018: 20). Als solarer Deckungsgrad wird der prozentuale Anteil der Gesamtwärmemenge beschrieben, welcher durch eine FSA erzeugt wird. Der übrige Wärmebedarf muss folglich über andere Energieträger gedeckt werden, hierzu werden in Dänemark meistens KWK-Anlagen eingesetzt (Trier et al. 2018: 24). Im ländlichen Raum in Deutschland werden solarthermische Großanlagen häufig mit Biomasse-Block-Heiz-Kraftwerken (BHKW) verbunden. Ein solarer Deckungsgrad von 10 % bis 20 % reicht aus, um das Biomasse-BHKW in den Sommermonaten abzuschalten und eine solare Volldeckung zu erreichen (Solites 2015: 22). Zusätzlich können FSA mit einem solaren Deckungsgrad von unter 10 % zur Vorheizung verwendet werden (Miedaner et al. 2012: 88).

3.2 Betriebsanforderungen

Ein Wärmenetz ist ein komplexes System, bei welchem genaue Temperatur- und Druckverhältnisse eingehalten werden müssen. In der Abbildung 3 ist der Aufbau eines Wärmenetzes dargestellt. Als Wärmequelle dient in diesem Beispiel eine FSA. Weiteren mögliche Wärmequellen wurden in der Abbildung 3 nicht berücksichtigt.

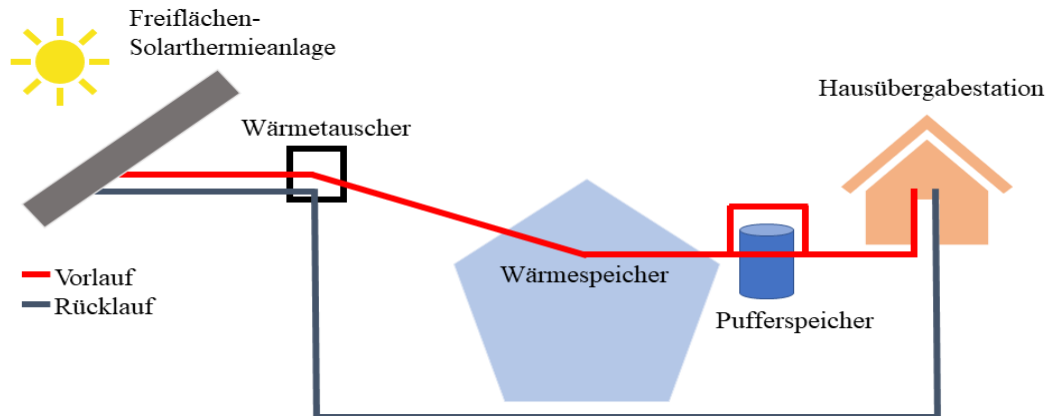


Abbildung 3: Vereinfachte Darstellung eines solaren Wärmenetzes (Eigene Darstellung nach Solites 2020: o.S.)

Der Wärmetauscher dient als Wärmeübergabestation zwischen dem solaren Primärkreislauf und dem Wärmenetz (Sekundärkreislauf). Somit wird durch den Wärmetauscher die solare Wärmeenergie in das Wärmenetz eingespeist. Bei dieser Einspeisung gehen circa 5 Kelvin verloren (Pehnt 2017: 26).

Die Temperatur eines Wärmenetzes gliedert sich in einer Vor- und Rücklauftemperatur, wobei die Vorlauftemperatur abhängig von dem Kundenbedürfnis, Netzkapazität, Erzeugungsmöglichkeit und der Temperaturbeständigkeit der Rohrleitungen ist. Die Vorlauftemperatur wird in der Regel im Sommer abgesenkt, um die Wärmeverluste zu minimieren (AGFW 2013: 42). Zusätzlich verringert eine möglichst niedrige Netztemperatur die thermischen Spannungen im Rohrmaterial, was zu einer Vermeidung von Degradation führt (Schneller et al. 2017: 8). Die Rücklauftemperatur ist abhängig von dem Wärmeverteilsystem der Kunden (AGFW 2013: 42). Genauer gesagt, ist die Rücklauftemperatur abhängig von der Hausübergabestation der Verbraucher und kann durch Gebäudesanierungen abgesenkt werden (Pehnt 2017: 47).

Eine FSA sollte in der Nähe eines Nahwärmenetz errichtet werden, da die Wärmeverluste mit einem längeren Transportweg zunehmen. So verliert eine kleinere solarthermische Anlage (<5.000 m²) über 7 % des Ertrages pro Kilometer Transportstrecke. Bei größeren Anlagen (20.000 m²) sinkt dieser Wert auf etwa 2 % (Nielsen & Battisti 2012:

25). Zusätzlich steigen die Kosten eines Wärmenetzes mit zunehmender Entfernung der FSA an. Es kann abgeschätzt werden, dass ein Meter Wärmeleitung etwa 250 € bis 290 € kostet (Pfnür et al. 2016: 56). Mit zunehmender Rohrnennweite oder ungünstigen Geländetypen, können die Kosten der Trassenverlegung deutlich ansteigen. Vor allem in bebauten Gebieten ist mit höheren Kosten zu rechnen (LANUV NRW 2019: 82f.). In Dänemark beträgt daher die durchschnittliche Entfernung zwischen einer FSA und einem Wärmenetz circa 200 m und die maximale Distanz einen Kilometer. Durch die kurze Strecke lassen sich die Wärmeverluste beim Transport und die Kosten für das Wärmenetz verringern (Trier et al. 2018: 29).

3.3 Vor- und Nachteile einer leitungsgebundenen Wärmeversorgung für Verbraucher

Wärmenetze stellen derzeit ein natürliches Monopol dar, weshalb ein Wechsel zu einem anderen Wärmeversorger nicht möglich ist. Zusätzlich ist der Wechsel zu einer dezentralen Wärmeversorgung mit hohen Kosten und einem erheblichen Aufwand verbunden. Ebenfalls führen die langen Vertragslaufzeiten von häufig zehn Jahren und ein für manche Wärmenetze ausgesprochener, unbefristeter kommunaler Anschluss- und Benutzungszwang dazu, dass Verbraucher eine sehr eingeschränkte Wahl bei der Wärmeversorgung haben. Daher sind die Verbraucher den Preissteigerungen von Wärmenetzbetreibern ausgeliefert (VZBV 2016: 5). Dem gegenüber steht, dass die dezentrale Wärmeversorgung derzeit in Privathaushalten zum großen Teil durch Öl oder Gas erfolgt, wodurch die Verbraucher ebenfalls abhängig von Energiekonzernen und deren Preisen sind. Allerdings haben Verbraucher mit einer dezentralen Wärmeversorgung die Möglichkeit den Anbieter frei zu wählen. Für Verbraucher können Wärmenetze durch Genossenschaften oder Bioenergiedörfer attraktiver gestaltet werden. Bei diesen können die Verbraucher ihr Kapital anlegen und gleichzeitig eine kontrollierende Funktion einnehmen. In den letzten Jahren ist ein zunehmender Trend in diesem Bereich zu erkennen. Grundsätzlich kann eine Bürgerbeteiligung zu einem hohen Anschlussgrad und somit zu einer höheren Effizienz des Wärmenetzes führen (Solites 2015: 66).

4 Strahlungsgrundlagen

Solarthermie ist definiert als die thermische Nutzung solarer Energie (Quaschnig 2019: 107). Somit ist die Veränderung der Strahlungsenergie im zeitlichen Verlauf zu betrachten, um den potenziellen Wärmeertrag einer solarthermischen Anlage ermitteln zu können.

Eine entscheidende Rolle spielt hierbei die Sonnenbestrahlungsstärke [W/m^2], also die Einstrahlung der Sonne im Verhältnis zur Fläche. Zur Vereinfachung kann für die Bestrahlungsstärke die Solarkonstante angenommen werden. Diese wurde im Jahr 1982 von der World Meteorological Organization festgelegt. Die Solarkonstante ist definiert als langjähriger Mittelwert der extraterrestrischen Strahlung, welche außerhalb der Atmosphäre gemessen werden kann. Sie beträgt $1367 \text{ W}/\text{m}^2$ (Stieglitz & Heinzel 2012: 28). Die Bestrahlungsstärke der Sonne auf eine Fläche hängt von der Einstrahlungsrichtung und somit von einer Vielzahl von Faktoren und geometrischen Beziehungen ab. Diese sind nach (Stieglitz & Heinzel 2012: 44):

- Die ellipsoide Umlaufbahn der Erde um die Sonne
- Die Deklination der Erde, also der Neigung der Erdrotationsachse zur Ekliptikebene
- Die Eigenrotation der Erde
- Die Abhängigkeit des Sonnenstandes von der geographischen Breite

Infolgedessen sind die Einstrahlungsdauer und Strahlungsintensität nicht konstant, sondern schwanken im tages- und jahreszeitlichen Verlauf. Die extraterrestrische Strahlungsintensität ist in der Region Köln im Winter (Tag 345) deutlich geringer als im Sommer (Tag 165) und die Einstrahlungsdauer ist im Sommer fast doppelt so lange wie im Winter (vgl. Abbildung 4) (Stieglitz & Heinzel 2012: 54).

Abb. 2.23 Tagesverlauf der Intensität der extraterrestrischen Sonnenstrahlung i_{extra} in kW/m^2 als Funktion der Tageszeit t in Stunden [h] an verschiedenen Tagen des Jahres für die geographische Breite von $\Phi = 51^\circ \text{ N}$ (Köln); Neigungswinkel: $\beta = 0^\circ$ (horizontal)
(Stieglitz & Heinzel 2012: 54)

Abbildung 4: Tagesverlauf der Intensität der extraterrestrischen Sonnenstrahlung (i_{extra}) für die Region Köln (Stieglitz & Heinzel 2012: 54)

Die gemessene Bestrahlungsstärke auf der Erde ist üblicherweise geringer als die extraterrestrische. Dies liegt unter anderem an der Strahlungsabsorption in bestimmten Wellenlängenbereichen von verschiedenen Bestandteilen der Atmosphäre, wie bspw. Wasserdampf, Kohlendioxid, Ozon und Sauerstoff. Diese absorbierten Wellenlängenbereiche werden Absorptionsbanden genannt (Quaschnig 2019: 73). Außerdem wird die Bestrahlungsstärke infolge der Rayleigh- und der Mie-Streuung reduziert. Zusätzlich wird ein Teil der Strahlung an der Atmosphäre reflektiert (Quaschnig 2019: 73f.). Der gestreute Anteil der Strahlung wird als diffuse Strahlung bezeichnet und ist ein Teil der gesamten Bestrahlungsstärke. Diese setzt sich aus einem direkten und einem diffusen Strahlungsanteil zusammen. Es ist zu beachten, dass die direkte Strahlung ungehindert aus Richtung der Sonne strahlt, während die diffuse Strahlung aus keiner definierten Richtung kommt. Die diffuse Strahlung nimmt mit zunehmender Streuung des Sonnenlichtes in der Atmosphäre zu (Quaschnig 2019: 79f.).

In Deutschland ist im Durchschnitt über 50 % der Gesamtstrahlung diffus (Quaschnig 2019: 80). An stark bewölkten Tagen kann bis zu 100 % der Gesamtstrahlung diffus sein (Quaschnig 2019: 82).

Damit ein solarthermischer Kollektor die Strahlung optimal nutzen kann, muss dieser in dem richtigen Winkel aufgestellt werden. Die geringste jahreszeitliche Schwankung der Bestrahlungsstärke in der Region Köln, liegt bei einem Neigungswinkel des Kollektors von $\beta = 45^\circ$ in südlicher Richtung (vgl. Abbildung 5) (Stieglitz & Heinzel 2012: 55f.).

Abb. 2.25 Jahresgang der Tagessummen der extraterrestrischen Sonnenstrahlung I_{extra} für die geographische Breite von Köln ($\Phi = 51^\circ$) für verschiedene Neigungswinkel β ; Aufstellung: Süden
(Stieglitz & Heinzel 2012: 55)

Abbildung 5: Jahresgang der Tagessumme der extraterrestrischen Bestrahlungsstärke (I_{extra}) für die Region Köln (Stieglitz & Heinzel 2012: 55)

5 Aufbau einer Solarthermieanlage

Eine Solarthermieanlage für ein Nahwärmenetz besteht im Wesentlichen aus einem Kollektorfeld und einem großen Wärmespeicher. Diese werden mithilfe eines Rohrsystems verbunden, durch welches ein Wärmeträgermedium fließt und mithilfe einer Pumpe betrieben wird. Die Kollektoren wandeln die solare Strahlung in Wärmeenergie um. Da sich das Energieangebot und die Energienachfrage zeitlich nur selten überschneiden, ist eine Solarthermieanlage häufig nur mithilfe eines Speichers sinnvoll nutzbar (Wesselak et al. 2013: 258). Die überschüssige Wärmeenergie aus den Sommermonaten kann durch einen saisonalen Wärmespeicher für die kälteren Jahreszeiten gespeichert werden (Streicher et al. 2013b: 191).

Hauptsächlich werden solarthermische Anlagen für die Bereiche der Raumwärmebeheizung, der Warmwasseraufbereitung, als Antriebswärme für solare Kühlsysteme oder als Prozesswärme genutzt (Streicher 2013a: 181).

Solarthermische Systeme, welche mit Hilfe eines Kollektors die Solarenergie in Wärmeenergie umwandeln, werden aktive Systeme genannt. Passive Systeme sind bauliche Maßnahmen, welche eine Nutzung der Solarenergie ermöglichen. Passive Systeme werden in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet (Stieglitz & Heinzl 2012: 84).

Im Folgenden werden sowohl solarthermische Kollektoren als auch die derzeit gängigen Wärmespeicher beschrieben.

5.1 Solarthermische Kollektoren

Der Kollektor ist ein wesentlicher Bestandteil von solarthermischen Anlagen und wandelt einen Teil der Solarstrahlung in Wärme um (Streicher et al. 2013b: 191). Für FSA werden hauptsächlich Flachkollektoren und Vakuumröhrenkollektoren eingesetzt (Pehnt 2017: 26). Daher werden diese im Folgenden näher beschrieben.

5.1.1 Flachkollektoren

Flachkollektoren sind in Europa am stärksten verbreitet und besteht aus drei entscheidenden Komponenten. Diese sind ein Absorber, eine transparente Abdeckung und ein Kollektorgehäuse (Quaschnig 2019: 124). Ein schematischer Aufbau eines Flachkollektors ist in Abbildung 6 dargestellt.

Am Absorber wird die kurzwellige solare Strahlung in Wärmeenergie umgewandelt. Hierbei ist zu beachten, dass die verbauten Materialien bei über 200 °C temperaturbeständig sind und über eine gute Wärmeleitfähigkeit zum Wärmeträgermedium verfügen. Zusätzlich sollten

Bild 3.16 Vorgänge in einem Flachkollektor

(Quaschnig 2019: 124)

Abbildung 6: Schematischer Aufbau eines Flachkollektors (Quaschnig 2019: 124)

Absorber ein möglichst geringes Emissionsvermögen im langwelligen Bereich und gleichzeitig ein möglichst hohes Absorptionsvermögen im kurzwelligen Bereich aufweisen (Streicher et al. 2013b: 192).

Die Abdeckung eines Flachkollektors, welche in der Abbildung 6 Frontglasscheibe genannt wurde, besteht häufig aus Solarglas. Die Aufgabe der Abdeckung ist es, Konvektionsverluste zu reduzieren, sowie für die kurzwellige Solarstrahlung durchlässig und gleichzeitig für die thermale Rückstrahlung möglichst undurchlässig zu sein (Streicher et al. 2013b: 193). Solarglas hat einen deutlich geringeren Eisenanteil, wodurch mehr kurzwellige Strahlung transmittieren kann (Quaschnig 2019: 125). Zusätzlich wird die Unterseite der Abdeckung beschichtet, um die thermale Ausstrahlung zu minimieren (Streicher et al. 2013b: 194).

Das Gehäuse dient der mechanischen Stabilität des Kollektors und dichtet das Kollektorinnere nach außen ab. Eine Luftzirkulation zwischen der Luft im Kollektorinneren und der Umgebungsluft ist dennoch nötig, um temperaturschwankungsbedingte Druckveränderungen und eventuell auftretende Feuchtigkeit zu verhindern. Weiterhin ist ein Flachkollektor an der Gehäuseinnenseite isoliert, um Wärmeverluste zu minimieren (Wesselak et al. 2013: 313).

Flachkollektoren können bis zu einer Nutzttemperatur von 75 °C eingesetzt werden (Wesselak et al. 2013: 311). Die spezifischen Kosten eines Flachkollektors liegen zwischen 300 €/m² und 400 €/m² (Stand 2013). Hierbei sind die Kosten abhängig von der Qualität und Leistungsfähigkeit des Kollektors (Wesselak et al. 2013: 313).

5.1.2 Vakuumröhrenkollektoren

Vakuumröhrenkollektoren können den Konvektions- und Leitungsverlust durch ein Hochvakuum deutlich verringern, daher sind Betriebstemperaturen von über 100 °C möglich. Allerdings ist die Absorberfläche im Vergleich zur gesamten Kollektorfläche geringer als die eines Flachkollektors. Dadurch ist der Wirkungsgrad bei niedrigen Betriebstemperaturen bei einem Vakuumröhrenkollektor geringer als bei einem Flachkollektor (Streicher et al. 2013b: 195). Die Vakuumröhrenkollektoren lassen sich in die Bauweise der Sydney-Röhrenkollektoren und der Heatpipe-Kollektoren unterteilen.

Die Sydney-Röhrenkollektoren bestehen aus zwei konzentrischen Glaszylindern, zwischen denen sich ein Vakuum befindet. Der innere Glaszylinder kann entweder direkt im Inneren mit einer Absorberschicht beschichtet sein oder ein gebogenes Absorberblech befindet sich in dessen Inneren. Das Wärmeträgermedium befindet sich hierbei in dem inneren Rohr und kann sich so erwärmen (Streicher et al. 2013b: 195f).

Bei einem Heatpipe-Kollektor ist inmitten eines flachen Absorberblechs (Fahnenabsorber) ein Wärmerohr (Heatpipe) mit Wärmeträgerflüssigkeit integriert. Diese Wärmeträgerflüssigkeit erwärmt sich in Folge der solaren Einstrahlung und verdampft. Damit dieser Dampf aufsteigen und zum Kondensator gelangen kann, werden Heatpipe-Kollektoren grundsätzlich mit einer leichten Neigung aufgebaut.

Im Kondensator kondensiert die Wärmeträgerflüssigkeit und gibt dabei die Energie an den Wärmeträger des nachfolgenden Kreislaufes ab und fließt in der Heatpipe zurück. Weiterhin wird auch bei einem Heatpipe-Kollektor durch ein Vakuum zwischen innerer und äußerer Röhre der Wärmeverlust minimiert (Quaschnig 2019: 125f). Der Aufbau eines Heatpipe-Kollektors ist in Abbildung 7 dargestellt.

Bild 3.20 Aufbau und Funktionsprinzip des Vakuumröhrenkollektors

(Nur Ansicht von oben)

(Quaschnig 2019: 128)

Abbildung 7: Aufbau eines Heatpipe-Kollektors (Quaschnig 2019: 128)

Je nach Bauweise kosten Vakuumröhrenkollektoren zwischen 850 €/m² und 1000 €/m² (Stand 2013) und sind somit deutlich teurer als Flachkollektoren (Wesselak et al. 2013: 315). Generell erreichen Vakuumröhrenkollektoren einen deutlich höheren Energieertrag als Flachkollektoren und sind insbesondere dort bevorzugt einzusetzen, wo eine konventionelle Nachheizung nicht möglich ist (Quaschnig 2019: 128). Des Weiteren erreichen Vakuumröhrenkollektoren höhere Temperaturen als Flachkollektoren (Quaschnig 2019: 134).

5.1.3 Der Kollektorwirkungsgrad

Der Wirkungsgrad eines Kollektors (η_o [%]) ist abhängig von der Strahlungsintensität (i [W/m²]) und dem Temperaturgradienten ($T_A - T_U$ [°C]) und ist in Abbildung 8 für einen Flachkollektor bei verschiedenen Strahlungsintensitäten dargestellt (Stieglitz & Heinzel 2012: 92). Somit

Abb. 6.4 Wirkungsgrad η eines Flachkollektors ($k^*_{ges} = 3.8$ W/(m²K), $k_l = 0.03$ W/(m²K)) in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz bei verschiedenen Einstrahlungsintensitäten (Stieglitz & Heinzel 2012: 395)

Abbildung 8: Der Wirkungsgrad eines Flachkollektors bei verschiedenen Einstrahlungsintensitäten (Stieglitz & Heinzel 2012: 395)

nimmt der Kollektorwirkungsgrad stärker ab, wenn die Strahlungsintensität abnimmt. Des Weiteren verringert sich der Wirkungsgrad eines Kollektors mit einer Zunahme der Temperaturdifferenz zwischen der Absorbtemperatur und der Umgebungsluft.

5.1.4 Nutzleistung eines Kollektors

Ein weiteres Qualitätsmerkmal eines solarthermischen Kollektors ist die Nutzleistung (q_n [%]). Die Nutzleistung beschreibt wie groß der Anteil der Strahlungsenergie ist, welche durch einen Kollektor in nutzbare Wärmeenergie umgewandelt wird. Diese ist neben der Strahlungsintensität (i) abhängig von den optischen Verlusten und den Wärmeverlusten eines Kollektors und muss

Abb. 3.6 Nutzleistungen eines Flachkollektors nach Gl. 3.1 mit $\alpha = 0.9$, $\tau = 0.9$ und $k_{ges} = 4.0$ W/(m²K) für die Einstrahlungsleistungen $i = 600$ W/m² **a** und $i = 800$ W/m², **b** über der Temperaturdifferenz ($T_A - T_U$) (Nur b) (Stieglitz & Heinzel 2012: 92)

Abbildung 9: Die Nutzleistung eines Flachkollektors bei einer Einstrahlungsintensitäten von $i = 800$ W/m² (Stieglitz & Heinzel 2012: 92)

daher kollektorspezifisch bestimmt werden. Allerdings bleiben die optischen Verluste bei baugleichen Kollektoren gleich und lediglich die Wärmeverluste steigen mit zunehmenden Temperaturgradienten ($T_A - T_U$ [°C]) (vgl. Abbildung 9). (Stieglitz & Heinzel 2012: 91f).

Vereinfacht lässt sich der Kollektorertrag (η_c) für unterschiedliche Kollektortypen über den Kollektorwirkungsgrad (η_o [%]) und die beiden Verlustkoeffizienten (a_1 und a_2 [W/(K*m²)]) bestimmen. Hierbei ist η_o die maximale Nutzleistung eines Kollektors ohne Wärmeverluste und die Verlustfaktoren bestimmen die Wärmeverluste in Abhängigkeit von dem Temperaturgradienten ($T_M - T_U$ [°C]). T_M ist die mittlere Temperatur des Kollektorinneren, also die mittlere Temperatur der Flüssigkeit innerhalb des Kollektors. T_U ist die Temperatur der Umgebungsluft. Der Temperaturgradient wird weiterhin durch die Globalstrahlung auf Kollektorebene (G [W/m²]) geteilt (Trier 2012: 103f.). Die Formel lautet daher:

$$\text{Formel: } \eta_c = \eta_o - a_1 * \left(\frac{T_M - T_U}{G} \right) - a_2 * \left(\frac{T_M - T_U}{G} \right)^2$$

5.2 Wärmespeicher

Die solarthermische Wärmeerzeugung unterliegt starken jahres- und tageszeitlichen Schwankungen. Damit trotzdem ein hoher solarer Deckungsgrad in einem Nahwärmenetz erreicht werden kann, bedarf es eines Langzeitwärmespeichers, welcher diese Schwankungen ausgleicht, Erzeugungs- und Verbrauchspitzen abfedert und eine Versorgungssicherheit gewährleisten kann (Wesselak et al. 2013: 681). Ein solares Nahwärmenetz kann mithilfe eines Langzeitwärmespeichers einen solaren Deckungsanteil von über 40 % erreichen (Pehnt 2017: 26). Vor allem Niedrigtemperaturspeicher bis 100 °C spielen eine zentrale Rolle für solare Nahwärmenetze (Quaschnig 2019: 141).

Langzeitwärmespeicher lassen sich nach der Speicherart in drei Kategorien unterteilen, den sensiblen, latenten und thermochemischen Wärmespeicher. Thermochemische Wärmespeicher wurden bislang nur in einzelnen Pilotprojekten realisiert und werden daher in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet (Wesselak et al. 2013: 701). Zusätzlich existieren derzeit noch keine Latentwärmespeicher für solarthermische Nahwärmenetze, weshalb auch diese im Verlauf der Arbeit nicht weiter berücksichtigt werden (Streicher et al. 2013b: 208).

Die Speicherung der Wärme in sensiblen Wärmespeichern geht mit einer fühlbaren Erhöhung der Temperatur im Speichermedium einher. Wie viel Wärmeenergie gespeichert werden kann ist abhängig von der spezifischen Wärmekapazität eines Stoffes (Wesselak et al. 2013: 682).

Derzeit gibt es vier verschiedene sensible Wärmespeicher, für ein solarthermisches Nahwärmenetz, welche bereits in verschiedenen Pilotprojekten erfolgreich umgesetzt wurden. Die vier Langzeitwärmespeicher sind nach (Solites 2016: o.S.):

- Behälter-Wärmespeicher
- Erdbecken-Wärmespeicher (Kies-Wasser-Wärmespeicher)
- Erdsonden-Wärmespeicher
- Aquifer-Wärmespeicher

Ein schematischer Aufbau der vier Langzeitwärmespeicher ist in Abbildung 10 dargestellt. Die Pfeile in der Abbildung geben die Fließrichtung des Wärmeträgermediums an.

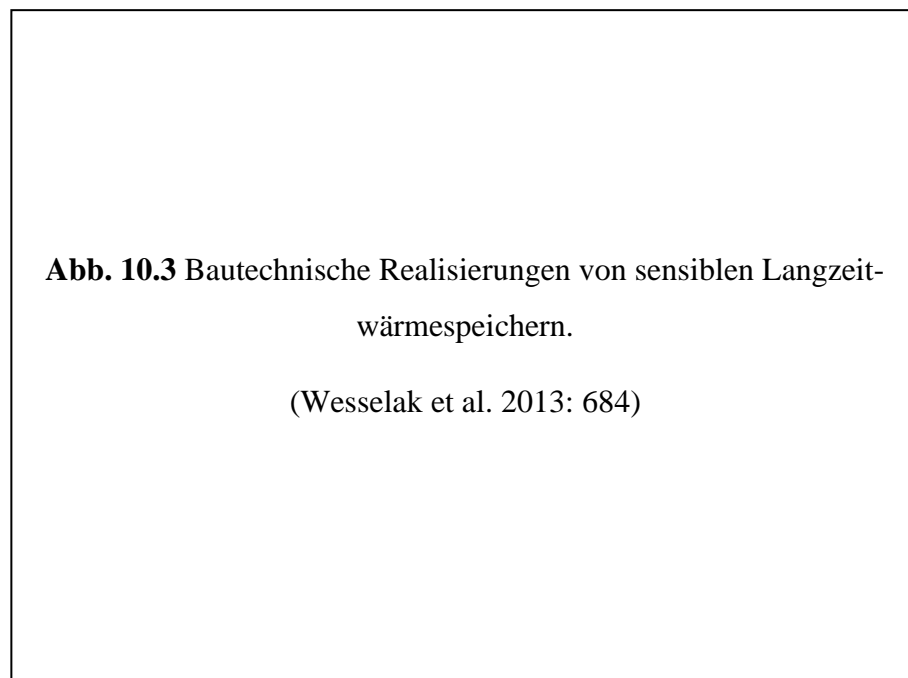


Abbildung 10: Schematischer Aufbau der derzeit am häufigsten genutzten sensiblen Wärmespeicher für solare Nahwärmenetze (Wesselak et al. 2013: 684)

5.2.1 Behälter-Wärmespeicher

Der Behälter-Wärmespeicher, welcher auch Heißwasser-Wärmespeicher genannt wird, ist ein großer Wasserbehälter, welcher mit Beton, Stahl oder Kunststoff umhüllt und meist wärme gedämmt ist. Häufig werden diese Wärmespeicher in den Untergrund integriert (Wesselak et al. 2013: 685).

Bislang konnten Behälter-Wärmespeicher bis zu einem Volumen von 12.000 m³ bei einer Wärmespeicherkapazität von 60-80 kWh/m³ realisiert werden. Wasser als Speichermedium kann bis zu einer Temperatur von circa 95 °C problemlos erwärmt werden. Bei höheren Temperaturen verdampft Wasser und ein Behälter-Wärmespeicher würde dem dadurch entstehenden höheren Druck nicht standhalten (Solites 2016: o.S.).

Beispielsweise lagen die volumenspezifischen Baukosten eines Behälter-Wärmespeichers bei einem Projekt in München bei 150 €/m³ (Magold et al. 2012: 27).

5.2.2 Erdbecken-Wärmespeicher

Erdbecken-Wärmespeicher werden ebenso wie Behälter-Wärmespeicher in eine Tiefe von bis zu 15 m in den Untergrund eingegraben. Als Speichermedium kommen neben Wasser auch Kies-Wasser oder Erdreich-Wasser-Gemische in Frage. Daher werden Erdbecken-Wärmespeicher auch Kies-Wasser-Wärmespeicher genannt. Allerdings ist die Wärmespeicherfähigkeit von Gemischen im Vergleich zu Wasser geringer. So erreichen Kies-Wasser-Wärmespeicher eine niedrigere Maximaltemperatur von bis zu 80 °C (Solites 2016: o.S.).

Ein Kies-Wasser-Wärmespeicher kann eine Speicherkapazität von 30-50 kWh/m³ erreichen. Die volumenspezifischen Baukosten lagen bei einem Speicher in Eggenstein-Leopoldshafen bei 148 €/m³ (Magold et al. 2012: 28).

In Dänemark werden Erdbecken-Wärmespeicher häufig realisiert. Die Besonderheit an den dänischen Wärmespeichern ist, dass diese kaum oder gar nicht wärmegeämmt werden (Magold et al. 2012: 31). Weiterhin sind diese Wärmespeicher deutlich größer, so dass die volumenspezifischen Baukosten bei etwa 35 €/m³ liegen und somit deutlich günstiger als Erdbecken-Wärmespeicher in Deutschland sind (Pehnt 2017: 32).

5.2.3 Erdsonden-Wärmespeicher

Bei einem Erdsonden-Wärmespeicher wird das Gestein im Untergrund genutzt, um die Wärme zu speichern. Hierfür werden Erdwärmesonden in bis zu 100 m Tiefe vertikal oder leicht schräg in den Boden eingelassen. Das erhitzte Wasser wird so in den Untergrund geleitet und erwärmt das Gestein. Gedämmt werden Erdsonden-Wärmespeicher ausschließlich an der Speicherobenseite. (Solites 2016: o.S.).

Erdsonden-Wärmespeicher sind wesentlich langsamer als Erdbecken- oder Behälter-Wärmespeicher und werden deshalb häufiger in Verbindung mit Pufferspeichern oder Wärmepumpen aufgebaut, so dass Spitzen abgefedert werden können (Solites 2016: o.S.).

Mit einem Erdsonden-Wärmespeicher lassen sich Temperaturen von bis zu 80 °C speichern. Zwar benötigen die Erdsonden einen horizontalen Abstand von 1,5 m bis 3 m, wodurch eine vergleichsweise große Fläche beansprucht wird, allerdings kann die darüberliegende Freifläche uneingeschränkt genutzt werden. Erdsonden-Wärmespeicher sind erst ab einem Speichervolumen von 20.000 m³ energetisch und ökonomisch sinnvoll. Sie können eine Wärmedichte von bis zu 30 kWh/m³ erreichen (Solites 2016: o.S.).

Die volumenspezifischen Baukosten eines Erdsonden-Wärmespeichers in Crailsheim sind mit 59 €/m³ geringer als bei anderen Speichern. Zusätzlich entstanden höhere spezifische Kosten durch die Bohrarbeiten, die Installation der Erdsonden und die Bohrloch-Verfüllung von circa 50 €/m (Magold et al. 2012: 30).

5.2.4 Aquifer-Wärmespeicher

Ein Aquifer-Wärmespeicher kann im Gegensatz zu den anderen saisonalen Wärmespeichern nicht konstruiert, sondern lediglich erschlossen werden. Die Grundvoraussetzung ist eine natürliche Wasserschicht im Planungsgebiet, welche durch natürliche geologische Formen eingeschlossen ist. Andernfalls kann die eingespeicherte Wärme davonfließen. Aquifer-Wärmespeicher können nicht gedämmt werden und benötigen sehr aufwändige geologische Voruntersuchungen und weiterhin betriebsbegleitende Untersuchungen, um hydro-geologische Veränderungen zu vermeiden und mögliche Trinkwasservorkommen zu schützen. (Solites 2016: o.S.).

Bei einem realisierten Aquifer-Wärmespeicher in Rostock konnten volumenspezifische Baukosten von 34 €/m³ erreicht werden. Die Maximaltemperatur war in diesem Fall auf 50 °C beschränkt (Magold et al. 2012: 31).

6 Rechtliche Rahmenbedingungen

In diesem Kapitel werden zunächst die rechtlichen Rahmenbedingungen der Wärmewende sowie die raumordnerischen Bedingungen für die Errichtung von FSA auf Bundes- und Länderebene erläutert. Zusätzlich wird dargelegt, wie Kommunen Flächen für FSA ausweisen können. Abschließend werden Fördermöglichkeiten für die FSA und Wärmenetze aufgeführt.

6.1 Bundesweite gesetzliche Vorgaben

Die Grundlage einer nachhaltigen Entwicklung der Wärmeversorgung in Deutschland ist in dem Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich (EEWärmeG) dargelegt. In diesem Gesetz ist unter anderem das Ziel festgeschrieben, den Anteil erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch für Wärme und Kälte bis zum Jahre 2020 auf 14 % zu steigern (§ 1 Abs. 2 EEWärmeG 2008). Thermische Solarenergie ist neben weiteren erneuerbaren Energiequellen wie Geothermie oder Bioenergie eine Möglichkeit, dieses Ziel zu erreichen (§ 2 EEWärmeG 2008). Neu errichtete Gebäude und solche, die sich in öffentlicher Hand befinden und grundlegend renoviert werden, müssen einen Anteil ihrer Wärme- oder Kälteversorgung aus erneuerbaren Energien beziehen (§ 3 Abs. 1-3 EEWärmeG 2008). Die Ausnahmen werden in § 4 EEWärmeG beschrieben. Diese Nutzungspflicht ist beispielsweise erfüllt, wenn die Wärme- oder Kälteversorgung zu mindestens 15 % durch eine solarthermische Anlage gedeckt wird, (§ 5 Abs. 1 EEWärmeG 2008). Des Weiteren müssen solarthermische Anlagen mit dem europäischen Prüfzeichen „Solar Keymark“ zertifiziert sein (Anlage I Abs. 1 Buchstabe c EEWärmeG 2008). Nur dann kann eine solarthermische Anlage nach EEWärmeG als förderfähig eingestuft werden (§ 14 EEWärmeG 2008).

6.2 Gesetzliche Vorgaben im Land Nordrhein-Westfalen

Der Landesentwicklungsplan des Landes Nordrhein-Westfalens (LEP NRW) legt Ziele und Grundsätze der raumordnerischen Entwicklung in Nordrhein-Westfalen fest. Unter dem Punkt 10.2-5 werden die Ziele für die Nutzung von Solarenergie beschrieben. Es wird hierbei nicht zwischen FSA und Photovoltaik-Freiflächen unterschieden (Landesregierung Nordrhein-Westfalen 2019: o.S.). Es ist nur in Ausnahmen gestattet, Flächen für die raumbedeutsame Nutzung von Solarenergie in Anspruch zu

nehmen, sofern dies mit dem Regionalplan vereinbar ist und es sich um folgende Flächen handelt:

- Gewerbliche, bergbauliche, verkehrliche oder wohnungsbauliche Brachflächen und militärische Konversionsflächen
- entlang Bundesfernstraßen
- entlang Schienenwegen mit überregionaler Bedeutung
- Halden
- Deponien

Des Weiteren sind Freiflächen-Solarenergieanlagen im Gegensatz zu Biomasseanlagen oder Windenergieanlagen nicht planungsrechtlich privilegiert (Landesregierung Nordrhein-Westfalen 2019: o.S.).

Da das Untersuchungsgebiet im Regierungsbezirk Münster liegt, ist es von Bedeutung, dass die Bezirksregierung Münster in dem sachlichen Teilplan Energie des Regionalplans ebenfalls diese Gebiete definiert. Auch im Regionalplan Münster wird nicht zwischen FSA und Photovoltaik-Freiflächen unterschieden. Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung des Regionalplans Münster wurden noch keine FSA im Münsterland geplant. Es ist sicherzustellen, dass folgenden Gebiete durch Freiflächen-Solarenergieanlagen nicht beeinträchtigt werden dürfen:

- Arten- und Biotopschutzgebiete
- Gewässerschutzgebiete
- Bedeutsame Kulturlandschaftsbereiche
- Bereiche zur Sicherung und zum Abbau oberflächennaher Bodenschätze (BSAB)

Zusätzlich gilt es zu vermeiden, dass es zu bandartigen Strukturen oder zur Beeinträchtigung des Orts- und Landschaftsbildes kommt (Bezirksregierung Münster 2016: 16-20.).

Freiflächen-Solarenergieanlagen können entlang von Bundesfernstraßen und Schienen errichtet werden. Hierfür werden die Regularien des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) herangezogen, da andere rechtliche Vorgaben fehlen. So dürfen Anlagen beidseitig entlang der Verkehrsinfrastrukturen in einem 110 m breiten Korridor errichtet werden, hiervon muss jedoch eine Bauverbotszone von 40 m an Autobahnen, 20 m an Bundesstraßen und 10 m an Bahnstrecken abgezogen werden. In Siedlungsbereichen sind Freiflächen-Solarenergieanlagen nur in einer untergeordneten Größenordnung gestattet, wenn die Funktion dieser Gebietskategorie gewahrt wird. Weiterhin sollten nur Flächen genutzt werden, welche aufgrund einer zu geringen Größe oder eines ungünstigen Flächenzuschnittes nicht anderweitig genutzt werden können. Flächen der

Gebietskategorien Allgemeine Freiraum- und Agrarbereiche, Bereiche zum Schutz der Landschaft oder der Landschaftsorientierten Erholung, die nicht die oben genannten Kriterien erfüllen, dürfen nicht für Freiflächen-Solarenergieanlagen genutzt werden. Ausnahmen hiervon stellen Flächen dar, deren Nutzungen oder ehemalige Nutzungen zu einer wesentlichen Beeinträchtigung der Freiraumfunktion geführt hat. Weiterhin müssen Solarenergieanlagen auf Freiflächen ab einer Größe von zehn Hektar im Regionalplan dargestellt werden (Bezirksregierung Münster 2016: 19f.).

6.3 Kommunale Bauleitplanung

Das Baugesetzbuch (BauGB) wurde zuletzt Anfang 2020 geändert und bildet die Grundlage der Bauleitplanung für die Gemeinden in Deutschland (§ 1 BauGB 2020). Für die Bauleitplanung stellen die Gemeinden einen Flächennutzungsplan (vorbereitend) und einen Bauleitplan (verbindlich) auf. Beide Pläne sind an die Ziele der Raumordnung angepasst (§ 2 bis § 4 BauGB 2020).

Anlagen zur öffentlichen Versorgung mit Wärme im Außenbereich sind nach § 35 Abs. 3 BauGB nur gestattet, wenn sie öffentliche Belange nicht beeinträchtigen.

Solarthermische Freiflächenanlagen können nach § 9 BauGB als Versorgungsfläche oder als Versorgungsanlage nach § 5 BauGB ausgewiesen werden. Nach der Baunutzungsverordnung (BauNVO) von 2017 können solche Anlagen ebenfalls als Sondergebiet nach § 11 BauNVO ausgewiesen werden.

Gemeinden können in Nordrhein-Westfalen nach der Gemeindeordnung § 9 GO NRW von 2020 einen Anschluss und Benutzungszwang für Wärmenetze aussprechen und diesen in einer Satzung festhalten. Dieser schreibt eine Nutzung der Wärme aus einem Wärmenetz in einem definierten Gebiet vor. Ein Anschluss- und Benutzungszwang kann weiterhin für einzelne Teilgebiete einer Gemeinde oder für bestimmte Grundstücke oder Personengruppen erlassen werden. Zusätzlich können Gemeinden einem Anschluss- und Benutzungszwang für Wärmenetze nach dem EEWärmeG aussprechen (§ 16 EEWärmeG 2008).

6.4 Subventionierungsmöglichkeiten

Im folgenden Kapitel werden staatliche Förderprogramme dargestellt, welche den Bau von FSA und von Wärmenetzen subventionieren.

6.4.1 Progres.nrw- Markteinführung

Die Richtlinie progres.nrw-Markteinführung ist ein Teil des Programms für rationelle Energieverwendung, regenerative Energien und Energiesparen des Landes Nordrhein-Westfalen. Es werden neben einer Vielzahl von anderen Techniken zur Nutzung erneuerbarer Energien auch thermische Solaranlagen, Wärmeübergabestationen, Wärmespeicher und Wärmenetze gefördert. Diese Förderrichtlinie ist seit März 2020 in Kraft und endet am 30.06.2021 (MWIDE 2020b: 1f.).

Solarthermieanlagen werden grundsätzlich zur Prozesswärme, Brauchwasserunterstützung und/oder zur Heizungsunterstützung mit 90 €/m² gefördert (MWIDE 2020a: 1f).

Zusätzlich muss pro Kollektor ein jährlicher Mindestenergieertrag von 525 kWh/m² nachgewiesen werden. Es darf maximal ein Quadratmeter Bruttokollektorfläche pro zehn Quadratmeter beheizte Wohn- und Gewerbefläche errichtet werden. Des Weiteren werden nur Kollektoren gefördert, welche nach den Normen DIN EN 12975, DIN 12976 und DIN EN 12977 geprüft und mit dem europäischen Prüfzeichen „Solar Key-mark“ zertifiziert wurden (MWIDE 2020b: 5f.).

Für Wärmenetze wird eine Wärmeübergabestation pro Gebäude und Standort gefördert und dies auch nur, wenn in dem Gebiet kein Anschluss- und Benutzungszwang für ein öffentliches Wärmenetz ausgesprochen wurde. Zusätzlich muss die Energie für solche Wärmenetze zu einem großen Teil aus erneuerbaren Energien, Abwärme oder KWK-Anlagen stammen (MWIDE 2020b: 7).

Wärmespeicher können nur gefördert werden, wenn diese innovativ sind. Innovative Wärmespeicher sind beispielsweise Latentwärmespeicher. Die Wärmenetze, welche gefördert werden, müssen mehr als 50 % der jährlichen Wärmeversorgung der Verbraucher ausmachen. Außerdem dürfen die Netzbetreiber und Verbraucher in der Regel nicht dieselben sein. Eine Ausnahme hiervon stellen Energiegenossenschaften dar (MWIDE 2020b: 8).

6.4.2 KfW-Programm Erneuerbare Energien „Premium“

Das Förderprogramm Erneuerbare Energien „Premium“ der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW-Bank) fördert die Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt mit zinsgünstigen Darlehen und Tilgungszuschüssen, welche vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) finanziert werden. Antragsberechtigt sind neben natürlichen Personen auch gemeinnützige Antragsteller, Genossenschaften, Landwirte, freiberuflich Tätige, Unternehmen und Kommunen (KfW 2020: 1).

Es werden bis zu 100 % der gesamten förderfähigen Kosten finanziert und das bis zu einem Gesamtvolumen von maximal 25 Millionen Euro. Der Kredit kann bis zu 20 Jahre laufen (KfW 2020: 5f.).

Solarthermische Kollektoren werden für die Warmwasserbereitung und/oder Raumwärme unter anderem zur Bereitstellung in ein Wärmenetz gefördert, wenn die Kollektoranlage größer als 40 m² ist (KfW 2020: 2). Diese Kollektoren werden mit bis zu 40 % der förderfähigen Nettoinvestitionskosten gefördert (KfW 2020: 7). Für große Solarthermieanlagen muss durch eine Systemsimulation ein jährlicher Mindestkollektorertrag von 300 kWh/m² zur Raumwärmeversorgung nachgewiesen werden. Wenn diese Solarthermieanlage ebenfalls zur Trinkwassererwärmung genutzt wird, ist ein jährlicher Mindestkollektorertrag von 350 kWh/m² notwendig (KfW 2019: 2).

Des Weiteren wird die Errichtung und Erweiterung von Wärmenetzen inklusive der Hausübergabestationen gefördert, wenn die Wärmenetze einen solaren Deckungsgrad von mindestens 20 % aufweisen. Zusätzlich muss die übrige Wärme aus hocheffizienten KWK-Anlagen, aus Wärmepumpen oder der industriellen oder gewerblichen Abwärme stammen. Das Wärmenetz muss im Durchschnitt ein Mindestwärmeabsatz von 500 kWh pro Jahr und Meter Trasse nachweisen. Ein solches Wärmenetz wird mit bis zu 60 € pro errichteten Meter bei einem Förderhöchstbetrag von einer Million Euro gefördert, sofern das Wärmenetz keinen Anspruch auf eine Förderung durch das Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG) hat. Zusätzlich können die Hausübergabestationen der Bestandsgebäude mit jeweils 1800 € gefördert werden, insofern kein kommunaler Anschlusszwang vorliegt (KfW 2020: 7).

Auch große Wärmespeicher können gefördert werden, wenn diese überwiegend aus erneuerbarer Wärme gespeist und größer als zehn m³ sind (KfW 2020: 3). Für Wärmespeicher gilt ebenfalls, dass diese nur gefördert werden, wenn kein Anspruch auf

Zuschlagszahlungen durch das KWKG besteht. Dann werden Wärmespeicher durch die KfW Bank mit 250 €/m³ gefördert, wobei die Gesamtfördersumme nicht mehr als 30 % der Nettoinvestitionskosten ausmachen darf (KfW 2020: 8).

6.4.3 Bundesförderung effiziente Wärmenetze (Wärmenetzsysteme 4.0)

Die Bundesförderung effiziente Wärmenetze fördert eine vorbereitende Machbarkeitsstudie, sowie den Neubau oder die Transformation eines bestehenden (Teil-) Wärmenetzes zu einem Wärmenetz der 4. Generation. Zusätzlich werden Kooperationen mit Hochschulen und Universitäten sowie Informationsmaßnahmen für die Anwohner gefördert (BMWi 2019: 2f.). Antragsberechtigt sind sowohl Unternehmen, als auch Kommunen, eingetragene Vereine, kommunale Betriebe, eingetragene Genossenschaften und Konsortien (BMWi 2019: 4). Die Bewilligungsbehörde ist das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) (BMWi 2019: 7).

Das Wärmenetz wird als Gesamtsystem gefördert und muss unter anderem folgende Anforderungen erfüllen:

- Ein Mindestanteil von 50 % der jährlichen Wärmeeinspeisung muss aus erneuerbaren Energien oder Abwärme stammen
- Die Mindestnutzungsdauer beläuft sich auf 10 Jahre
- Es müssen mindestens 100 Netzanschlüsse oder zumindest 3 GWh pro Jahr abgenommen werden
- Das Temperaturniveau muss zwischen 20 °C und 95 °C liegen
- Ein saisonaler Großwärmespeicher sollte integriert werden
- Eine Sektorkopplung muss berücksichtigt werden

Dies sind die grundlegenden Kriterien für eine Förderung, jedoch gibt es zu fast jedem Kriterium Ausnahmen (BMWi 2019: 3). Auf die Ausnahmen wird in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen.

Die Machbarkeitsstudie wird mit bis zu 60 % der förderfähigen Ausgaben gefördert, wobei die maximale Fördersumme auf 600.000 € begrenzt ist (BMWi 2019: 5). Die Realisierung eines Wärmenetzes der 4. Generation wird mit bis zu 50 % der förderfähigen Ausgaben gefördert, wobei die maximale Fördersumme 15 Millionen Euro beträgt (BMWi 2019: 6). Das Förderprogramm läuft über den Zeitraum von Dezember 2019 bis Dezember 2022. Es ist nicht gestattet diese Förderung mit einer anderen Förderung zu kumulieren, es sei denn eine andere Förderung bezieht sich nicht auf dieselben förderfähigen Ausgaben (BMWi 2019: 7f.).

7 Untersuchungsgebiet Kreis Borken

Das Untersuchungsgebiet zur Potenzialabschätzung von FSA für Wärmenetze der 4. Generation umfasst den gesamten Kreis Borken. Im Folgenden werden zunächst allgemeine Informationen über den Kreis Borken dargelegt. Anschließend wird näher auf die Wärmeversorgung im Kreis Borken eingegangen.

7.1 Allgemeine Informationen

Der Kreis Borken befindet sich im Westen des Münsterlandes an der deutsch-niederländischen Grenze im Bundesland Nordrhein-Westfalen (vgl. Abbildung 11).

Die geographische Lage des Kreises erstreckt sich von 6°23'12" östlicher Länge bis 7°16'28" östlicher Länge und von 51°43'44" nördlicher Breite bis 52°14'35" nördlicher Breite bei einer maximalen Nord-Süd-Ausdehnung von 57 km und einer West-Ost-Ausdehnung von 61 km (Kreis Borken 2019: o.S.).

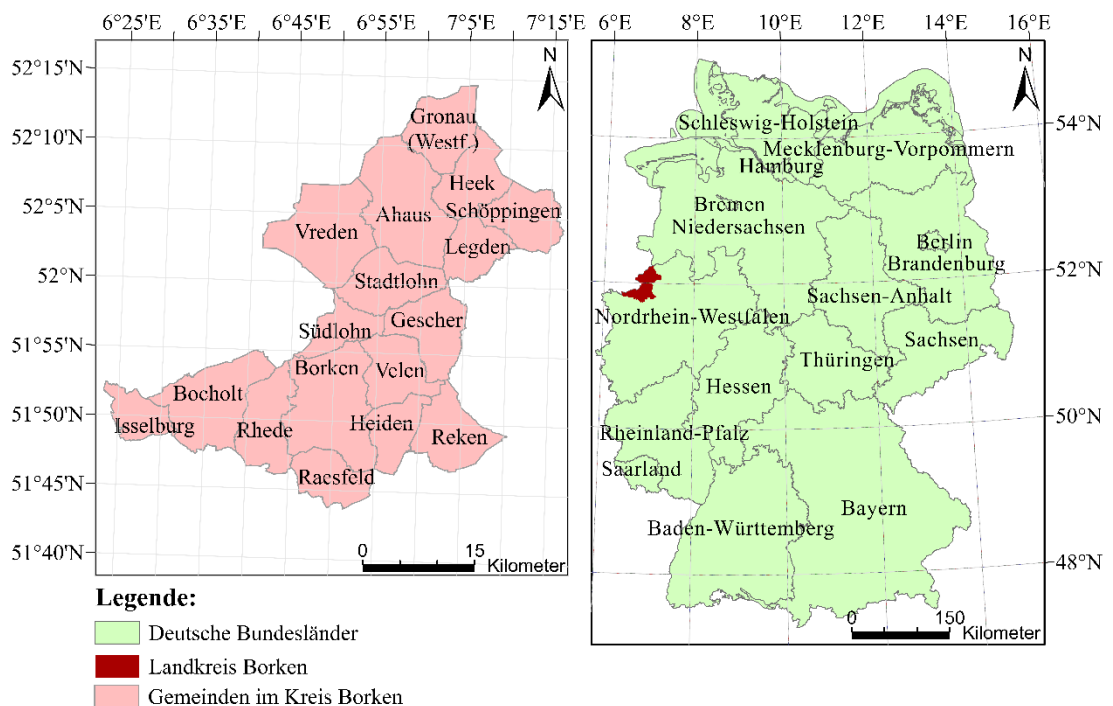


Abbildung 11: Verortung des Kreises Borken (Eigene Darstellung 2020 mit Daten aus: BKG 2020; IT.NRW 2020a) Koordinatensystem: ETRS 1989 UTM Zone 32N

Der Kreis Borken umfasst 17 Gemeinden, von denen Ahaus flächenmäßig am größten und Bocholt am bevölkerungsreichsten ist. Die Gesamtfläche des Kreises liegt bei circa 1421 km² mit einer Gesamtbevölkerung von etwa 370.000 Menschen. Über 64 % der Gesamtfläche wird landwirtschaftlich genutzt. Der Kreis Borken liegt somit deutlich über dem Durchschnitt Nordrhein-Westfalens, welcher bei knapp 47 % liegt. Dies

weist auf eine stark landwirtschaftlich geprägte Region hin (Kreis Borken 2019: o.S.). Der höchste Punkt im Kreis Borken ist der Schöppinger Berg in einer Höhe von 154 m über NHN, der niedrigste Punkt liegt bei 14 m über NHN und liegt in der Gemeinde Isselburg (Kreis Borken 2019: o.S.).

Die Jahresmitteltemperatur in der Klimanormalperiode von 1981 bis 2010 lag im Kreis Borken bei 10,2 °C und die mittlere Niederschlagssumme bei 841mm (LANUV NRW 2020d: o.S.).

In der Abbildung 12 ist sowohl die mittlere Sonnenscheindauer der Klimanormalperiode als auch die mittlere Globalstrahlung dargestellt.

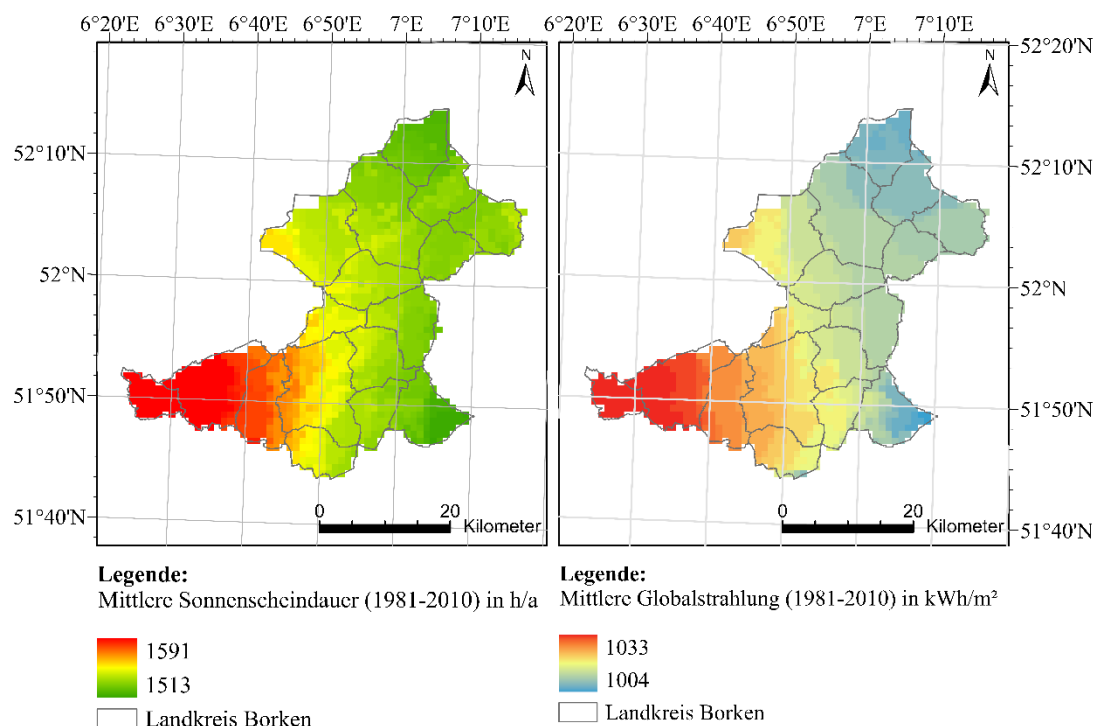


Abbildung 12: Strahlungsdaten der Klimanormalperiode 1981-2010 für den Kreis Borken (Eigene Darstellung mit Daten aus: IT.NRW 2020a; LANUV NRW 2020c) Koordinatensystem: ETRS 1989 UTM Zone 32N

Besonders auffällig ist, dass sowohl die Sonnenscheindauer als auch die Globalstrahlung von West nach Ost abnimmt. Somit weisen die Gemeinden Isselburg, Bocholt und Rhede besonders hohe Einstrahlungswerte auf. In der Klimanormalperiode von 1981 bis 2010 lag der Jahresmittelwert der Globalstrahlung bei 1015 kWh/m² und das bei einer mittleren Sonnenscheindauer von 1540 h/a.

7.2 Wärmeversorgung

Der Endenergieverbrauch im Kreis Borken belief sich laut einer Untersuchung der Fachhochschule Münster im Jahr 2015 auf 9.973 GWh/a, wovon der Bereich Wärme den größten Anteil mit 5.593 GWh/a einnahm (Fachhochschule Münster 2015: o.S.).

Die prozentuale Verteilung des Endenergieverbrauchs im Kreis Borken ist in Abbildung 13 für die Sektoren GHD, Haushalte, Industrie und Verkehr dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass der Endenergiebedarf für Wärme deutlich größer ist als der für Kraftstoff und Strom. Daher sind in diesem Bereich auch enorme Einsparpotenziale vorhanden. In der Studie der Fachhochschule Münster wurden die Effizienzsteigerungs- und Sanierungsmaßnahmen, sowie die Nutzung der Industriellen Abwärme um einen Teil des Wärmebedarfes zu decken, zusammengerechnet. Durch die Umsetzung der Maßnahmen und der Nutzung der Industriellen Abwärme, kann der Endenergiebedarf in den Sektoren Haushalt und Industrie bis 2050 um 36 % auf 3.589 GWh/a gesenkt werden (Fachhochschule Münster 2015: o.S.).

Im Jahr 2012 hatte Erdgas mit über 50 % den größten Anteil am Endenergieverbrauch in Gebäuden, gefolgt von Strom und Heizöl. Der Grund für den hohen Erdgasanteil ist ein gut ausgebautes Erdgasnetz im Kern des Kreises. Des Weiteren wird in den Bereichen ohne Erdgasnetz häufig mit Heizöl geheizt (Lask & Gülker 2014: 20). Der Anteil erneuerbarer Energien im Wärmebereich lag im Jahr 2012 lediglich bei 6 %, hiervon machten Holz und Bionmasse den größten Anteil aus. Solarthermie erreicht lediglich einen Anteil von 0,5 % (Lask & Gülker 2014: 25f.).

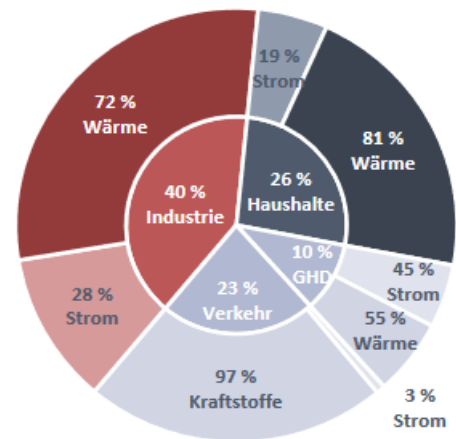


Abbildung 13: Endenergieverbrauch im Kreis Borken nach Sektoren und Endenergieform (Fachhochschule Münster 2015: o.S.)

8 Methodik zur Berechnung der Potenzialflächen

Das Ziel dieser Potenzialabschätzung ist es, mögliche Freiflächen für den Bau von FSA zu identifizieren.

Es werden nur jene Flächen herausgearbeitet, welche den Grundlagen aus den vorhergegangenen Kapiteln nicht widersprechen. Hierfür werden Annahmen für die Berechnung getroffen und im Folgenden dargestellt.

Die Abschätzung des Potenzials wird mithilfe der Geoinformations-Software ArcGIS Pro 2.5 von ESRI durchgeführt. Zusätzlich werden einzelne Arbeitsschritte mit dem Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel aus dem Jahr 2019 vorgenommen.

8.1 Grundlegende Annahmen

Im Folgenden werden grundlegende Annahmen aus den vorhergegangenen Kapiteln herausgearbeitet. Diese sind die Grundlage für die Methodik der Potenzialabschätzung der FSA im Kreis Borken.

Die zu betrachtenden potenziellen Flächen richten sich nach den rechtlichen Rahmenbedingungen aus Kapitel 6. Somit werden nur Brach- und Konversionsflächen, Randstreifen entlang Bundesfernstraßen (Autobahnen, Bundesstraßen) und Schienenwegen, Halden und Deponien betrachtet. Zusätzlich werden Park- und Rastplätze berücksichtigt, da diese vom LEP NRW und vom Regionalplan Münster nicht ausgeschlossen werden und somit ein Potenzial darstellen könnten. Das Park- und Rastplätze ein Potenzial aufweisen können, zeigen bereits realisierte, mit solarthermischen Kollektoren überbaute Parkplätze, wie beispielsweise in Neckarsulm in Baden-Württemberg (Sorensen & Solites 2012: 41f.).

Von den potenziellen Flächen sind alle Flächen ausgeschlossen, welche zu Arten- oder Biotopschutzgebieten, Gewässerschutzgebieten, zu bedeutsamen Kulturlandschaftsbereichen oder den Bereichen zur Sicherung und zum Abbau oberflächennaher Bodenschätze (BSAB) gehören. Als Potenzialfläche gelten weiterhin nur Flächen, welche mindestens mit einer Kollektorfläche von 1000 m² bebaut werden können.

Wie in Kapitel 3 beschrieben, ist eine Berechnung des jährlichen Kollektorertrages nur mit kollektorspezifischen Faktoren, wie dem Konversionsfaktor und den Verlustfaktoren möglich. Des Weiteren schwankt der Ertrag in Abhängigkeit zum Temperaturgradienten ($T_M - T_U$). Da in dieser Arbeit darauf verzichtet wird, sich auf eine

Kollektorbauweise zu beschränken, wird im Folgenden mit einem jährlichen Kollektorertrag von 350 kWh/m² gerechnet. Dieser Wert muss nach den Richtlinien des KfW-Programms Erneuerbare Energien „Premium“ nachgewiesen werden, damit ein Kollektor einer großen Solarthermieanlage sowohl für die Trinkwassererwärmung als auch für die Raumwärmebereitstellung förderfähig ist. Somit wird im Folgenden nicht weiter zwischen den einzelnen Kollektorbauweisen unterschieden. Für die Kollektorfläche gilt vereinfacht, dass ein Quadratmeter Kollektorfläche etwa 3,5 Quadratmeter Grundfläche benötigt (Sorensen 2012: 2).

Die Wärmespeicher werden im 5. Kapitel vorgestellt. Da Aquifer-Wärmespeicher lediglich erschlossen und nicht konstruiert werden können, werden diese im Folgenden nicht weiter berücksichtigt. Um das benötigte Speichervolumen abzuschätzen, wird für die übrigen drei Speichertypen aus dem Kapitel 5 ein Mittelwert aus den angegebenen Wärmespeicherkapazitäten gebildet. So wird ein Mittelwert von 70 kWh/m³ für einen Behälter-Wärmespeicher angenommen. Für Erdbeckenwärmespeicher gilt ein Mittelwert von 40 kWh/m³ und für Erdsonden-Wärmespeicher ein Mittelwert von 30 kWh/m³.

In dieser Arbeit wird ausschließlich das Speichervolumen der drei zu betrachtenden Speicher für jede Potenzialfläche im Kreis Borken berechnet. Eine genaue Bestimmung welcher Wärmespeicher für welche Potenzialfläche besonders geeignet ist, kann in dieser Arbeit nicht geleistet werden, da Wärmespeicher sehr genau geplant werden müssen. Somit kann im Folgenden der Flächenbedarf eines Wärmespeichers nicht in die Berechnung der Potenzialflächen einfließen. Infolgedessen können auch die Wärmeverluste innerhalb eines Wärmespeichers nicht betrachtet werden. Für eine genaue Planung müssen nach (Schmidt & Miedaner 2012: 128) unter anderem, folgende Bedingungen geprüft werden:

- Rechtliche Rahmenbedingungen
- Geologie
- Systemintegration
- Benötigtes Speichervolumen
- Temperaturniveau
- Leistung
- Anzahl an Speicherzyklen im Jahr

Grundlegend für die Potenzialabschätzung der FSA sind die Hotspots, welche im Rahmen des INTERREG-VA-Projekt „Wärme in der Euregio: fokussieren & modernisieren“ (WiE^{fm}) der Fachhochschule Münster als geeignet für eine kollektive

Wärmelösung angesehen werden. Diese Quartiere sind angenähert an die Wärmevorrangzonen in Dänemark. In diesen Gebieten ist ein Wärmenetz technisch und wirtschaftlich sinnvoll. Außerhalb der Hotspots ist ein Wärmenetz nicht ausgeschlossen, muss jedoch genauer geprüft werden (Wetter et al. 2019: 11). Es werden nur Freiflächen betrachtet, die maximal einen Kilometer von diesen Quartieren entfernt beginnen.

Abschließend soll für jeden Wärmehotspot ein CO₂-Einsparpotenzial erhoben werden. Da keine genauen Angaben über die derzeitigen CO₂-Emissionen der Wärmehotspots im Kreis Borken vorliegen, wird zum Vergleich angenommen, dass die Wärmehotspots mit einem Wärmenetze auf Basis einer KWK-Anlage mit einem fossilen Brennstoff versorgt werden. Nach Pfnür et al. lässt sich abschätzen, dass bereits Wärmenetze auf Basis einer KWK-Anlage mit einem fossilen Brennstoff weniger CO₂ ausstoßen als dezentrale Versorgungssysteme (Pfnür et al. 2016: 78). Weiterhin wird angenommen, dass jeweils nur die Potenzialfläche mit dem größten solaren Deckungsgrad in das Wärmenetz des jeweiligen Hotspots einspeisen wird.

8.2 Datengrundlagen

In diesem Kapitel werden die Ausgangsdaten der Potenzialabschätzung kurz beschrieben und ihre Herkunft erläutert. Das Koordinatensystem aller Geodaten, welche für diese Arbeit verwendet werden, ist ETRS 1989 UTM Zone 32N. Des Weiteren wurden einzelne Daten für die Bearbeitung dieser Arbeit vom Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV NRW) bereitgestellt. Diese Daten sind lediglich durch eine Anfrage über das LANUV NRW zu erhalten.

Das Amtliche Topographisch-Kartographische Informationssystem (ATKIS) stammt von OpenGeodata.NRW (IT.NRW 2020a: o.S.). Die ATKIS-Daten liefern die grundlegenden Informationen über die topographischen Objekte wie bspw. Wald-, Acker- oder Siedlungsflächen. Zusätzlich lassen sich hieraus die Verwaltungsgrenzen des Landes Nordrhein-Westfalen und somit die des Kreises Borken entnehmen. Die Daten werden alle drei Jahre Grundlegend aktualisiert. Bedeutende Objekte wie bspw. das Verkehrsnetz werden in jedem Quartal aktualisiert. Die Daten weisen eine Lagegenauigkeit von etwa drei Metern auf und liegen als Shapefile vor (Bezirksregierung Köln 2020b: o.S.).

Ebenfalls liegen die Verwaltungsgrenzen der Bundesrepublik Deutschland auf allen Verwaltungsebenen als Shapefile vor. Diese stammen vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG 2020: o.S.).

Die Gebiete zum Arten- und Naturschutz wurden ebenfalls von OpenGeodata.NRW heruntergeladen. Die Daten stammen aus der Landschaftsinformationssammlung (LINFOS) des Landes Nordrhein-Westfalen. Hierbei handelt es sich um Gebiete nach der Flora-Fauna-Habitate-Richtlinie, Bereiche für den Schutz der Natur, geschützte Biotope nach § 62 Landschaftsgesetz (LG) / § 30 Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG), Nationalparke, Naturschutzgebiete und sonstige Schutzgebiete. Ebenso wurden Vogelschutzgebiete und Wildnisentwicklungsgebiete berücksichtigt (IT.NRW 2020b: o.S.).

Es liegen keine Daten über Brach- und Konversionsflächen im Kreis Borken vor. Dies ist das Ergebnis einer Anfrage an das LANUV NRW und an den Kreis Borken. Obendrein gibt es in Nordrhein-Westfalen keine gesetzliche Pflicht zur Erfassung von Brach- und Konversionsflächen (StGB NRW 2019: o.S.). Jedoch existiert ein Leitfaden zur Erfassung von Brachflächen. Um solche nach dem Leitfaden zu identifizieren, bedarf es einer Vielzahl von Daten (LANUV NRW 2015a: 16–18). Aufgrund des damit verbundenen, hohen Aufwands zur Ermittlung, können Brachflächen in dieser Arbeit nicht betrachtet werden.

Das Digitale Oberflächenmodell (DOM) beschreibt die natürliche Geländeform der Erdoberfläche sowie alles was sich darauf befindet und stammt vom GEOportal.nrw (GEOportal.NRW 2020: o.S.). Das Oberflächenmodell ermöglicht es, Verschattungen, Neigungswinkel und Exposition einer Fläche zu bestimmen. Die Daten wurden zuletzt im Jahre 2015 für den Kreis Borken aktualisiert und liegen als LAS-Dateien vor (Bezirksregierung Köln 2020a: o.S.). Entpackt umfassen die LAS-Dateien 320 Gigabytes, wodurch eine Bearbeitung im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich ist.

Globalstrahlung und Sonnenscheindauer liegen als Raster-Daten mit einer Auflösung von einem Quadratkilometer vor. Für beide kann der langjährige Jahresmittelwert der Klimanormalperiode der Jahre 1981 bis 2010 genutzt werden. Beide Datensätze stammen vom LANUV NRW (LANUV NRW 2020c).

Die Quartiere aus dem Forschungsprojekt WiE^{fm} liegen für das Untersuchungsgebiet vor. Diese sogenannten Hotspots geben den Gesamtwärmebedarf für Raumwärme und

Warmwasser in kWh/a an. (Wetter et al. 2019: 13). Die Datengrundlage stammt aus dem Jahr 2017. Der Jahreswärmebedarf wurde auf Grundlage statistischer Annahmen und der Nutzfläche für jedes Gebäude in dem Untersuchungsgebiet erhoben. Die Ergebnisse wurden auf Baublöcke aggregiert (Wetter et al. 2019: 13f.). Der Datensatz wurde durch das LANUV NRW für die Bearbeitung dieser Arbeit weitergegeben und liegt als Shapefile vor (LANUV NRW 2020e).

Neben diesen Wärmehotspots liegt ein Model des LANUV NRW vor, welches gebäudescharf den absoluten Wärmebedarf je Hausumring in kWh/a (Raumwärme und Warmwasser) für das gesamte Untersuchungsgebiet ausweist. Das Modell wurde zuletzt Anfang 2020 aktualisiert und liegt als Shapefile vor (LANUV NRW 2020b).

8.3 Beschreibung der Methodik

In den folgenden Kapiteln wird die Methodik der Potenzialabschätzung beschrieben. Zur weiteren Dokumentation dienen Ausschnitte aus dem Model Builder von ArcGIS pro 2.5, in welchem die Arbeitsschritte durchgeführt wurden. Zur besseren Lesbarkeit wird bei einer identischen Vorgehensweise für mehrere Layer der Arbeitsschritt anhand eines Beispiels beschrieben und auf die übrigen Datensätze verwiesen. Alle Layer werden in einer File Geodatabase abgespeichert.

8.3.1 Aufbereitung der ATKIS-Daten

Im Folgenden werden aus den ATKIS-Daten die Daten entnommen, welche für die Potenzialabschätzung benötigt werden. Die hierfür erforderlichen Kriterien sind in der Tabelle 1 für jeden Layer aufgeführt.

Der ATKIS-Objektkatalog beschreibt die Daten und deren Kriterien. Daher wird in Tabelle 1 die Seitenzahl angegeben, auf welcher die layerspezifischen Kriterien nachgelesen werden können (AdV 2008: o.S.).

Tabelle 1: Auflistung der ausgewählten ATKIS-Daten (Eigene Darstellung 2020 nach AdV 2008: o.S.)

Gesuchte Fläche	Basis Layer	Objektart_TXT	weiterers Suchkriterium	Neuer Layer Name	Seite im Objektkarten-Katalog
Verwaltungsgrenzen					
Landkreis Borken	geb01_f	AX_KommunalesGebiet	BEZ_KRS=Borken	Landkreis_Borken	S.189
Landwirtschaftliche Nutzflächen und Freiflächen					
Grünland	veg01_f	AX_Landwirtschaft	VEG=1020	Gruenland	S.69f.
Ackerland	veg01_f	AX_Landwirtschaft	VEG=1010	Ackerland	S.69f.
sonstige Landwirtschaft	veg01_f	AX_Landwirtschaft	Alle außer VEG=1020 und VEG=1010	sonstige_Landwirtschaft	S.69f.
Sonstige Freiflächen	veg03_f	AX_Gehoelz/ AX_Heide/ AX_UnlandVegetationsloseflaeche		Sonstige_Freiflaechen	S.72-77
Ausschlussflächen					
Waldgebiet	veg02_f	AX_Wald		Wald	S.71
Fließgewässer	gew01_f	AX_Fliessgewaesser		Fliessgewaesser	S.80
stehendes Gewässer	gew01_f	AX_StehendesGewaesser		stehendes_gewaesser	S.90
Sumpf_Moor	veg03_f	AX_Moor/AX_Sumpf			S.72-77
Siedlung	sie02_f			Siedungsflaechen	
Bahngebäude	ver03_f	AX_Bahnverkehr		Bahngebaeude	S.57
Flughafen	ver04_f	AX_Flugverkehr		Flughafengebaeude	S.63
Schiffsverkehrsgebäude	ver05_f	AX_Schiffsverkehr	gibt es nicht		S.66
Siedungsfläche Gemischter Nutzen	sie02_f	AX_Flaeche_Gemischter_Nutzen		Siedungsflaeche_Gemischter_Nutzen	S.35
Siedungsflächen mit besonderem Nutzen	sie02_f	AX_SportFreizeitUndErholungsflaeche/AX_FlaecheBesondererFunktionalerPraegung/AX_Friedhof		Siedungsflaechen_besondere_Nutzung	S.37-41
Wohnbauflächen	sie02_f	AX_Wohnbauflaechen		Wohnbauflaechen	S.25
Industrie und Gewerbegebiet	sie02_f	AX_IndustrieUndGewerbeflaeche	FKT ist ungleich 2630	Industrie_und_Gewerbe	S.27-29
Tagebau	sie02_f	AX_TagebauGrubeSteinbruch		Tagebau	S33f.
sonstige Straße	ver01_I	AX_Strasse/AX_Strassenachse	WDM=1305; WDM=1307; WDM=9997; WDM=9999	sonstige_Strasse	S.45-50
Potenzialflächen					
Deponie	sie02_f	AX_IndustrieUndGewerbeflaeche	FKT=2630	Deponie	S.28
Parkplätze	ver01_f	AX_Platz	FKT=5310	Parkplatz	S.55
Rastplatz	ver01_f	AX_Platz	FKT=5320	Rastplatz	S.55
Halde	ver01_f		gibt es nicht		
Bundesstraße	ver01_I	AX_Strasse/AX_Strassenachse	WDM=1303	Bundesstrasse	S.45-50
Autobahn	ver01_I	AX_Strasse/AX_Strassenachse	WDM=1301	Autobahn	S.45-50
Bahnstrecke	ver03_I	AX_Bahnstrecke	BKT=1100; BKT=1100#1400 und ZUS=2100	Bahnstrecke	S.59

Die grau hinterlegten Daten in der Tabelle 1 (AX_Halde, AX_Schiffsverkehr) sind im Kreis Borken nicht vorhanden und werden daher nicht weiter betrachtet. Folglich fallen Halden als potenzielle Flächen weg.

Als Erstes müssen die Basis-Layer des ATKIS-Datensatzes auf das Untersuchungsgebiet zurechtgeschnitten werden. Hierzu wird der Kreis Borken aus dem ATKIS-Datensatz über die Spalte „BEZ_KRS“ mit dem Tool „Select“ herausgezogen. In einem weiteren Schritt werden die Basis-Layer mit dem Tool „Clip“ auf das Untersuchungsgebiet zugeschnitten. Die Abbildung 14 zeigt diese Rechenschritte anhand des Beispiels „Landwirtschaft“. Identisch wird mit allen Layern verfahren, die in Tabelle 1 aufgelistet sind.

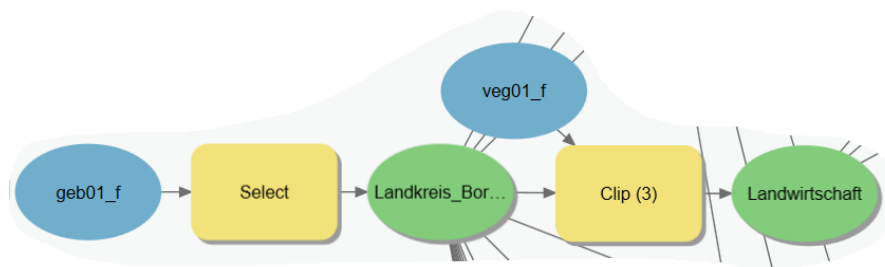


Abbildung 14: Zuschneiden der ATKIS-Layer auf das Untersuchungsgebiet anhand des Beispiels "Landwirtschaft" (Eigene Darstellung 2020)

Um einen Überblick über die Ausgangssituation im Untersuchungsgebiet zu erhalten, werden die Basis-Layer in weitere Unterkategorien gegliedert. Hierzu werden die einzelnen Datensätze über die Attribute „Objektart_TXT“ und falls nötig über ein weiteres Suchkriterium (Bspw. BEZ_KRS, VEG, WDM) mit dem Tool „Select“ ausgewählt (vgl. Abbildung 15). Sowohl die Attribute „Objektart_TXT“ als auch ein potenzielles weiteres Suchkriterium sind layerspezifisch und können in der Tabelle 1 nachgelesen werden.

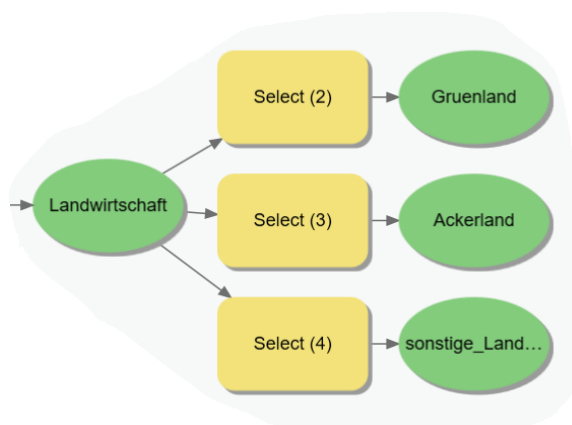


Abbildung 15: Selektion der Layer nach den Informationen aus dem ATKIS-Objektkatalog anhand des Beispiels "Landwirtschaft" (Eigene Darstellung 2020)

Ebenso werden die Bundesfernstraßen und die Bahnstrecken erhoben. Allerdings müssen hier weitere Gegebenheiten betrachtet werden. Straßen oder Bahnstrecken, welche entlang der Kreisgrenze verlaufen, können ein Randstreifenpotenzial aufweisen, welches innerhalb des Kreises liegt, auch wenn der Verkehrsweg selbst nicht in dem Kreis Borken ist. Daher wird der Kreis Borken mit dem Tool „Buffer“ um 500 m gepuffert. Sowohl die Bahnstrecken als auch die Straßennetze werden auf dieses erweiterte Kreisgebiet über das Tool „Clip“ zugeschnitten. In einem darauffolgenden Schritt werden die Bundesfernstraßen aus dem Straßennetz selektiert. Zu den Bundesfernstraßen gehören sowohl Autobahnen als auch Bundesstraßen. Die übrigen Straßen werden ebenfalls selektiert. Diese Arbeitsschritte sind in Abbildung 16 dargestellt.

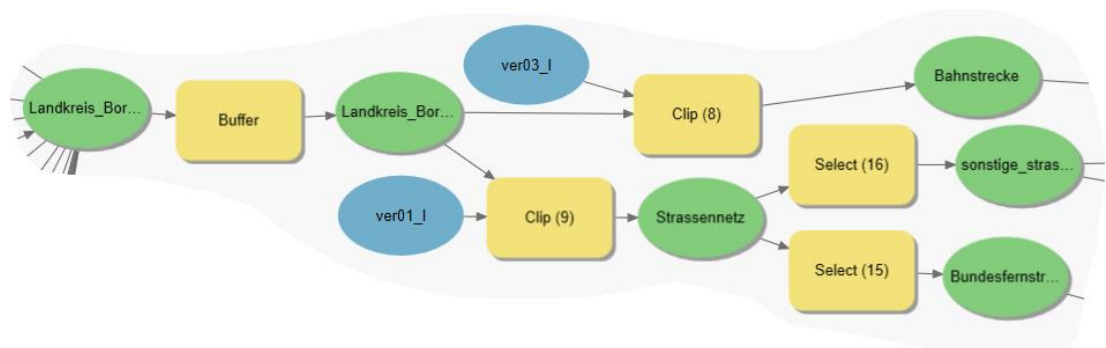


Abbildung 16: Aufbereitung der Verkehrswege im Kreis Borken (Eigene Darstellung 2020)

8.3.2 Umwandlung der Verkehrswege in Polygone-Features

Straßennetz und Bahnstrecken liegen als Linien-Features vor. Damit ein Randstreifenpotenzial ermittelt werden kann, bedarf es einer Umwandlung in Polygone-Features, welche die Fahrbahnbreite der Verkehrswege darstellen. Zusätzlich können FSA nicht auf Straßen oder Schienenwegen errichtet werden, weshalb die Fahrbahnbreite ebenfalls als Ausschlussfläche gilt.

Die Fahrbahnbreite steht in der Attributtabelle in der Spalte „BRF“. Einzelne Features weisen in dieser Spalte den Code „-9998“ auf. Für diese Features liegt keine Fahrbahnbreite vor. Der Wert in der Spalte „BRF“ gibt die gesamte Fahrbahnbreite an. Um die Linien-Features in Polygone-Features umzuwandeln, muss ein Puffer in der Größe der gesamten Fahrbahnbreite um die Linien gelegt werden. Da der Puffer zu allen Seiten gleich breit ist, muss der „BRF“-Wert halbiert werden, damit die Fahrbahnbreite am Ende nicht doppelt so breit ist wie angegeben (AdV 2008: 51). Für Features ohne angegebene Fahrbahnbreite wird ein Wert von 2,5 m und somit eine gesamte Fahrbahnbreite von 5 m angenommen. Aus diesem Grund wird das Beispiel „sonstige_strasse“

über das Tool „Select“ in die sonstigen Straßen mit einer angegebenen Fahrbahnbreite und die ohne angegebene Fahrbahnbreite unterteilt (vgl. Abbildung 17).

Für die Layer mit angegebener Fahrbahnbreite wird über das Tool „Add Field“ die Spalte „BRF_H“ der Attributtabelle hinzugefügt. Die Spalte wird mit dem Tool „Calculate Field“ berechnet, indem die Spalte „BRF“ mal 0,5 gerechnet wird. Für die sonstigen Straßen ohne angegebene Fahrbahnbreite wird ebenfalls über das Tool „Add Field“ die neue Spalte „Buffer_angenommen“ hinzugefügt und über „Calculate Field“ berechnet. Der angenommene Wert liegt bei 2,5 m.

Danach werden beide Layer über die neu angehängten Spalten gepuffert und die Puffer werden über die Option „Dissolve Type“ des Tools „Buffer“ direkt zusammengefasst. Abschließend werden beide Layer über das Tool „Merge“ zu dem Layer „sonstige_strassen_breite_all“ zusammengefasst. Die Rechenschritte sind in Abbildung 17 aufgeführt.

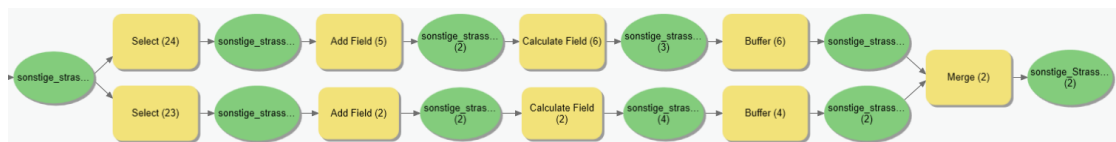


Abbildung 17: Berechnung der Fahrbahnbreite anhand des Beispiels „sonstige_strasse“ (Eigene Darstellung 2020)

Für die Bundesfernstraßen ergibt sich nach einem händischen Abgleich in ARGIS pro, dass die Features, bei denen keine Fahrbahnbreite angegeben ist, lediglich die Mittellinie der beiden Fahrbahnen der Bundesfernstraßen darstellen. Somit liegt für alle Fahrbahnen der Bundesfernstraßen eine Fahrbahnbreite vor. Deshalb werden die Features, welche ungleich „BRF= -9998“ sind, selektiert. Die Features ohne Fahrbahnbreite werden nicht weiter betrachtet.

Auch für die Bundesfernstraßen wird die Fahrbahnbreite über die Tools „Add Field“ und „Calculate Field“ neu berechnet. Darauffolgend werden über das Tool „Select“ die Autobahnen (WDM=1301) und die Bundesstraßen (WDM=1303) selektiert. Abschließend werden diese um die neu berechnete Fahrbahnbreite gepuffert. Nun liegen beide Layer „Autobahn_Breite“ und „Bundesstrasse_Breite“ als Polygone-Feature vor.

Die Bahnstrecken werden ebenfalls mit dem Tool „Select“ aus dem Basis-Layer herausgezogen. Wichtig ist hierbei, dass die Zusatzangabe „ZUS=2100“ ausgeschlossen wird, Dieser Zusatz weist auf stillgelegte Bahnstrecken hin. Ein händischer Abgleich

zeigt, dass die Features mit diesem Zusatz im Untersuchungsgebiet ausschließlich stillgelegte Bahnbrücken sind, welche für die Potenzialabschätzung irrelevant sind.

Da keine Fahrbahnbreite für die Bahnstrecken vorliegt, wird ebenfalls eine Breite von 5 m bzw. 2,5 m pro Seite angenommen und mit den Tools „Add Field“ und „Calculate Field“ berechnet. Anschließend werden die Bahnstrecken um diesen Wert gepuffert.

8.3.3 Aufbereitung der Arten- und Naturschutzgebiete

Die Arten- und Naturschutzgebiete wurden mit dem Tool „Clip“ auf das Untersuchungsgebiet zurechtgeschnitten und anschließend mit dem Tool „Merge“ zu dem neuen Layer „Schutzgebiete“ zusammengefasst. Die Aufbereitung der Schutzgebiete ist in Abbildung 18 dargestellt. Es werden nur die Schutzgebiete aus der LINFOS berücksichtigt. Bei diesem Schritt ist zu beachten, dass keine Nationalparks im Kreis Borken vorhanden sind.



Abbildung 18: Zuschneiden der Schutzgebiete auf den Kreis Borken und Zusammenfassen in einem Layer (Eigene Darstellung 2020)

8.3.4 Berechnung der Ausschlussflächen

Die Ausschlussflächen sind alle Flächen, welche aufgrund der rechtlichen Vorgaben oder der derzeitigen Nutzung der Fläche, für eine solarthermische Freiflächenanlage ungeeignet sind. In der folgenden Auflistung werden einzelne Ausschlussflächen mit einem „X“ markiert. Bei diesen Flächen handelt es sich um Vegetations- oder Gebäudeflächen, welche aufgrund ihrer Höhe eine potenzielle Fläche verschatten können. Deshalb werden die markierten Ausschlussflächen über das Tool „Merge“

zusammengefasst und über das Tool „Buffer“ um 20 m gepuffert, um potenziell verschattete Flächen im Folgenden auszuschließen. Der Pufferwert von 20 m ist abgeleitet aus der Potentialstudie Erneuerbare Energien NRW Teil 2 – Solarenergie des LANUV NRW (LANUV NRW 2013: 61). Hierbei können keine Himmelsrichtungen berücksichtigt werden, weshalb die Flächen auch in südliche Richtung gepuffert werden, obwohl in dieser keine Verschattung möglich ist.

Welche Flächen im Kreis Borken als Ausschlussflächen gelten, werden im Folgenden aufgelistet:

- Fließgewässer
- Stehende Gewässer
- Flughafengebäude (X)
- Bahngelände (X)
- Industrie- und Gewerbeflächen (X)
- Tagebaugelände (X)
- Siedlungsgebiete mit einem gemischten Nutzen (X)
- Siedlungsgebiete mit einem besonderen Nutzen (bspw. Sport- und Freizeiteinrichtungen) (X)
- Wohnbauflächen (X)
- Schutzgebiete (X)
- Waldgebiete (X)
- Moor- und Sumpfgebiete (X)
- Sonstige Straßen
- Autobahnen
- Bundesstraßen
- Bahnstrecken

Die markierten Ausschlussflächen werden als neuer Layer „Ausschlussflächen_Buffer_20m“ abgespeichert.

Danach wird der Layer „Ausschlussflächen_Buffer_20m“ mit den übrigen Ausschlussflächen und den Deponie-, Parkplatz- und Rastplatzflächen zusammengefasst.

Die Deponie-, Parkplatz- und Rastplatzflächen werden zu den Ausschlussflächen gezählt, um zu vermeiden, dass bei der Berechnung der Randstreifenpotenziale entlang der Verkehrswege (Bundesstraßen, Autobahnen und Bahnstrecken) Flächen doppelt erfasst werden.

Alle Ausschlussflächen werden mit dem Tool „Merge“ zu einem Layer zusammengefasst und um die Datenlast zu minimieren mit dem Tool „Dissolve“ komprimiert.

8.3.5 Berechnung der potenziellen Flächen

Da im Rahmen dieser Arbeit eine Erhebung der Brach- und Konversionsflächen nicht möglich ist, und keine Halden im Kreis Borken vorhanden sind. Liegt der Fokus dieser Potenzialabschätzung auf den potenziellen Freiflächen entlang der Bundesfernstraßen und Autobahnen, Deponien, sowie der Rast- und Parkplätze.

Deponien, Park- und Rastplätze werden aus den ATKIS-Daten erhoben (siehe Kapitel 8.3.1). Zu beachten ist, dass alle Deponien im Kreis Borken sillgelegt sind, weshalb sie als potenzielle Flächen in Frage kommen (EGW 2020: o.S.).

Es ist auszuschließen, dass sowohl Deponien als auch Rast- und Parkplätze auf Verkehrswegen oder auf stehenden oder fließenden Gewässern errichtet wurden. Daher werden im Folgenden lediglich die gepufferten Ausschlussflächen mit diesen potenziellen Flächen verschnitten, um Verschattungen auszuschließen. Dies erfolgt über das Tool „Erase“.

Für die Potenzialflächen entlang der Bundesstraßen, Autobahnen und Bahnstrecken, gilt es zu beachten, dass die FSA nach dem Regionalplan Münster in einer Entfernung von maximal 110 m von dem Rand der Verkehrswege entfernt aufgebaut werden dürfen. Von diesen 110 m ist eine Bauverbotszone entlang der Verkehrswege von 40 m an Autobahnen, 20 m an Bundesstraßen und 10 m an Bahnstrecken auszuschließen. Die Randflächenpotenziale entlang Autobahnen, Bundesstraßen und Bahnstrecken wurden unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Bauverbotszonen identisch erhoben. Im Folgenden werden die Arbeitsschritte exemplarisch für die Randstreifen entlang Bundesstraßen erläutert. Der Ablauf der Arbeitsschritte ist in Abbildung 19 und Abbildung 20 dokumentiert.

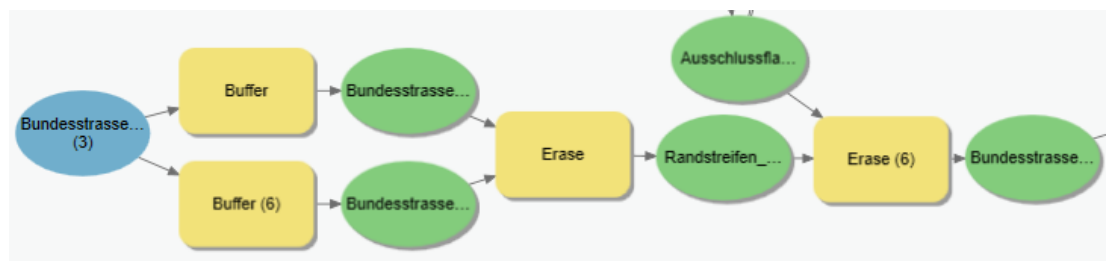


Abbildung 19: Ermittlung der potenziellen Flächen entlang Bundesstraßen Teil 1 (Eigene Darstellung 2020)

Zunächst werden mit dem Tool „Buffer“ zwei Puffer um die Bundesstraßen gelegt, welche einmal 20 m und einmal 110 m breit sind. Die Puffer werden über die Auswahl „Dissolve Type“ im Tool „Buffer“ direkt zusammengefasst. Danach wird mit dem

Tool „Erase“ von dem 110 m Puffer die 20 m Bauverbotszone ausgeschnitten. Übrig bleiben die Flächen, welche theoretisch entlang der Bundesstraßen für den Bau von FSA genutzt werden können. Mit dem Tool „Erase“ werden von den theoretischen Potenzialflächen, die Ausschlussflächen ausgeschnitten, so dass nur jene Flächen verbleiben, welche gegen keine rechtlichen Vorgaben verstoßen.

Über das Tool „Multipart to Singlepart“ werden die Flächen zu einer Fläche zusammengefasst, welche sich räumlich berühren oder überschneiden.

Zusätzlich wird eine weitere Spalte mit dem Namen „Klasse“ der Attributtabelle hinzugefügt. Sowohl für Bundesstraßen als auch für Autobahnen und Bahnstrecken wird in der Spalte „Klasse“ mit dem Tool „Calculate Field“ ein „V“ eingetragen. Das „V“ steht für Verkehrsflächen und ermöglicht im Folgenden eine Unterteilung zwischen den unterschiedlichen Potenzialflächen. Daher wird dieser Schritt für die Deponien, sowie Park- und Rastplätze ebenfalls durchgeführt. Für Deponien steht in der Spalte „Klasse“ ein „D“, für Rastplätze ein „R“ und für Parkplätze ein „P“.



Abbildung 20: Ermittlung der potenziellen Flächen entlang Bundesstraßen Teil 2 (Eigene Darstellung 2020)

Abschließend werden alle Potenzialflächen mit dem Tool „Merge“ zu einem Layer zusammengeführt und mit dem Tool „Dissolve“ komprimiert. Dieser Schritt dient dazu, alle Potenzialflächen in einem Layer zusammenzufassen und die Datenmenge zu reduzieren.

Zuletzt müssen die Potenzialflächen auf den Kreis Borken zurechtgeschnitten werden, da wie in Kapitel 8.3.1, beschrieben, Bundesfernstraßen und Bahnstrecken noch bis zu 500 m außerhalb des Kreises mit einbezogen wurden. Dieser Schritt ist notwendig, da lediglich potenzielle Flächen, welche innerhalb des Kreises liegen, analysiert werden. Abschließend werden die Potenzialflächen, welche sich berühren oder überschneiden mit dem Tool „Multipart to Singlepart“ zusammengefasst.

Eine Unterteilung in die zuvor eingeführten Klassen bleibt weiterhin möglich (vgl. Abbildung 21).

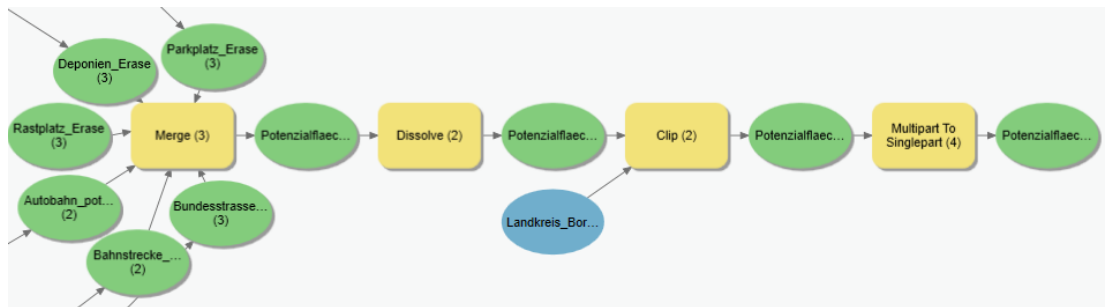


Abbildung 21: Zusammenfassen der Potenzialflächen zu einem Layer (Eigene Darstellung 2020)

8.3.6 Neuberechnung der Wärmehotspots

Um das Potenzial solarthermischer Freiflächenanlagen im Kreis Borken zu ermitteln, bedarf es neben den potenziell möglichen Flächen auch Quartiere, welche durch ein Wärmenetz versorgt werden können.

Im Folgenden werden die Hotspots aus dem Forschungsprojekt WiE^{fm} mit den Daten des gebäudescharfen Wärmebedarfsmodells des LANUV NRW verschnitten. Somit kann im Folgenden mit den aktuellsten Daten für den Wärmebedarf im Kreis Borken gearbeitet werden.

In einem ersten Schritt werden sowohl die Hotspots als auch die Hausumringe mit dem Tool „Clip“ auf den Kreis Borken zurechtgeschnitten. Aus dem Wärmebedarfsmodell des LANUV NRW werden alle Gebäude selektiert, die einen Wärmebedarf aufweisen. Denn in dem Datensatz sind beispielsweise Garagen oder Ställe enthalten, welche keine Wärme benötigen und somit für diese Arbeit irrelevant sind. Diese Auswahl erfolgt mit dem Tool „Select“ über die Spalte „WB_HU“, die den Wärmeverbrauch pro Hausumring und Jahr angibt. Alle Werte, welche größer als null kWh/a sind, werden damit selektiert.

In einem nächsten Schritt werden beide Layer miteinander verschnitten. Dies geschieht über das Tool „Spatial Join“ mit der Match-Option „Contains“. Das bedeutet, dass alle Hausumringe des Wärmekatasters mit dem Hotspot-Layer verbunden werden, wenn die Hausumringe vollständig innerhalb der Hotspots liegen. Somit wird verhindert, dass Hausumringe, welche durch den Hotspot-Layer zerschnitten werden, mit in die Berechnung einfließen. Dieser Schritt ist notwendig, da die Daten für die Hotspots von WiE^{fm} auf Blockebene aggregiert wurden. Des Weiteren wird die Spalte „WB_HU“ summiert. Somit liegt für jeden Hotspot im Kreis Borken ein Wärmebedarf

nach WiE^{fm} und ein neuerrechner Wärmebedarf unter Berücksichtigung des Bedarfsmodells des LANUV NRW vor. Hierzu wird in dem Tool „Spatial Join“ die „Join Option“ „Join One to One“ verwendet. Im Folgenden wird mit den aktuelleren Daten des LANUV NRW weitergearbeitet.

Als letztes wird dem Layer „Hotspot_Join“ mit dem Tool „Calculate Field“ die Spalte „Hotspot_Code“ angehängt. Dadurch ist eine eindeutige Zuordnung der Hotspots möglich. Der „Hotspot_Code“ ist gleich der „OBJECTID“ des Layers „Hotspot_Join“. Die Neuberechnung des Wärmebedarfs ist in Abbildung 22 dargestellt.

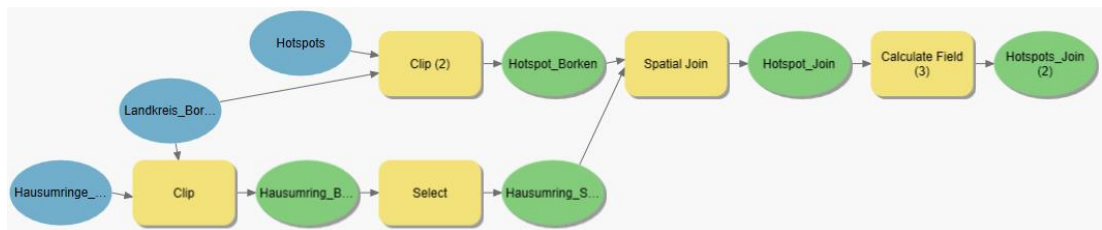


Abbildung 22: Neuberechnung der Wärmehotspots (Eigene Darstellung 2020)

8.3.7 Berechnung des Freiflächenpotenzials

Nun liegen sowohl die neu berechneten Wärmebedarfe der Hotspots als auch die potenziellen Flächen innerhalb des Untersuchungsgebietes vor, so dass die Freiflächenpotenziale errechnet werden können.

Zunächst wird über das Tool „Generate Near Table“ für jede potenzielle Fläche die Entfernung zu jedem Hotspot berechnet, wenn die Distanz zwischen potenzieller Fläche und Hotspots weniger als einen Kilometer beträgt. Das Tool berechnet die kürzeste Entfernung der beiden Polygone zueinander. Es lässt sich erkennen, dass mehrere Flächen innerhalb eines Radius von einem Kilometer zu verschiedenen Hotspots liegen.

In einem zweiten Schritt wird die erstellte Tabelle mit dem Layer der potenziellen Flächen über das Tool „Add Join“ verbunden. Ebenso wird die Attributtabelle des Layers „Hotspot_Join“ über das Tool „Add Join“ an den Layer der potenziellen Flächen angehängt. Beide Schritte sind vonnöten, damit alle Informationen, welche für die Berechnung der Freiflächenpotenziale wichtig sind, in einer Tabelle zusammengeführt werden.

Danach werden aus dieser zusammengefassten Tabelle alle Flächen herausselektiert, welche in einer Entfernung von maximal einem Kilometer zu mindestens einem Hotspot liegen. Somit fallen alle Flächen heraus, welche eine größere Entfernung aufweisen.

Abschließend wird die Tabelle über das Tool „Table to Excel“ in eine Excel Tabelle exportiert, so dass die weiteren Berechnungen in Excel durchgeführt werden können. Diese Arbeitsschritte sind in Abbildung 23 dargestellt.

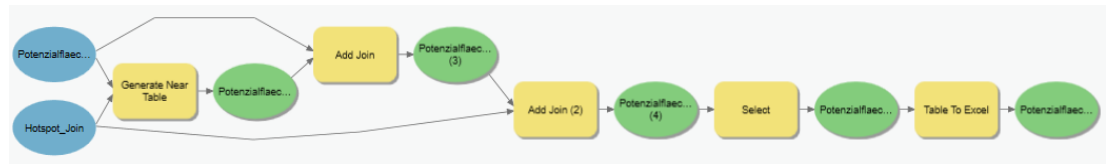


Abbildung 23: Berechnung der Distanz zwischen potenziellen Flächen und Hotspots (Eigene Darstellung 2020)

8.3.8 Berechnung des jährlichen Wärmeertrags pro Fläche

Zunächst wird der jährliche Wärmeertrag der potenziellen Flächen berechnet. Hierzu wird als Erstes die gesamte Fläche durch 3,5 geteilt. Denn wie in Kapitel 8.1 angenommen, benötigt ein Quadratmeter Kollektorfläche etwa 3,5 m² Grundfläche. Diese Fläche wird im Folgenden Kollektorfläche (K_f [m²]) genannt. Die Gesamtfläche ist identisch mit der Spalte „Shape Area“ (A_{land} ; A_l [m²]), welche von ArcGIS pro für die einzelnen potenziellen Flächen angegeben ist. Die Formel hierfür lautet also:

$$\text{Formel: } K_f = \frac{A_l}{3,5}$$

In einem weiteren Schritt wird die Kollektorfläche mit dem in Kapitel 8.1 angenommenen jährlichen Kollektorertrag von 350 kWh/m² multipliziert. Das Ergebnis ist der abgeschätzte jährliche Wärmeertrag ($Q_{solar, output}$; Q_s [kWh/a]) einer solarthermischen Freiflächenanlage. Das Ergebnis liegt für jede potenzielle Fläche vor.

8.3.9 Berechnung der Transportverluste

Als Nächstes müssen die Trassenverluste berechnet werden. Als Trassenverluste ist die Wärmeenergie zu verstehen, welche durch den Wärmetransport von einer FSA zu einem Hotspot verloren geht.

Die Wärmeverluste beim Transport ($Q_{pipe, loss}$; Q_p [%]) sind abhängig von der Gesamtfläche (A_l), der Trassenlänge ($D_{location}$; D_l [m]) und vom Wärmeertrag der Fläche (Q_s [kWh/a]). Die Trassenlänge ist die Entfernung der jeweiligen Potenzialfläche vom Hotspot.

Zunächst können mit der im Folgenden aufgeführten Formel und der Gesamtfläche die Wärmeverluste in Prozent bei einer Trassenlänge von einem Kilometer bestimmt werden (Nielsen & Battisti 2012: 25).

$$\text{Formel: } Qp = \frac{350}{Al} + \frac{0,24}{\sqrt{Al}}$$

Anschließend werden die Wärmeverluste (Qp) mit dem jährlichen Wärmeertrag der Fläche (Qs [kWh/a]) multipliziert und für die Trassenlänge (DI) berechnet. Somit liegen nun für jede Fläche die Trassenverluste in Abhängigkeit vom Wärmeertrag und der Trassenlänge ($Qpds$ [kWh/a]) vor. Die Formel hierfür lautet:

$$\text{Formel: } Qpds = \left(\frac{Qp * Qs}{1000} \right) * DI$$

In einem letzten Schritt können die Trassenverluste ($Qpds$) von dem Wärmeertrag der Fläche (Qs) abgezogen werden. Somit liegt nun der Wärmeertrag der potenziellen Flächen vor, welche den jeweiligen Hotspot erreicht (Qsh [kWh/a]). Der Wärmeertrag von sehr kleinen Freiflächen ist nach dieser Rechnung bereits negativ. Diese kleinen Flächen sind somit nicht für den Bau einer FSA geeignet.

8.3.10 Berechnung des solaren Deckungsgrades

Der solare Deckungsgrad (Sf [%]) ist der prozentuale Anteil der gesamten produzierten Wärme ($Q_{total; production}$; Qtp [kWh/a]) innerhalb eines Wärmenetzes, welche durch eine FSA bereitgestellt wird. Es wird angenommen, dass jeder Hotspot zu 100 % durch ein Wärmenetz gedeckt werden soll. Somit ist die insgesamt zu produzierende Wärme für das jeweilige Wärmenetz identisch mit dem gesamten Wärmebedarf des Hotspots (Qbh [kWh/a]). In diesem Fall wird mit dem Wärmeertrag der potenziellen Flächen nach Abzug der Trassenverluste gerechnet (Qsh). Die Formel hierfür lautet nach (Nielsen & Battisti 2012: 27):

$$\text{Formel: } Sf = \frac{Qsh}{Qbh} * 100$$

Für die folgenden Rechenschritte ist zu beachten, dass einzelne Potenzialflächen theoretisch einen solaren Deckungsgrad von über 100 % aufweisen können. Das bedeutet auf diesen Potenzialflächen kann mehr Wärmeenergie bereitgestellt werden, als in den jeweiligen Hotspots benötigt wird.

8.3.11 Bestimmung des Flächen-Hotspot-Indikators

Da sich in der Tabelle alle Flächen befinden, welche innerhalb eines Kilometers von einem oder mehreren Hotspots entfernt liegen, muss in einem weiteren Schritt entschieden werden, zu welchem Hotspot eine potenzielle Fläche eindeutig zugewiesen wird. Durch diesen Schritt wird vermieden, dass eine Potenzialfläche zu mehreren

Hotspots zugewiesen wird und somit die Potenzialfläche mehrfach gezählt wird. Dennoch ist es möglich, dass mehrere Potenzialflächen einem Hotspot zugeordnet werden. Hierzu wird ein Indikator entwickelt, welcher sich zu 90 % aus der Distanz zwischen Fläche und Hotspot und zu 10 % aus dem solaren Deckungsgrad ergibt. Das heißt in den meisten Fällen wird eine Fläche dem am nächsten gelegenen Hotspot zugewiesen. In Einzelfällen sind mehrere Hotspots annähernd gleich weit von einer potenziellen Fläche entfernt. In solchen Fällen entscheidet der höchste solare Deckungsgrad zu welchem Hotspot die Fläche zugewiesen wird.

Zunächst werden die solaren Deckungsgrade auf einer Skala zwischen 0 und 1 genormt. Hierzu wird der solare Deckungsgrad einer Fläche (S_f) durch den maximalen solaren Deckungsgrad des Untersuchungsgebietes (S_{fmax} [%]) geteilt. Der maximale solare Deckungsgrad liegt bei gerundeten 1046 %. Daraus ergibt sich ein Code (SD_{Code}) mit einem Werteintervall zwischen 0 und 1. Je größer der solare Deckungsgrad ist, desto größer ist der SD_{Code} .

$$\text{Formel: } SD_{Code} = \frac{S_f}{S_{fmax}}$$

Ähnlich wird der Code für die Distanz ($Distanz_{Code}$) auf ein Werteintervall zwischen 0 und 1 genormt. Es gilt, je größer der Code ist, desto kleiner ist die Distanz zwischen der potenziellen Fläche und dem Hotspot. Als maximale Distanz werden 1000 m angenommen, da weiter entfernte Flächen nicht betrachtet werden.

$$\text{Formel: } Distanz_{Code} = 1 - \left(\frac{DI}{1000}\right)$$

Abschließend werden die beiden Codes SD_{Code} und $Distanz_{Code}$ gewichtet und in einem Index zusammengefasst.

$$\text{Formel: } Index = Distanz_{Code} * 0,9 + SD_{Code} * 0,1$$

Folglich ist es über den Index möglich, für jede Fläche ein Hotspot auszuwählen, welcher nach diesen Kriterien am besten passt.

Dies erfolgt in Excel über eine Wenn-Funktion. Die ausgewählten potenziellen Flächen werden in der neu angelegten Spalte „Flächenauswahl“ mit einer 1 gekennzeichnet. Die Flächen, welche nach diesem Index als nicht geeignet angesehen werden, sind in der Spalte „Flächenauswahl“ mit einer null gekennzeichnet. Da einzelne kleinere potenzielle Freiflächen bereits einen negativen oder sehr kleinen solaren

Deckungsgrad aufweisen, erhalten alle Flächen mit einem solaren Deckungsgrad von unter 0,5 % einen Indexwert von null. Infolgedessen können diese sehr kleinen Flächen aussortiert werden.

Als nächstes wird die in Excel bearbeitete Tabelle mit dem Tool „Excel to Table“ zurück in ArcGIS pro transferiert. Weiterhin wird diese Tabelle über das Tool „Add Join“ an die Attributtabelle des Layers „Potenzialflaeche_Distanz_duplikat“ angehängen. Der Layer „Potenzialflaechen_Distanz_duplikat“ ist identisch mit dem Layer „Potenzialflaechen_Distanz“, dessen Attributtabelle die Ausgangstabelle für die Berechnungen in Excel war. Dieser Layer wurde lediglich kopiert, um Fehler zu vermeiden.

Daraufhin werden alle Flächen mit dem Tool „Select“ aus dem Layer „Potenzialflaechen_Distanz_duplikat“ ausgewählt, welche die folgenden Kriterien erfüllen:

- „Index“ > 0
- „Flaechenwahl“ = 1
- „Kollektorfläche“ > 1000 m²

Abschließend werden die Flächen über das Tool „Spatial Join“ auf die 17 Gemeinden des Kreises Borken aggregiert. Da sich einzelne Potentialflächen über Gemeindegrenzen hinweg erstrecken, wird als Match-Option „Have their center in“ ausgewählt. Die Potenzialflächen werden so der Gemeinde zugewiesen, in welcher diese hauptsächlich liegen. Zusätzlich wird die Attributtabelle über das Tool „Table to Excel“ zurück in Excel transferiert, um die weiteren Berechnungen durchzuführen, sowie Tabellen und Graphiken, für die in Kapitel 9 aufgeführten Ergebnisse, zu erstellen (vgl. Abbildung 24).

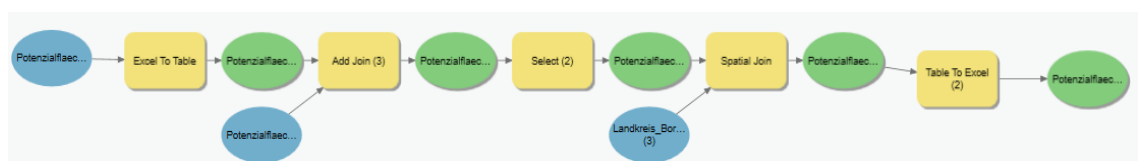


Abbildung 24: Übertragung der Daten in ArcGIS pro (Eigene Darstellung 2020)

8.3.12 Berechnung des Speichervolumens

Wie in Kapitel 8.1 beschrieben, wird lediglich das Speichervolumen von Behälter-, Erdbecken-, und Erdsonden-Wärmespeicher abgeschätzt.

Das Speichervolumen lässt sich über die Speicherkapazität der Wärmespeicher und den Wärmeertrag der Potenzialfläche nach Abzug der Trassenverluste (Qsh)

berechnen. Es werden folgende Speicherkapazitäten für die unterschiedlichen Wärmespeicher angenommen:

- Behälter-Wärmespeicher 70 kWh/m³
- Erdbecken-Wärmespeicher 40 kWh/m³
- Erdsonden-Wärmespeicher 30 kWh/m³

Auf einzelnen Potenzialflächen, könnte eine FSA mehr Wärme erzeugen als die zugewiesenen Wärmehotspots benötigen. Da es nicht effizient wäre, mehr Wärme zu erzeugen, als benötigt wird, wird für diese Potenzialflächen mit einem solaren Deckungsgrad $\geq 100\%$, mit dem Wärmebedarf des zugewiesenen Hotspots gerechnet. Für die Potenzialflächen mit einem solaren Deckungsgrad von $< 100\%$, wird mit dem Wärmeertrag der Fläche nach Abzug der Trassenverluste gerechnet (Q_{sh}). Diese Werte werden in eine neue Spalte „Qsh_Speicher“ über eine Wenn-Funktion berechnet. Dieser Wärmeertrag wird durch die oben aufgelisteten Speicherkapazitäten geteilt. Die Ergebnisse stellen die theoretischen Speichervolumen dar und liegen für alle drei Wärmespeichertypen in m³ vor. Zu beachten ist, dass mit dem Wärmeertrag gerechnet wurde, welcher an dem zugewiesenen Hotspot ankommt und nicht mit dem potenziellen Wärmeertrag der Potenzialfläche.

8.3.13 Berechnung des CO₂-Einsparpotenzials

Das CO₂-Einsparpotenzial für Raumwärme und Warmwasser durch Wärmenetze, welche zumindest anteilig durch eine FSA mit Wärme versorgt werden, wird im Folgenden abgeschätzt. Hierfür wird angenommen, dass alle Hotspots im Kreis Borken durch ein Nahwärmenetz versorgt werden. Für das CO₂-Einsparpotenzial gilt, dass alle Hotspots durch eine KWK-Anlage auf Basis eines fossilen Brennstoffes mit Wärme versorgt werden. Eine solche konventionelle Wärmeerzeugung weist einen CO₂-Emissionsfaktor von 158 g/kWh auf (Pfnür et al. 2016: 71). Um zu berechnen wie hoch die theoretischen CO₂-Emissionen auf Basis dieser konventionellen Wärmeerzeugung ($E_{CO_2, \text{fossile}} [g/a]$) sind, wird der CO₂-Emissionsfaktor mit dem gesamten Wärmebedarf multipliziert.

$$\text{Formel: } E_{CO_2, \text{fossile}} = Q_b * 158$$

Um das mögliche CO₂-Einsparpotenzial zu errechnen, muss von den theoretischen CO₂-Emissionen ($E_{CO_2, \text{fossile}}$), der prozentuale Anteil abgezogen werden, welcher durch eine FSA abgedeckt werden kann. Dies ist möglich, da der CO₂-Emissionsfaktor

von Solarthermie gleich 0 g/kWh ist (Kirchner et al. 2015: 11f.). Weiterhin wird für die Einschätzung des CO₂-Einsparpotenzials mit der FSA gerechnet, welche den höchsten solaren Deckungsgrad (SF_{max} [%]) aufweist.

$$\text{Formel: } E_{CO_2; solar} = E_{CO_2; fossile} * SF_{max}$$

Potenzialflächen mit einem solaren Deckungsgrad von über 100 % können theoretisch den gesamten Hotspot mit Wärmeenergie versorgen. Daher entspricht in solchen Fällen das CO₂-Einsparpotenzial, den gesamten Emissionen des Wärmenetzes auf Basis einer KWK-Anlage mit fossilen Brennstoffen.

9 Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Potenzialabschätzung der FSA für Wärmenetze der 4. Generation im Kreis Borken dargelegt. Hierzu wird zunächst erläutert, für welche Hotspots ein Flächenpotenzial existiert. Abschließend wird für jede Gemeinde die Potenzialflächen ausgewiesen und deren solarer Deckungsgrad sowie die CO₂-Einsparpotenziale aufgeführt.

9.1 Wärmehotspots

Es konnten insgesamt 88 Wärmehotspots in dem Kreis Borken erfasst werden, welche die Voraussetzungen erfüllen durch ein Wärmenetz mit Wärmeenergie versorgt zu werden.

Für insgesamt 57 Hotspots konnte mindestens eine Freifläche ermittelt werden, welche für eine FSA als geeignet angesehen wird. Die grün markierten Hotspots in Abbildung 25 sind solche, für die mindestens eine Potenzialfläche erfasst werden konnte. Für die übrigen 31 Hotspots konnten keine Potenzialflächen ermittelt werden. Diese sind in Abbildung 25 rot markiert.

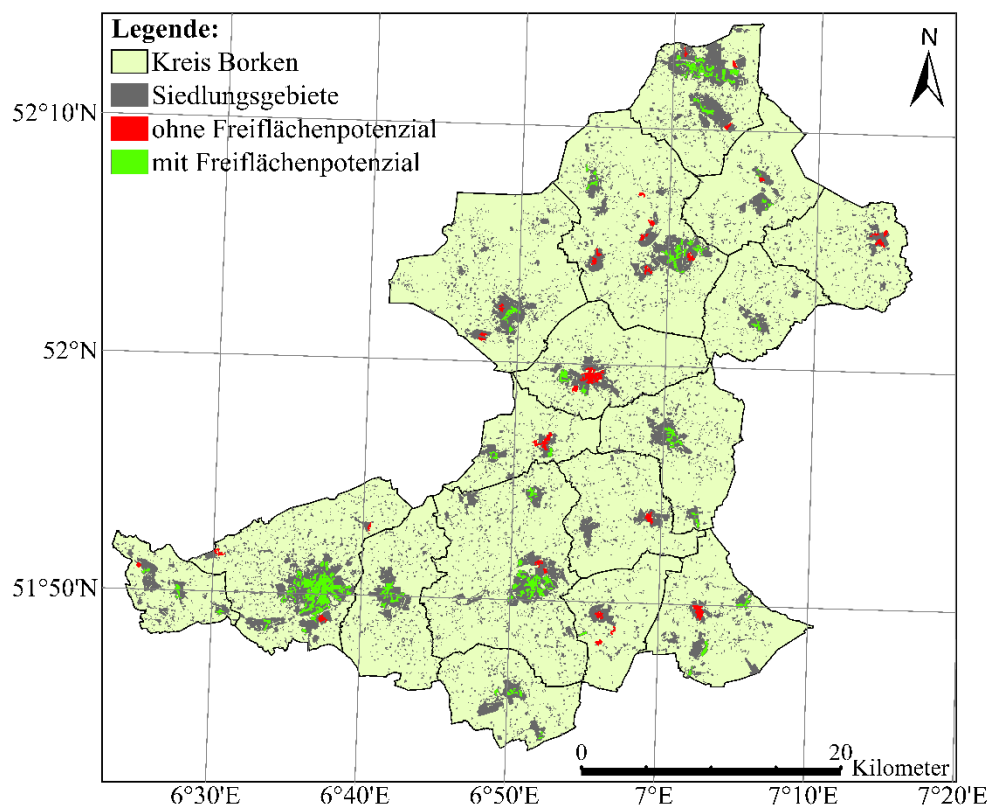


Abbildung 25: Wärmehotspots im Kreis Borken (Eigene Darstellung mit Daten aus: IT.NRW 2020a, 2020b; LANUV NRW 2020b, 2020e) Koordinatensystem: ETRS 1989 UTM Zone 32N

In der folgenden Tabelle werden die Hotspots nach den 17 Gemeinden des Kreises Borken gruppiert. Für die Hotspots der rot markierten Gemeinden konnten keine Potenzialflächen ermittelt werden. Es ergibt sich, dass in den Gemeinden Schöppingen und Velen keine Hotspots mit einer FSA versorgt werden können. Somit lässt sich in 15 Gemeinden mindestens ein Hotspot durch eine FSA versorgen (vgl. Tabelle 2).

Tabelle 2: Wärmehotspots im Kreis Borken nach Gemeinden untergliedert (Eigene Darstellung 2020)

Gemeinde	Hotspots ohne FSA-Potenzial	Hotspots mit FSA-Potenzial	Gesamtanzahl der Hotspots
Ahaus	7	7	14
Bocholt	3	10	13
Borken	2	7	9
Gescher	0	2	2
Gronau (Westf.)	3	8	11
Heek	1	3	4
Heiden	3	1	4
Isselburg	1	3	4
Legden	0	1	1
Raesfeld	0	4	4
Reken	1	3	4
Rhede	0	2	2
Schöppingen	3	0	3
Stadtlohn	2	2	4
Südlohn	1	2	3
Velen	1	0	1
Vreden	3	2	5
Gesamtanzahl:	31	57	88

9.2 Gesamtwärmebedarf

Der Gesamtwärmebedarf im Kreis Borken für Raumwärme und Warmwasser ist in Abbildung 26 dargestellt und beläuft sich insgesamt auf 4.622 GWh/a. Der Wärmebedarf der Hotspots mit Freiflächenpotenzial beläuft sich auf 1.074 GWh/a. Das sind circa 23 % des Gesamtwärmebedarfs. Der übrige Teil des Gesamtwärmebedarfs teilt sich einerseits auf die Hotspots auf, für welche keine Freiflächenpotenziale ermittelt werden konnten und andererseits auf die Gebäude, welche außerhalb der Hotspots liegen.

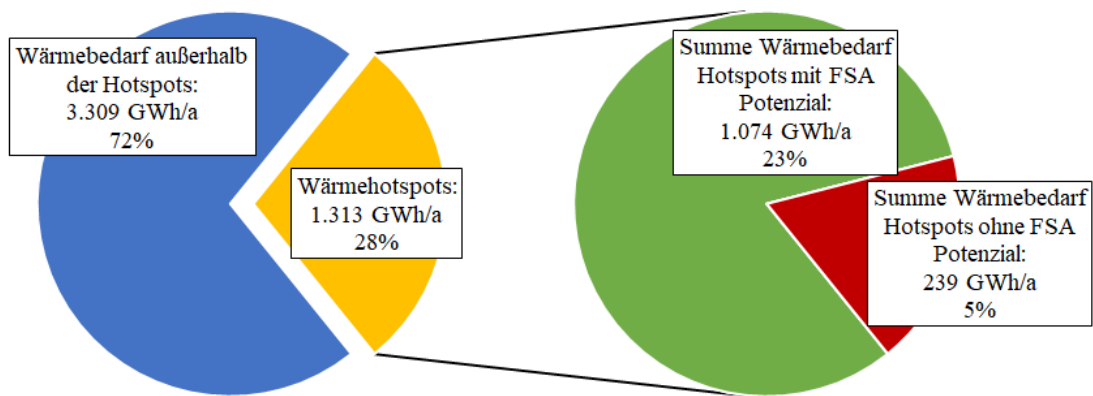


Abbildung 26: Gesamtwärmebedarf für Raumwärme und Warmwasser in GWh/a im Kreis Borken (2020) (Eigene Darstellung 2020)

Werden alle 88 Hotspots im Kreis Borken durch ein Wärmenetz auf Basis einer KWK-Anlage mit fossilem Brennstoff versorgt, liegen die jährlichen CO₂-Emissionen bei 207.457 T/a. Durch das Einbinden der größtmöglichen Solarthermieanlage in das jeweilige Wärmenetz, würden die CO₂-Emissionen aller Hotspots im Kreis Borken um 21 % auf circa 163.639 T/a abnehmen. Das entspricht einem Einsparpotenzial von circa 44.000 T/a.

9.3 Freiflächenpotenziale

In dem gesamten Kreis Borken konnten 323 Potenzialflächen für den Bau einer solarthermischen Freiflächenanlage erfasst werden. Alle Potenzialflächen zusammen weisen einen potenziellen Wärmeertrag von knapp 1.077 GWh/a auf. Die durchschnittliche Entfernung zwischen Wärmehotspot und Potenzialfläche liegt bei 423,5 m. Ein Großteil des Wärmeertrags der Potenzialflächen konnte entlang der Verkehrswege (Bundesstraßen, Autobahnen und Bahnstrecken) ermittelt werden. Insgesamt wurden etwa 96 % aller Potenzialflächen entlang der Verkehrswege erfasst. In Abbildung 27 sind die Wärmeerträge der Potenzialflächen nach der Flächenart dargestellt.

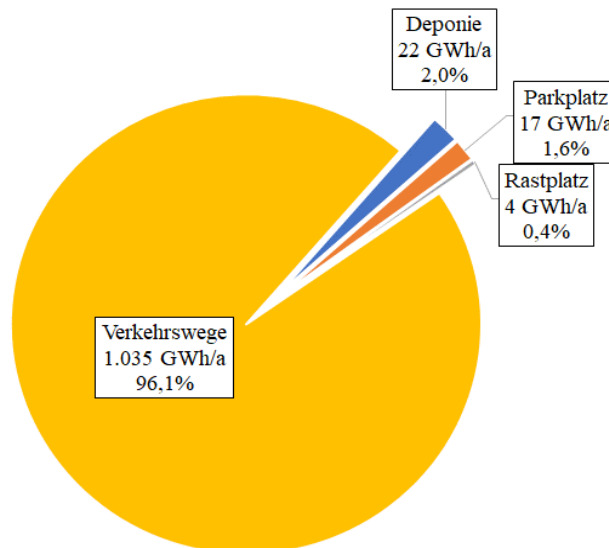


Abbildung 27; Wärmeertrag der FSA nach der Flächenart in MWh/a (Eigene Darstellung 2020)

Es wurden zwei Potenzialflächen auf Deponien sowie zwei auf Rastplätzen und 14 auf Parkplätzen ermittelt. In Abbildung 28 ist die Anzahl der Potenzialflächen für jede Gemeinde im Kreis Borken dargestellt.

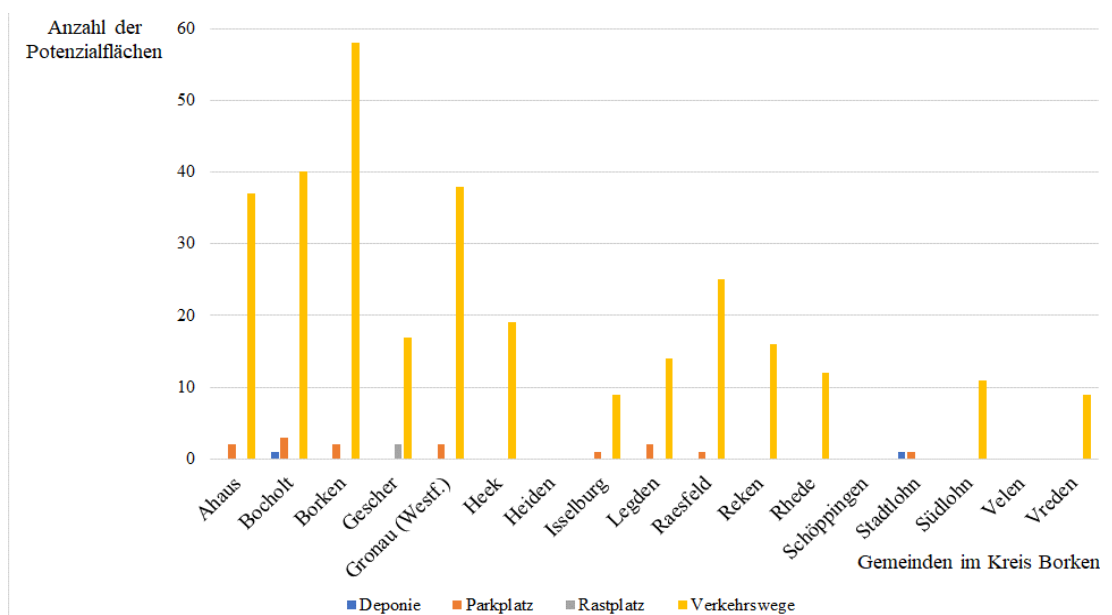


Abbildung 28: Anzahl des FSA-Potenzials nach den Gemeinden und den Flächentypen im Kreis Borken (Eigene Darstellung 2020)

In den folgenden Abbildungen 29 bis 43 werden die FSA-Potenziale der 15 Gemeinden dargestellt, in denen mindestens ein Hotspot versorgt werden kann. Die Potenzialflächen sind in den Abbildungen lagegenau verzeichnet. Die Freiflächenpotenziale werden nach dem solaren Deckungsgrad gruppiert dargestellt, also dem solaren Anteil des Gesamtwärmebedarfes des zugewiesenen Hotspots. Es ist zu beachten, dass zu den Hotspots mehrere Potenzialflächen zugewiesen werden konnten, aber eine

Potenzialfläche nicht zu mehreren Hotspots zugewiesen wurde. Die Darstellung des solaren Deckungsgrades erfolgt auf den Potenzialflächen von unter 10 % (gelb) bis über 100 % (dunkelrot). Zusätzlich werden die Hotspots in dunkelgrau dargestellt, wenn ein FSA-Potenzial vorliegt und in hellgrau, wenn keine Potenzialflächen ermittelt wurden. Weiterhin wird in den Tabellen 3 bis 17 das solarthermische Potenzial für die jeweiligen Hotspots der Gemeinden beschrieben. Es werden lediglich jene Hotspots betrachtet, für welche mindestens eine Potenzialfläche ermittelt wurde.

Das CO₂-Einsparpotenzial wurde, wie in Kapitel 8.3.13 beschrieben, errechnet. Die Ergebnisse der Gemeinden sind dahingehend zu verstehen, dass wenn ein Hotspot theoretisch zu über 100 % durch eine FSA mit Wärmeenergie versorgt werden kann, die gesamten CO₂-Emissionen des Wärmehotspots eingespart werden können.

9.3.1 Ahaus

In der Gemeinde Ahaus konnten insgesamt 40 Potenzialflächen für sieben Wärmehotspots ermittelt werden. Die Potenzialflächen sind in der Abbildung 29 klassifiziert nach dem solare Deckungsgrad dargestellt.

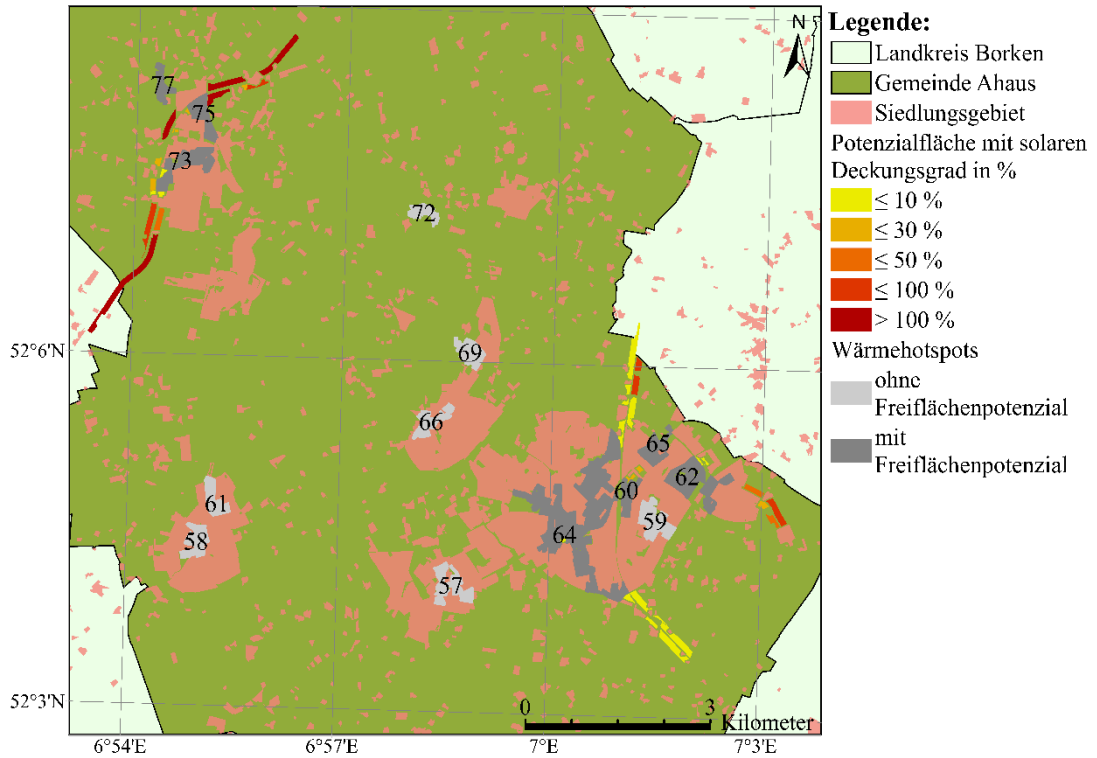


Abbildung 29: Potenzialflächen in der Gemeinde Ahaus (Eigene Darstellung 2020 mit Daten aus: IT.NRW 2020a, 2020b; LANUV NRW 2020b, 2020e) Koordinatensystem: ETRS 1989 UTM Zone 32N

Die Potenzialflächen wurden jeweils genau einem Hotspot zugewiesen, so kann das Potenzial solarthermischer Freiflächenanlagen für jeden Hotspot in der Gemeinde Ahaus aus der Tabelle 3 abgelesen werden. Es konnten solare Deckungsgrade bis zu 724 % ermittelt werden. Der solarthermische Wärmeertrag der Potenzialflächen liegt zwischen 356 MWh/a und 16.223 MWh/a. Insgesamt können 4.359 T/a CO₂ durch die Potenzialflächen mit dem größtmöglichen solaren Deckungsgrad eingespart werden.

Tabelle 3: Potenzial solarthermischer Freiflächenanlagen in der Gemeinde Ahaus (Eigene Darstellung 2020)

Ahaus	Wärmebedarf (Q _b) in MWh/a	Potenzialflächen	solarthermischer Wärmeertrag (Q _{sh}) in MWh/a			solarer Deckungsgrad (SF) in %			CO ₂ -Einsparpotenzial in T/a
			Gesamt	Min.	Max.	Gesamt	Min.	Max.	
Hotspot	Jahr 2020	Anzahl							
60	2.878	2	1.354	662	692	47	23	24	109
62	6.108	6	11.534	462	4.631	189	8	76	732
64	72.296	14	33.074	368	6.890	46	1	10	1.089
65	3.199	2	4.686	1.730	2.956	146	54	92	467
73	8.590	8	29.768	481	16.223	347	6	189	1.357
75	3.300	7	19.287	356	7.033	584	11	213	521
77	533	1	3.861	3.861	3.861	724	724	724	84
Gesamt:	96.905	40	103.563	356	16.223		1	724	4.359

9.3.2 Bocholt

In der Gemeinde Bocholt konnten insgesamt 45 Potenzialflächen für zehn Wärmehotspots berechnet werden. Diese sind in der Abbildung 30 nach dem solaren Deckungsgrad klassifiziert dargestellt.

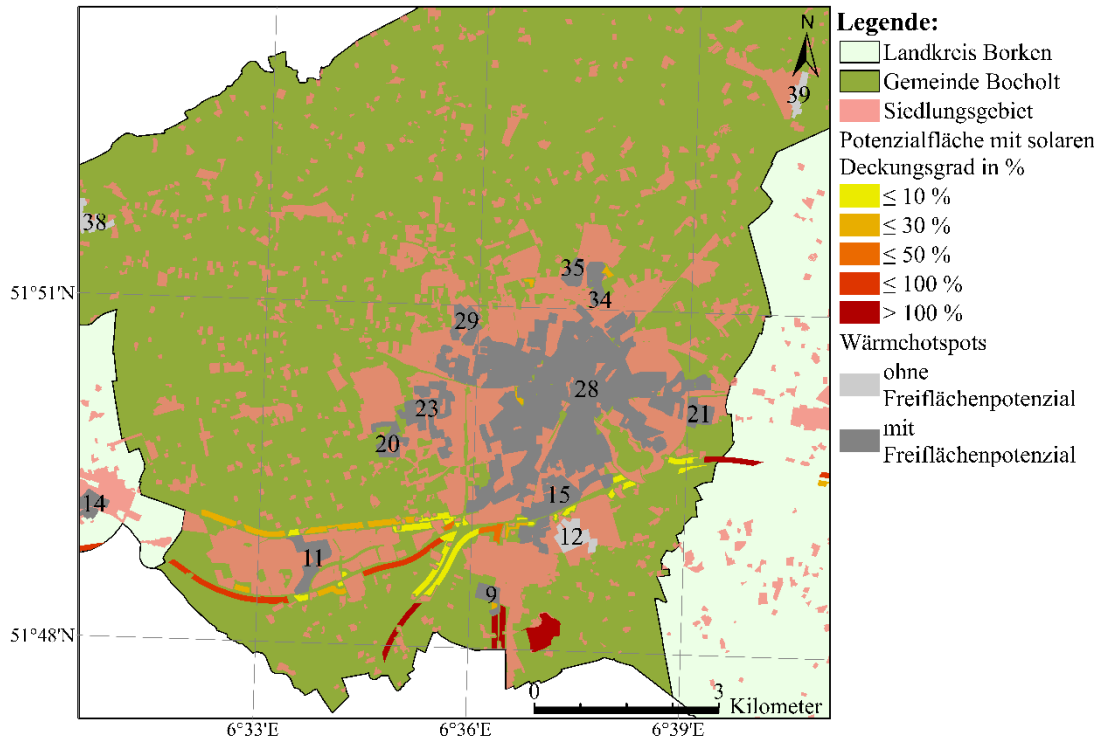


Abbildung 30: Potenzialflächen in der Gemeinde Bocholt (Eigene Darstellung 2020 mit Daten aus: IT.NRW 2020a, 2020b; LANUV NRW 2020b, 2020e) Koordinatensystem: ETRS 1989 UTM Zone 32N

Das Potenzial der FSA wird in der Tabelle 4 für jeden Wärmehotspot in der Gemeinde Bocholt dargestellt. Der solarthermische Wärmeertrag der Potenzialflächen liegt in der Gemeinde Bocholt zwischen 406 MWh/a und 20.859 MWh/a. Weiterhin erreichen die Potenzialflächen einen solaren Deckungsgrad von bis zu 618 %. Die Potenzialflächen mit dem größten solaren Deckungsgrad weisen zusammen ein CO₂-Einsparpotenzial von 7.482 T/a auf.

Tabelle 4: Potenzial solarthermischer Freiflächenanlagen in der Gemeinde Bocholt (Eigene Darstellung 2020)

Bocholt	Wärmebedarf (Q _b) in MWh/a	Potenzialflächen	solarthermischer Wärmeertrag (Q _{sh}) in MWh/a			solarer Deckungsgrad (SF) in %			CO ₂ -Einsparpotenzial in T/a
			Gesamt	Min.	Max.	Gesamt	Min.	Max.	
Hotspot	Jahr 2020	Anzahl							von SF _{max}
9	3.377	6	42.483	711	20.859	1.258	21	618	533
11	20.707	13	65.180	439	18.564	315	2	90	2.933
15	16.422	9	13.001	406	5.500	79	2	33	869
20	5.838	2	2.245	883	1.362	38	15	23	215
21	5.193	1	7.930	7.930	7.930	153	153	153	821
23	15.688	1	854	854	854	5	5	5	135
28	318.110	10	39.404	1.638	8.664	12	1	3	1.369
29	8.200	1	1.048	1.048	1.048	13	13	13	166
34	14.547	1	1.618	1.618	1.618	11	11	11	256
35	4.542	1	1.175	1.175	1.175	26	26	26	186
Gesamt:	412.623	45	174.938	406	20.859		1	618	7.482

9.3.3 Borken

Für die Gemeinde Borken konnten 54 Potenzialflächen für mögliche FSA erfasst werden. Des Weiteren können sieben Wärmehotspots durch mindestens eine Potenzialfläche versorgt werden. Die Potenzialflächen sind, gegliedert nach ihrem solaren Deckungsgrad, in der Abbildung 31 dargestellt.

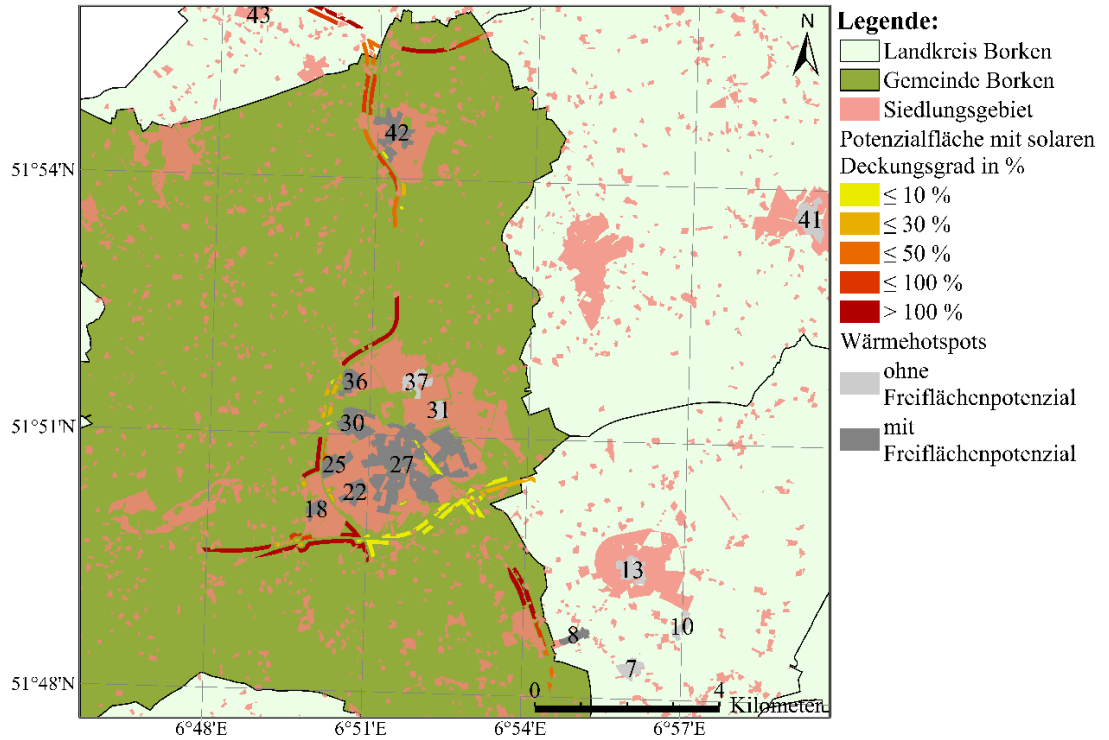


Abbildung 31: Potenzialflächen in der Gemeinde Borken (Eigene Darstellung 2020 mit Daten aus: IT.NRW 2020a, 2020b; LANUV NRW 2020b, 2020e) Koordinatensystem: ETRS 1989 UTM Zone 32N

Das Potenzial der FSA wird in der Tabelle 5 für jeden Wärmehotspot beschrieben. Der solarthermische Wärmeertrag der Potenzialflächen liegt zwischen 384 MWh/a und 15.743 MWh/a. Des Weiteren kann in der Gemeinde Borken ein solarer Deckungsgrad von bis zu 435 % errechnet werden.

Insgesamt können 6.478 T/a CO₂ durch die Potenzialflächen mit dem höchsten solaren Deckungsgrad eingespart werden.

Tabelle 5: Potenzial solarthermischer Freiflächenanlagen in der Gemeinde Borken (Eigene Darstellung 2020)

Borken	Wärmebedarf (Q _b) in MWh/a	Potenzialflächen	solarthermischer Wärmeertrag (Q _{sh}) in MWh/a			solarer Deckungsgrad (SF) in %			CO ₂ -Einsparpotenzial in T/a
			Gesamt	Min.	Max.	Gesamt	Min.	Max.	
Hotspot	Jahr 2020	Anzahl	Gesamt	Min.	Max.	Gesamt	Min.	Max.	von SF _{max}
18	3.623	9	41.263	384	15.743	1.139	11	435	572
22	5.929	3	8.495	441	6.384	143	7	108	937
25	7.298	3	12.828	1.072	9.501	176	15	130	1.153
27	99.006	19	54.107	497	10.412	55	1	11	1.645
30	14.713	3	3.864	415	1.736	26	3	12	274
36	4.590	7	21.562	432	10.647	470	9	232	725
42	12.488	10	45.589	482	7.411	365	4	59	1.171
Gesamt:	147.646	54	187.708	384	15.743		1	435	6.478

9.3.4 Gescher

In der Gemeinde Gescher wurden zwei Wärmehotspots ermittelt. Für beide Hotspots konnten insgesamt 19 Potenzialflächen erfasst werden, welche in der Abbildung 32 klassifiziert nach dem solaren Deckungsgrad dargestellt sind.

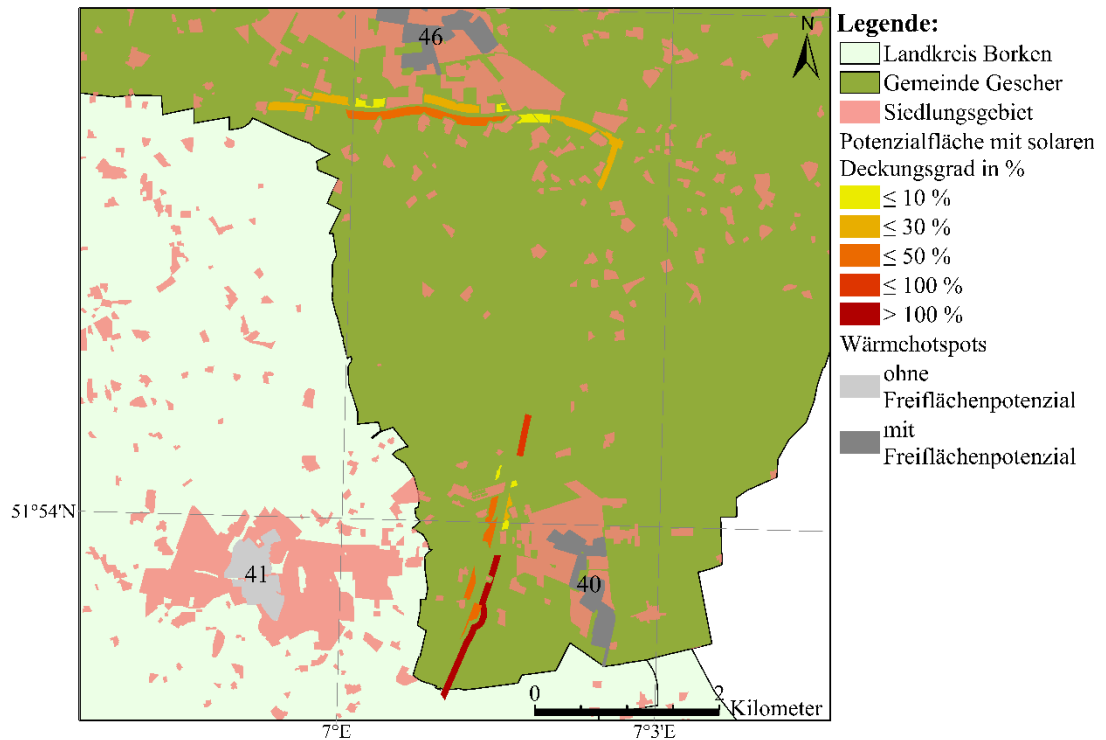


Abbildung 32: Potenzialflächen in der Gemeinde Gescher (Eigene Darstellung 2020 mit Daten aus: IT.NRW 2020a, 2020b; LANUV NRW 2020b, 2020e) Koordinatensystem: ETRS 1989 UTM Zone 32N

In der Tabelle 6 werden die Potenziale der FSA für beide Wärmehotspots näher dargestellt. Der solarthermische Wärmeertrag der 19 Potenzialflächen liegt zwischen 376 MWh/a und 13.696 MWh/a. Zudem erreichen die Potenzialflächen einen solaren Deckungsgrad von bis zu 185 %. Das CO₂-Einsparpotenzial liegt für beide Hotspots bei insgesamt 3.132 T/a.

Tabelle 6: Potenzial solarthermischer Freiflächenanlagen in der Gemeinde Gescher (Eigene Darstellung 2020)

Gescher	Wärmebedarf (Q _b) in MWh/a	Potenzialflächen	solarthermischer Wärmeertrag (Q _{sh}) in MWh/a			solarer Deckungsgrad (SF) in %			CO ₂ -Einsparpotenzial in T/a
			Gesamt	Min.	Max.	Gesamt	Min.	Max.	
Hotspot	Jahr	Anzahl							von SF _{max}
40	2020	10	24.777	376	11.311	404	6	185	968
46	35.860	9	41.351	723	13.696	115	2	38	2.164
Gesamt:	41.988	19	66.128	376	13.696		2	185	3.132

9.3.5 Gronau (Westf.)

Für die Gemeinde Gronau (Westf.) konnten insgesamt 40 Potenzialflächen für acht Wärmehotspots erfasst werden. Die Potenzialflächen sind klassifiziert nach dem solaren Deckungsgrad in der Abbildung 33 dargestellt.

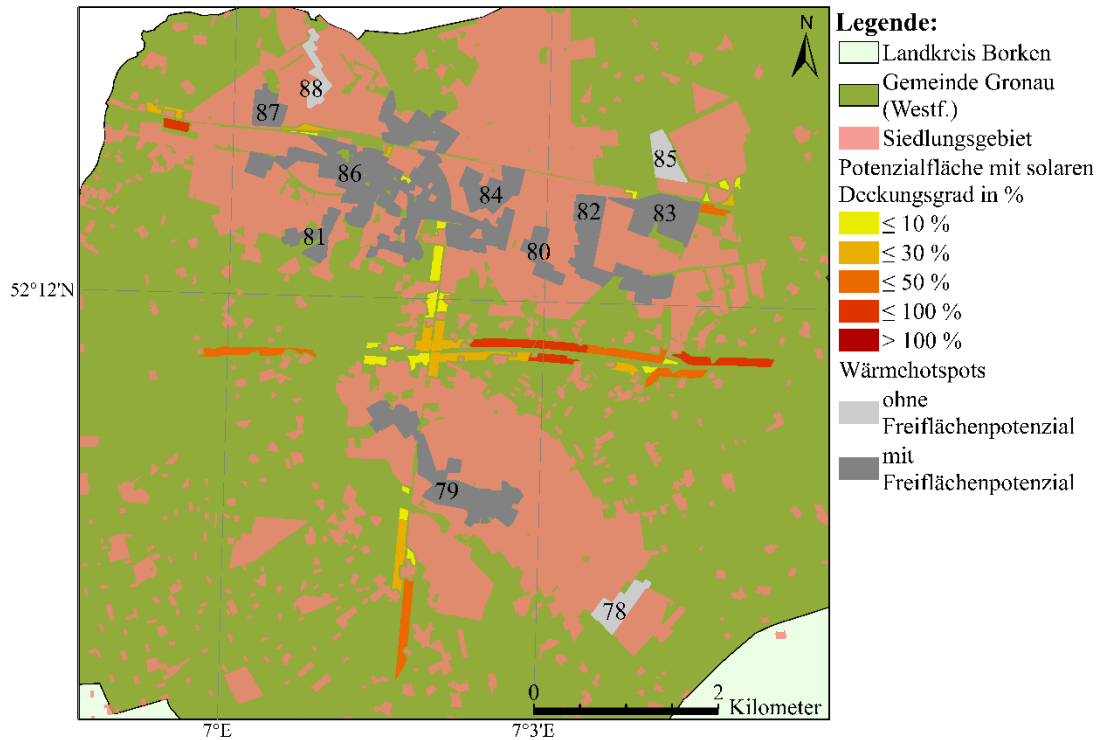


Abbildung 33: Potenzialflächen in der Gemeinde Gronau (Westf.) (Eigene Darstellung 2020 mit Daten aus: IT.NRW 2020a, 2020b; LANUV NRW 2020b, 2020e) Koordinatensystem: ETRS 1989 UTM Zone 32N

In der Tabelle 7 werden die Potenziale der solarthermischen Freiflächenanlagen für die jeweiligen Hotspots beschrieben. Es ergibt sich, dass der solarthermische Wärmeertrag der Freiflächen zwischen 337 MWh/a und 9.604 MWh/a liegt. Des Weiteren erreichen die solarthermischen Freiflächen einen solaren Deckungsgrad von bis zu 92 %. Das CO₂-Einsparpotenzial der Potenzialflächen mit dem größten solaren Deckungsgrad liegt in der Gemeinde Gronau (Westf.) bei 5.414 T/a.

Tabelle 7: Potenzial solarthermischer Freiflächenanlagen in der Gemeinde Gronau (Westf.) (Eigene Darstellung 2020)

Gronau (Westf.)	Wärmebedarf (Q _b) in MWh/a	Potenzialflächen	solarthermischer Wärmeertrag (Q _{sh}) in MWh/a			solarer Deckungsgrad (SF) in %			CO ₂ -Einsparpotenzial in T/a
			Hotspot	Jahr 2020	Anzahl	Gesamt	Min.	Max.	
	25.644	14	49.771	445	9.604	194	2	37	1.517
	6.595	3	14.868	3.812	6.078	225	58	92	960
	1.667	1	342	342	342	21	21	21	54
	17.535	6	25.591	528	8.914	146	3	51	1.408
	6.661	6	5.293	372	2.505	79	6	38	396
	7.478	1	337	337	337	5	5	5	53
	82.363	4	8.139	671	3.728	10	1	5	589
	4.992	5	6.611	386	2.758	132	8	55	436
Gesamt:	152.933	40	110.952	337	9.604		1	92	5.414

9.3.6 Heek

In der Gemeinde Heek konnten drei Wärmehotspots ermittelt werden, welche ein solarthermisches Freiflächenpotenzial aufweisen. Für diese Hotspots konnten insgesamt 18 Potenzialflächen erfasst werden. Diese sind in der Abbildung 34 gruppiert nach dem solaren Deckungsgrad dargestellt.

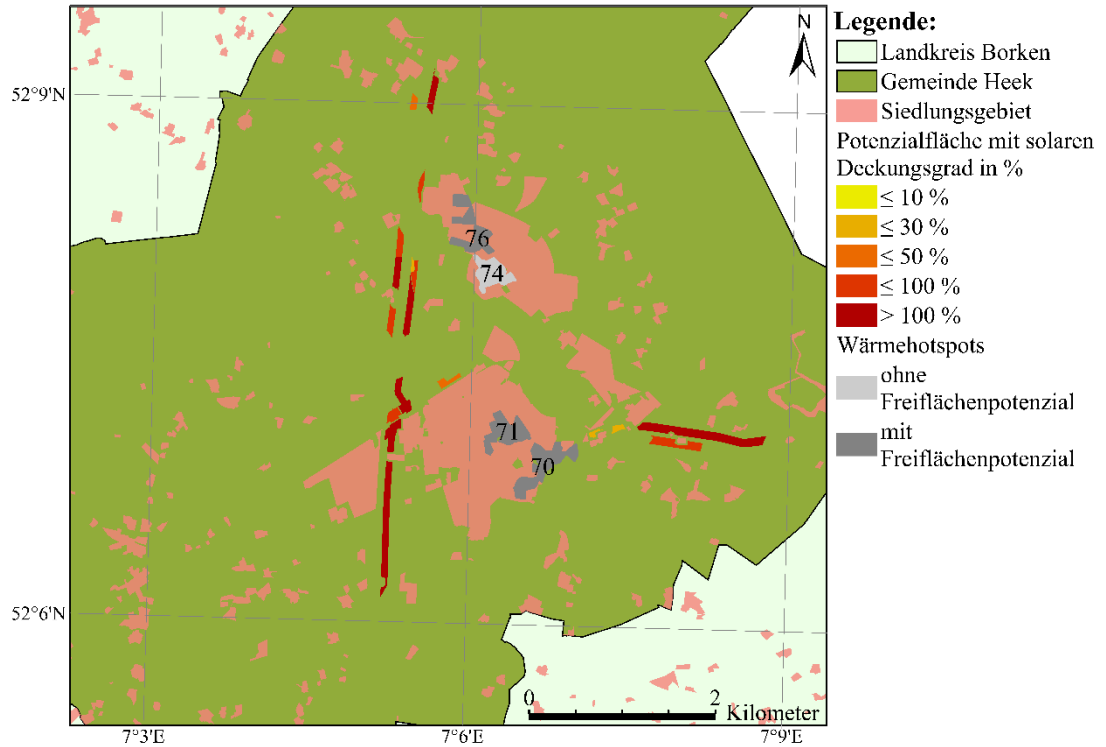


Abbildung 34: Potenzialflächen in der Gemeinde Heek (Eigene Darstellung 2020 mit Daten aus: IT.NRW 2020a, 2020b; LANUV NRW 2020b, 2020e) Koordinatensystem: ETRS 1989 UTM Zone 32N

Für die Wärmehotspots in der Gemeinde Heek werden die Potentiale der solarthermischen Freiflächenanlagen in der Tabelle 8 beschrieben. Die Potenzialflächen weisen einen solarthermischen Wärmeertrag zwischen 389 MWh/a und 12.072 MWh/a auf. Die Potenzialflächen erreichen einen solaren Deckungsgrad von bis zu 310 %. Insgesamt können die Potenzialflächen mit dem größten solaren Deckungsgrad die CO₂-Emissionen der Hotspots um 1.503 T/a senken.

Tabelle 8: Potenzial solarthermischer Freiflächenanlagen in der Gemeinde Heek (Eigene Darstellung 2020)

Heek	Wärmebedarf (Q _b) in MWh/a	Potenzialflächen	solarthermischer Wärmeertrag (Q _{sh}) in MWh/a			solarer Deckungsgrad (SF) in %			CO ₂ -Einsparpotenzial in T/a
			Gesamt	Min.	Max.	Gesamt	Min.	Max.	
Hotspot	Jahr 2020	Anzahl	Gesamt	Min.	Max.	Gesamt	Min.	Max.	von SF _{max}
70	4.469	4	17.620	567	12.072	394	13	270	706
71	2.974	5	18.671	1.406	9.225	628	47	310	470
76	2.068	9	16.511	389	3.685	798	19	178	327
Gesamt:	9.511	18	52.802	389	12.072		13	310	1.503

9.3.7 Heiden

In der Gemeinde Heiden konnte ein Wärmehotspot ermittelt werden. Für diesen Hotspot konnten insgesamt sechs Potenzialflächen erfasst werden. Diese sind klassifiziert nach dem solaren Deckungsgrad in Abbildung 35 dargestellt. Alle Potenzialflächen der Gemeinde Heiden liegen in der Nachbargemeinde Borken.

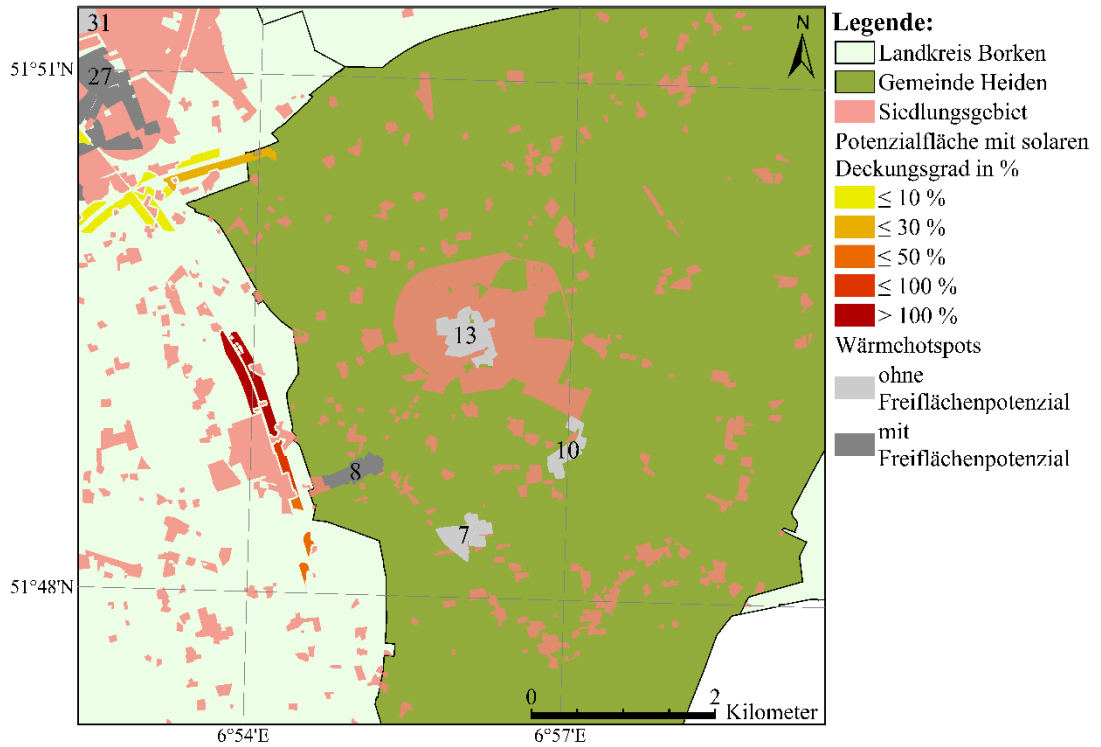


Abbildung 35: Potenzialflächen in der Gemeinde Heiden (Eigene Darstellung 2020 mit Daten aus: (IT.NRW 2020a, 2020b; LANUV NRW 2020b, 2020e) Koordinatensystem: ETRS 1989 UTM Zone 32N

Das Potenzial der FSA ist für den einen Hotspot in der Tabelle 9 beschrieben. So liegen die solarthermischen Wärmeerträge zwischen 1.192 MWh/a und 9.278 MWh/a. Außerdem erreichen die Potenzialflächen einen solaren Deckungsgrad von bis zu 261 %. Zugleich können die CO₂-Emissionen des Hotspots durch die FSA mit dem größten solaren Deckungsgrad um 561 T/a abgesenkt werden.

Tabelle 9: Potenzial solarthermischer Freiflächenanlagen in der Gemeinde Heiden (Eigene Darstellung 2020)

Heiden	Wärmebedarf (Q _b) in MWh/a	Potenzialflächen	solarthermischer Wärmeertrag (Q _{sh}) in MWh/a			solarer Deckungsgrad (SF) in %			CO ₂ -Einsparpotenzial in T/a
			Gesamt	Min.	Max.	Gesamt	Min.	Max.	
Hotspot	Jahr 2020	Anzahl	Gesamt	Min.	Max.	Gesamt	Min.	Max.	von SF _{max}
8	3.550	6	25.019	1.192	9.278	705	34	261	561

9.3.8 Isselburg

Für die Gemeinde Isselburg konnten insgesamt zehn Potenzialflächen für drei Wärmehotspots erfasst werden. Diese sind in Abbildung 36, nach dem solaren Deckungsgrad gruppiert, dargestellt.

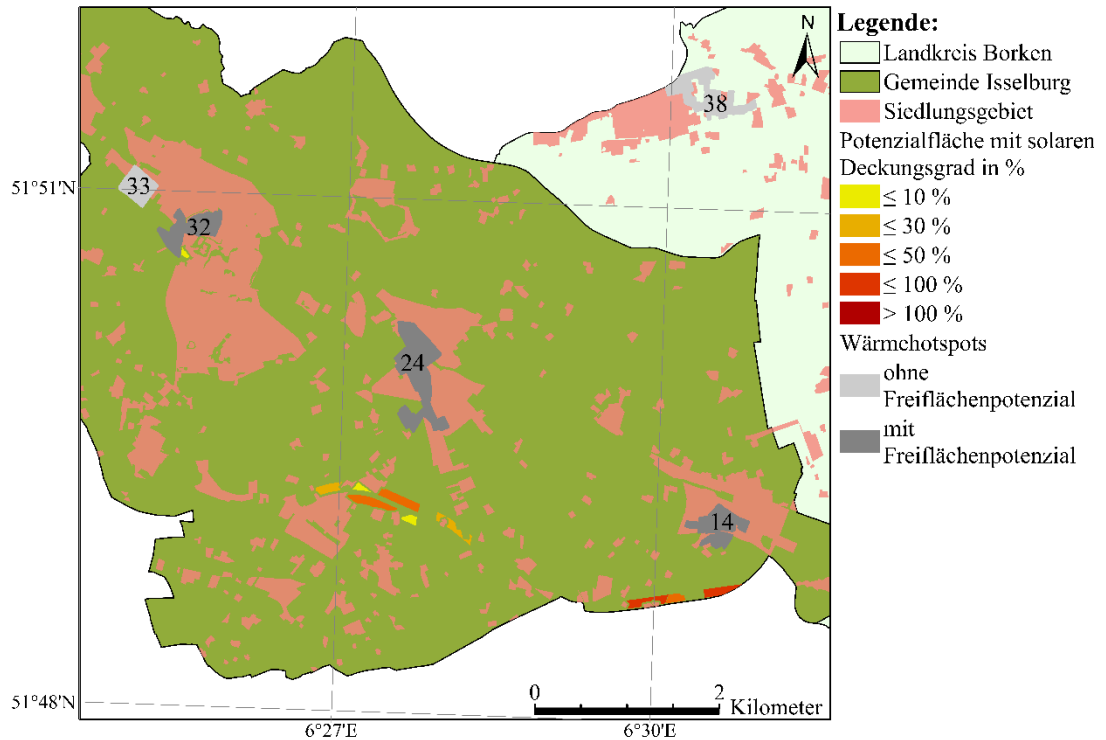


Abbildung 36: Potenzialflächen in der Gemeinde Isselburg (Eigene Darstellung 2020 mit Daten aus: IT.NRW 2020a, 2020b; LANUV NRW 2020b, 2020e) Koordinatensystem: ETRS 1989 UTM Zone 32N

Es konnten Potenzialflächen mit einem solarthermischen Wärmeertrag von 487 MWh/a bis 4.085 MWh/a in der Gemeinde Isselburg erfasst werden. Überdies weisen die Potenzialflächen ein solaren Deckungsgrad von bis zu 54 % auf. Die FSA mit dem größtmöglichen solaren Deckungsgrad können die CO₂-Emissionen der drei Wärmehotspots um 1.169 T/a absenken. In der Tabelle 10 werden die Potenziale der solarthermischen Freiflächenanlagen für die verschiedenen Hotspots dargestellt.

Tabelle 10: Potenzial solarthermischer Freiflächenanlagen in der Gemeinde Isselburg (Eigene Darstellung 2020)

Isselburg	Wärmebedarf (Q _b) in MWh/a	Potenzialflächen	solarthermischer Wärmeertrag (Q _{sh}) in MWh/a			solarer Deckungsgrad (SF) in %			CO ₂ -Einsparpotenzial in T/a
			Gesamt	Min.	Max.	Gesamt	Min.	Max.	
Hotspot	Jahr 2020	Anzahl	Gesamt	Min.	Max.	Gesamt	Min.	Max.	von SF _{max}
14	5.237	3	7.195	1.573	2.829	137	30	54	447
24	11.959	6	14.374	804	4.085	120	7	34	645
32	6.721	1	487	487	487	7	7	7	77
Gesamt:	23.917	10	22.056	487	4.085		7	54	1.169

9.3.9 Legden

In der Gemeinde Legden konnten 16 Potenzialflächen für einen Wärmehotspot ermittelt werden. Diese sind nach dem solaren Deckungsgrad klassifiziert in Abbildung 37 dargestellt.

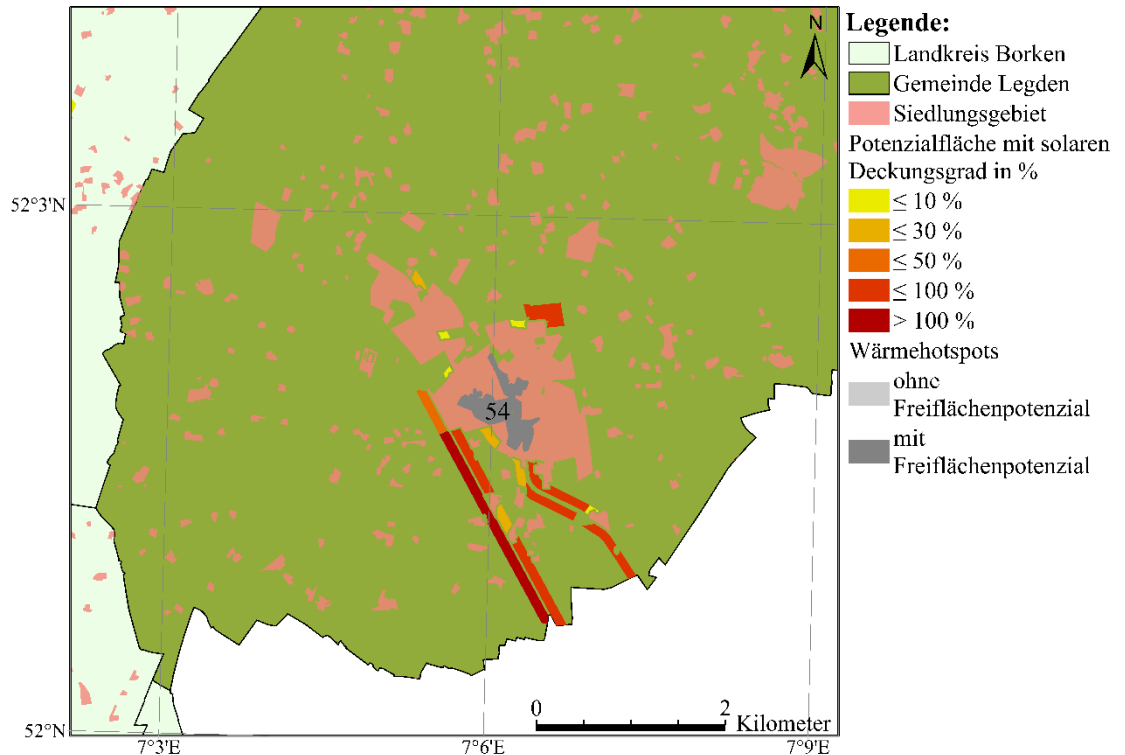


Abbildung 37: Potenzialflächen in der Gemeinde Legden (Eigene Darstellung 2020 mit Daten aus: IT.NRW 2020a, 2020b; LANUV NRW 2020b, 2020e) Koordinatensystem: ETRS 1989 UTM Zone 32N

Der solarthermische Wärmeertrag der Potenzialflächen liegt zwischen 398 MWh/a und 22.277 MWh/a. Zudem erreichen die Potenzialflächen einen solaren Deckungsgrad von bis zu 214 %. Überdies kann durch die FSA mit dem größten solaren Deckungsgrad 1.648 T/a CO₂ eingespart werden. Die Potenziale der solarthermischen Freiflächenanlagen sind für den einen Hotspot in der Tabelle 11 dargestellt.

Tabelle 11: Potenzial solarthermischer Freiflächenanlagen in der Gemeinde Legden (Eigene Darstellung 2020)

Legden	Wärmebedarf (Q _b) in MWh/a	Potenzialflächen	solarthermischer Wärmeertrag (Q _{sh}) in MWh/a			solarer Deckungsgrad (SF) in %			CO ₂ -Einsparpotenzial in T/a
			Gesamt	Min.	Max.	Gesamt	Min.	Max.	
Hotspot	Jahr 2020	Anzahl	Gesamt	Min.	Max.	Gesamt	Min.	Max.	von SF _{max}
54	10.428	16	79.562	398	22.277	763	4	214	1.648

9.3.10 Raesfeld

Insgesamt konnten 26 Potenzialflächen für vier Wärmehotspots in der Gemeinde Raesfeld ermittelt werden. Die Potenzialflächen sind in der Abbildung 38 gruppiert nach dem solaren Deckungsgrad dargestellt.

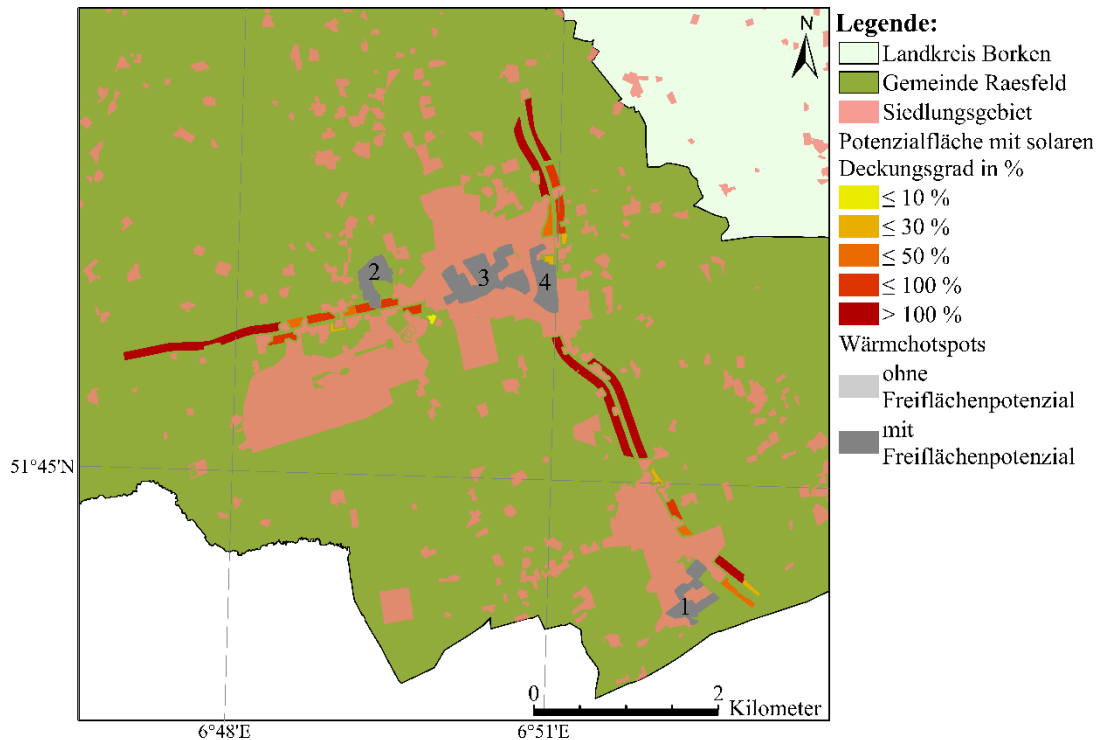


Abbildung 38: Potenzialflächen in der Gemeinde Raesfeld (Eigene Darstellung 2020 mit Daten aus: IT.NRW 2020a, 2020b; LANUV NRW 2020b, 2020e) Koordinatensystem: ETRS 1989 UTM Zone 32N

In der Tabelle 12 werden die Potenziale der solarthermischen Freiflächenanlagen für die verschiedenen Hotspots beschrieben. Es ergibt sich, dass der solarthermische Wärmeertrag zwischen 501 MWh/a und 14.603 MWh/a liegt. Weiterhin erreichen die Potenzialflächen einen solaren Deckungsgrad von bis zu 582 %. Insgesamt liegt das CO₂-Einsparpotenzial in der Gemeinde Raesfeld bei 1.632 T/a.

Tabelle 12: Potenzial solarthermischer Freiflächenanlagen in der Gemeinde Raesfeld (Eigene Darstellung 2020)

Raesfeld	Wärmebedarf (Q _b) in MWh/a	Potenzialflächen	solarthermischer Wärmeertrag (Q _{sh}) in MWh/a			solarer Deckungsgrad (SF) in %			CO ₂ -Einsparpotenzial in T/a
			Gesamt	Min.	Max.	Gesamt	Min.	Max.	
Hotspot	Jahr 2020	Anzahl	Gesamt	Min.	Max.	Gesamt	Min.	Max.	von SF _{max}
1	3.173	7	10.011	773	3.309	315	24	104	501
2	2.509	9	25.702	519	14.603	1.024	21	582	396
3	11.704	1	585	585	585	5	5	5	92
4	4.058	9	41.670	501	12.507	1.027	12	308	641
Gesamt:	21.445	26	77.969	501	14.603		5	582	1.632

9.3.11 Reken

Für die Gemeinde Reken konnten 16 Potenzialflächen und drei Wärmehotspots erfasst werden. Die Potenzialflächen sind gruppiert nach dem solaren Deckungsgrad in der Abbildung 39 dargelegt.

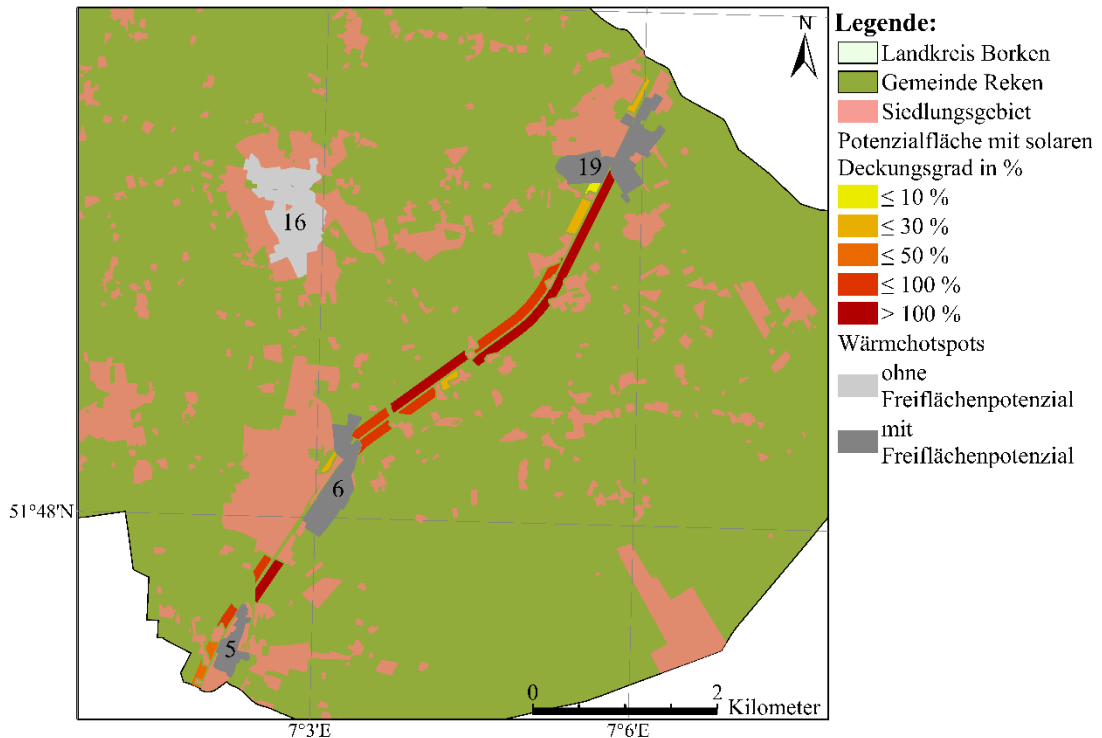


Abbildung 39: Potenzialflächen in der Gemeinde Reken (Eigene Darstellung 2020 mit Daten aus: IT.NRW 2020a, 2020b; LANUV NRW 2020b, 2020e) Koordinatensystem: ETRS 1989 UTM Zone 32N

In der Tabelle 13 sind die Potenziale der solarthermischen Freiflächenanlagen für jeden der drei Hotspots abgebildet. In der Gemeinde Reken können solarthermische Wärmeerträge zwischen 994 MWh/a und 24.514 MWh/a erreicht werden. Diese Potenzialflächen erreichen einen solaren Deckungsgrad von bis zu 194 %. Die Potenzialflächen mit dem höchsten solaren Deckungsgrad weisen ein CO₂-Einsparpotenzial von 4.445T/a auf.

Tabelle 13: Potenzial solarthermischer Freiflächenanlagen in der Gemeinde Reken (Eigene Darstellung 2020)

Reken	Wärmebedarf (Q _b) in MWh/a	Potenzialflächen	solarthermischer Wärmeertrag (Q _{sh}) in MWh/a			solarer Deckungsgrad (SF) in %			CO ₂ -Einsparpotenzial in T/a
			Gesamt	Min.	Max.	Gesamt	Min.	Max.	
Hotspot	Jahr 2020	Anzahl	Gesamt	Min.	Max.	Gesamt	Min.	Max.	von SF _{max}
5	3.727	5	12.320	1.381	4.579	331	37	123	589
6	5.089	6	24.874	1.042	9.857	489	20	194	804
19	19.315	5	43.154	994	24.514	223	5	127	3.052
Gesamt:	28.131	16	80.348	994	24.514		5	194	4.445

9.3.12 Rhede

In die Gemeinde Rhede wurden insgesamt elf Potenzialflächen für zwei Wärmehotspots erfasst. Die Potenzialflächen werden in der Abbildung 40 klassifiziert nach dem solaren Deckungsgrad dargestellt.

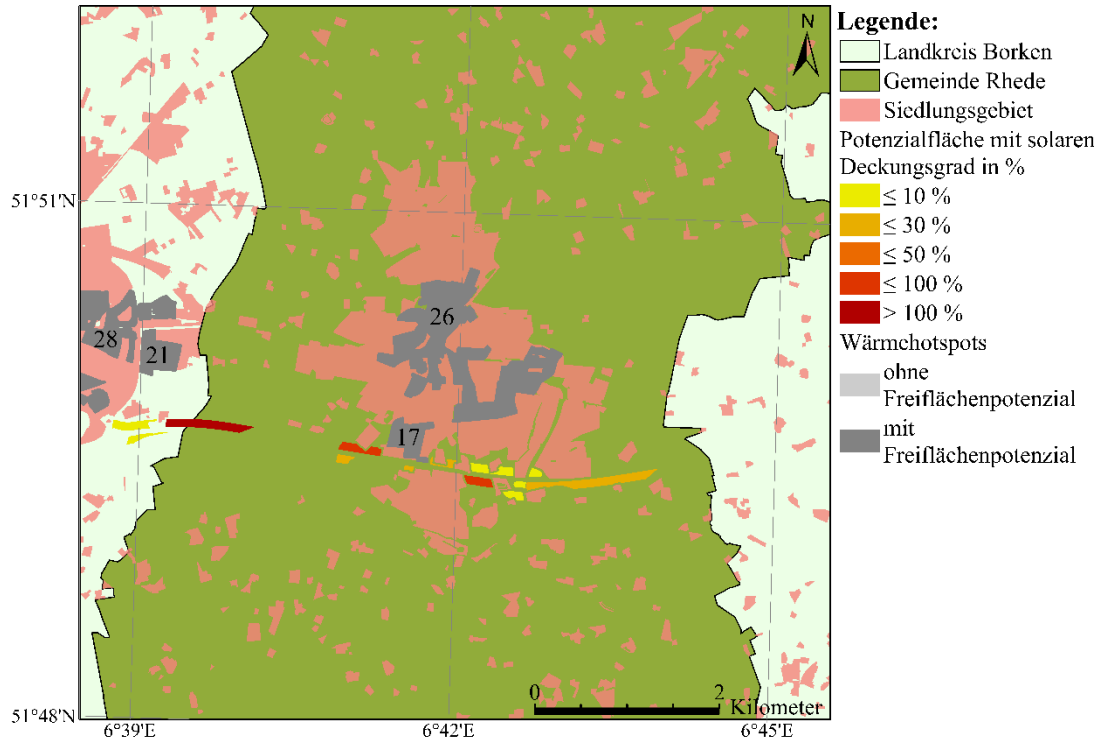


Abbildung 40: Potenzialflächen in der Gemeinde Rhede (Eigene Darstellung 2020 mit Daten aus: IT.NRW 2020a, 2020b; LANUV NRW 2020b, 2020e) Koordinatensystem: ETRS 1989 UTM Zone 32N

Die Potentiale der solarthermischen Freiflächenanlagen werden in der Tabelle 14 für beide Hotspots beschrieben. Der solarthermische Wärmeertrag der Potenzialflächen liegt zwischen 492 MWh/a und 10.687 MWh/a. Zudem erreichen die Potenzialflächen einen solaren Deckungsgrad von bis zu 75 %. Die Potenzialflächen mit dem größten solaren Deckungsgrad weisen ein CO₂-Einsparpotenzial von 2.238 T/a auf.

Tabelle 14: Potenzial solarthermischer Freiflächenanlagen in der Gemeinde Rhede (Eigene Darstellung 2020)

Rhede	Wärmebedarf (Q _b) in MWh/a	Potenzialflächen	solarthermischer Wärmeertrag (Q _{sh}) in MWh/a			solarer Deckungsgrad (SF) in %			CO ₂ -Einsparpotenzial in T/a
			Gesamt	Min.	Max.	Gesamt	Min.	Max.	
Hotspot	Jahr 2020	Anzahl	Gesamt	Min.	Max.	Gesamt	Min.	Max.	von SF _{max}
17	4.669	5	9.017	492	3.480	193	11	75	550
26	48.161	6	17.164	768	10.687	36	2	22	1.688
Gesamt:	52.830	11	26.181	492	10.687		2	75	2.238

9.3.13 Stadtlohn

Insgesamt konnten zwei Potenzialflächen für zwei Wärmehotspots in der Gemeinde Stadtlohn erfasst werden. Beide sind gruppiert nach dem solaren Deckungsgrad in der Abbildung 41 dargestellt.

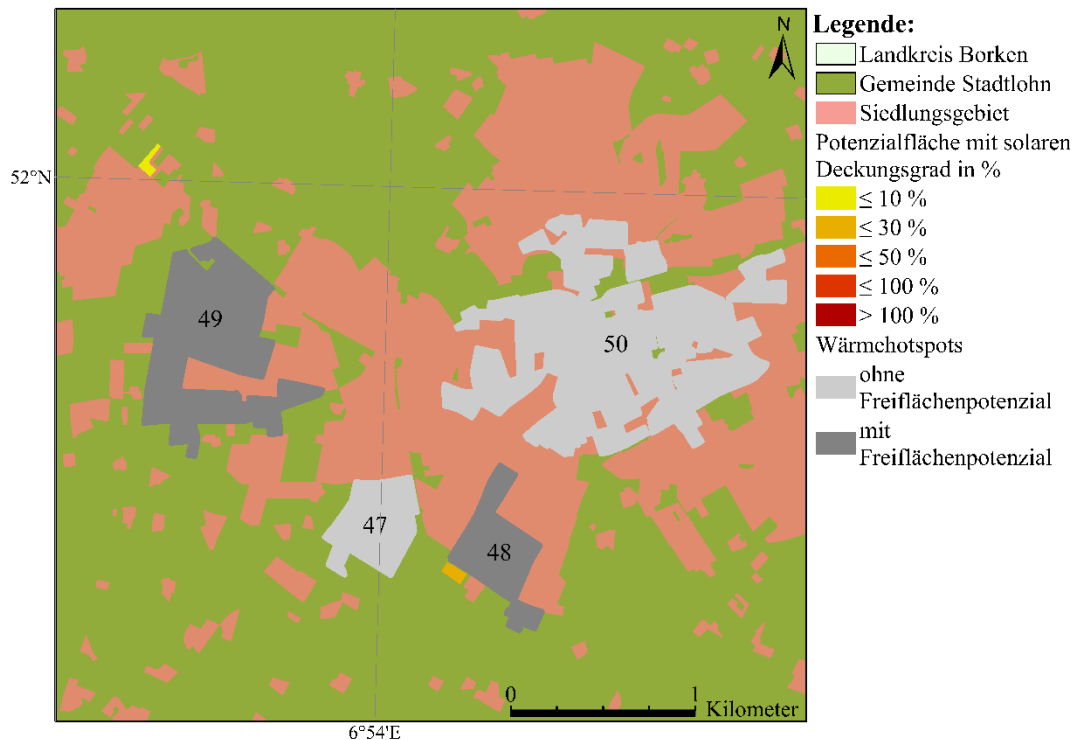


Abbildung 41: Potenzialflächen in der Gemeinde Stadtlohn (Eigene Darstellung 2020 mit Daten aus: IT.NRW 2020a, 2020b; LANUV NRW 2020b, 2020e) Koordinatensystem: ETRS 1989 UTM Zone 32N

Die Potenzialflächen erreichen einen solarthermischen Wärmeertrag von 798 MWh/a bzw. von 722 MWh/a und somit einen solaren Deckungsgrad von 17 % und 4 %. Beide Potenzialflächen zusammen können die CO₂-Emissionen um insgesamt 240 T/a senken. Diese Zahlen sind in der Tabelle 15 veranschaulicht.

Tabelle 15: Potenzial solarthermischer Freiflächenanlagen in der Gemeinde Stadtlohn (Eigene Darstellung 2020)

Stadtlohn	Wärmebedarf (Q _b) in MWh/a	Potenzialflächen	solarthermischer Wärmeertrag (Q _{sh}) in MWh/a			solarer Deckungsgrad (SF) in %			CO ₂ -Einsparpotenzial in T/a
			Gesamt	Min.	Max.	Gesamt	Min.	Max.	
Hotspot	Jahr 2020	Anzahl	Gesamt	Min.	Max.	Gesamt	Min.	Max.	von SF _{max}
48	4.813	1	798	798	798	17	17	17	126
49	18.582	1	722	722	722	4	4	4	114
Gesamt:	23.395	2	1.520	722	798		4	17	240

9.3.14 Südlohn

Für zwei Wärmehotspots in der Gemeinde Südlohn konnten insgesamt elf Potenzialflächen berechnet werden. Diese sind klassifiziert nach dem solaren Deckungsgrad in der Abbildung 42 veranschaulicht. Die beiden Potenzialflächen für den Hotspot 44 liegen nicht in der Gemeinde Südlohn, sondern in der Nachbargemeinde Borken.

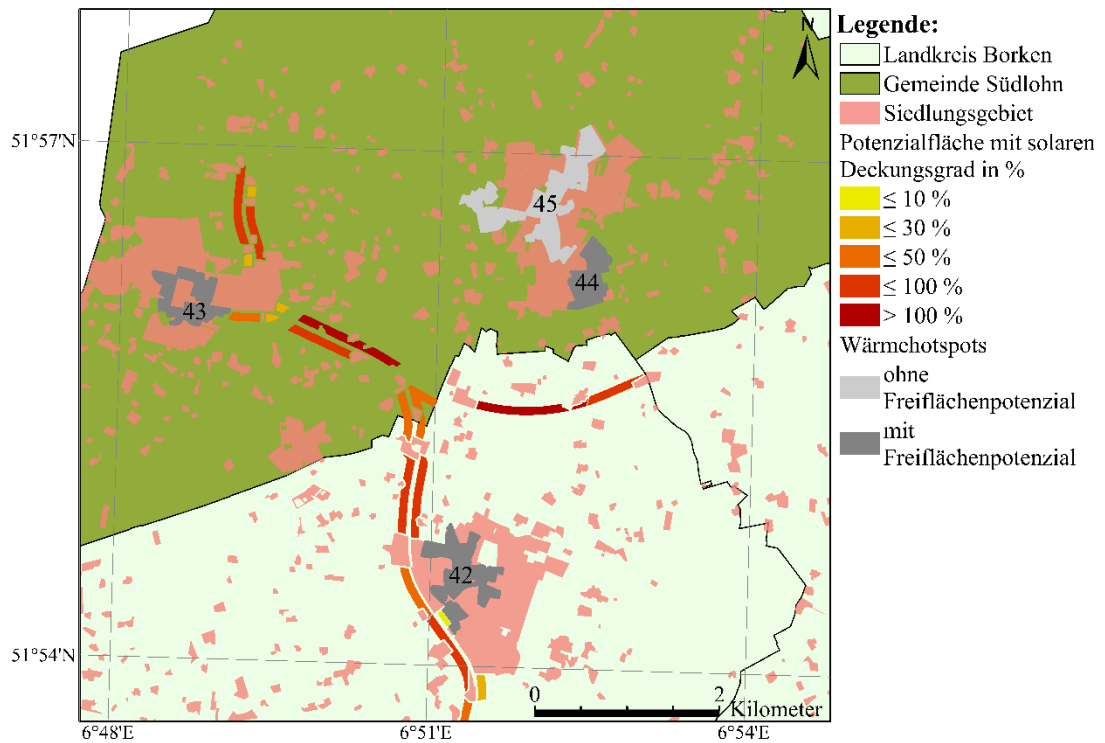


Abbildung 42: Potenzialflächen in der Gemeinde Südlohn (Eigene Darstellung 2020 mit Daten aus: IT.NRW 2020a, 2020b; LANUV NRW 2020b, 2020e) Koordinatensystem: ETRS 1989 UTM Zone 32N

Die Potenziale der solarthermischen Freiflächenanlagen werden in der Tabelle 16 für beide Hotspots näher beschrieben. Der solarthermische Wärmeertrag der Potenzialflächen liegt zwischen 839 MWh/a und 9.150 MWh/a. Des Weiteren erreichen die Potenzialflächen einen solaren Deckungsgrad von bis zu 157 %. Die Potenzialflächen mit dem höchsten solaren Deckungsgrad können den CO₂-Ausstoß der Wärmehotspots um 2.231 T/a senken.

Tabelle 16: Potenzial solarthermischer Freiflächenanlagen in der Gemeinde Südlohn (Eigene Darstellung 2020)

Südlohn	Wärmebedarf (Q _b) in MWh/a	Potenzialflächen	solarthermischer Wärmeertrag (Q _{sh}) in MWh/a			solarer Deckungsgrad (SF) in %			CO ₂ -Einsparpotenzial in T/a
			Gesamt	Min.	Max.	Gesamt	Min.	Max.	
Hotspot	Jahr 2020	Anzahl	Gesamt	Min.	Max.	Gesamt	Min.	Max.	von SF _{max}
43	8.278	9	33.885	839	8.931	409	10	108	1.308
44	5.845	2	13.970	4.820	9.150	239	82	157	923
Gesamt:	14.123	11	47.856	839	9.150		10	157	2.231

9.3.15 Vreden

In der Gemeinde Vreden wurden neun Potenzialflächen für zwei Wärmehotspots ermittelt. Diese sind gruppiert nach dem solaren Deckungsgrad in der Abbildung 43 veranschaulicht.

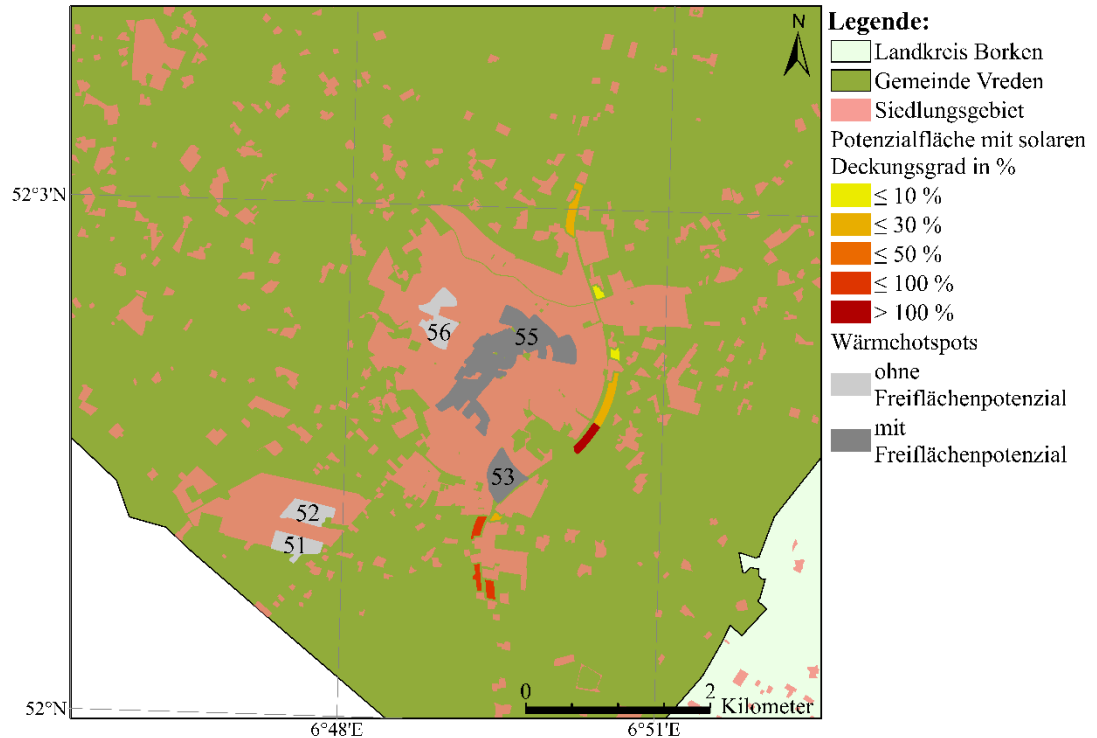


Abbildung 43: Potenzialflächen in der Gemeinde Vreden (Eigene Darstellung 2020 mit Daten aus: IT.NRW 2020a, 2020b; LANUV NRW 2020b, 2020e) Koordinatensystem: ETRS 1989 UTM Zone 32N

In der Tabelle 17 werden die Potenziale der solarthermischen Freiflächenanlagen für beide Hotspots der Gemeinde Vreden dargelegt. Der solarthermische Wärmeertrag liegt zwischen 633 MWh/a und 4.841 MWh/a. Zudem kann ein solarer Deckungsgrad von bis zu 100 % erfasst werden. Für beide Hotspots kann ein CO₂-Einsparpotenzial von insgesamt 1.286 T/a ermittelt werden.

Tabelle 17: Potenzial solarthermischer Freiflächenanlagen in der Gemeinde Vreden (Eigene Darstellung 2020)

Vreden	Wärmebedarf (Q _b) in MWh/a	Potenzialflächen	solarthermischer Wärmeertrag (Q _{sh}) in MWh/a			solarer Deckungsgrad (SF) in %			CO ₂ -Einsparpotenzial in T/a
			Gesamt	Min.	Max.	Gesamt	Min.	Max.	
Hotspot	Jahr 2020	Anzahl	Gesamt	Min.	Max.	Gesamt	Min.	Max.	von SFmax
53	3.301	5	9.453	633	3.313	286	19	100	522
55	31.316	4	10.882	905	4.841	35	3	15	765
Gesamt:	34.617	9	20.335	633	4.841		3	100	1.286

9.4 Speichervolumen

Für jede potenzielle FSA konnten die Speichervolumen für die drei zu betrachtenden Wärmespeicher ermittelt werden.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 44 dargestellt. Des Weiteren wurden zwei Trendlinien in der Abbildung ergänzt. Die gelbe Trendlinie „Max Behälter-Wärmespeicher“ liegt bei 12.000 m³. Größere Behälter-Wärmespeicher wurden bisher noch nicht realisiert. Orange Punkte, welche oberhalb der gelben Linie liegen, stellen potenzielle Behälterwärmespeicher dar, welche technisch derzeit nicht umsetzbar sind. Insgesamt liegt das Speichervolumen eines Behälter-Wärmespeicher bei 74 Potenzialflächen unterhalb der Grenze von 12.000 m³, daher wären für diese ein Behälter-Wärmespeicher realisierbar. Zusätzlich stellt die Trendlinie „Min. Erdsonden-Wärmespeicher“ die Mindestgröße eines Erdsonden-Wärmespeichers dar. Diese Mindestgröße liegt bei 20.000 m³. Das bedeutet Erdsonden-Wärmespeicher (graue Punkte), welche unterhalb der grauen Linie liegen, können aus technischen und wirtschaftlichen Gründen nicht realisiert werden. Insgesamt konnten 278 Potenzialflächen ermittelt werden, für welche ein Erdsonden-Wärmespeicher realisierbar wäre. Für die Erdbecken-Wärmespeicher existieren keine Obergrenzen oder Mindestanforderungen, demzufolge sind diese Wärmespeicher beliebig zu dimensionieren. Daher sind Erdbecken-Wärmespeicher tendenziell für alle 323 Potenzialflächen eine Option.

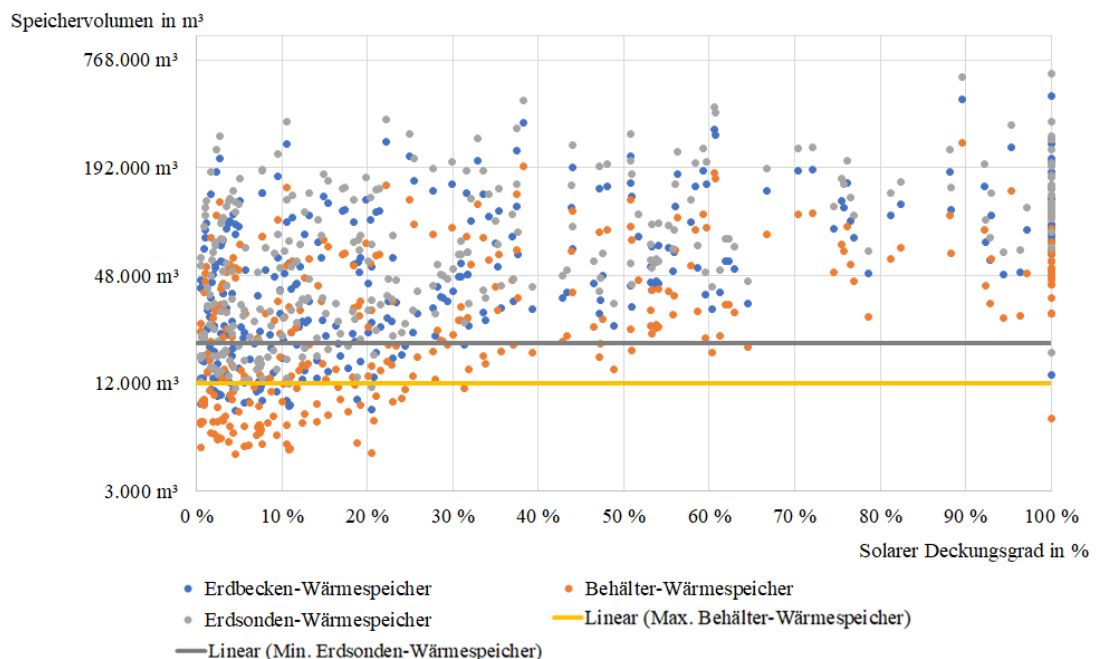


Abbildung 44: Wärmespeichervolumen nach der Wärmespeicherart und dem solaren Deckungsgrad (Eigene Darstellung 2020)

10 Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse dieser Potenzialabschätzung zeigen, dass etwa zwei Drittel der 88 Wärmehotspots im Kreis Borken zumindest anteilig mit einer FSA versorgt werden können. Das entspricht etwa 23 % des Gesamtwärmebedarfs für Raumwärme und Warmwasser des gesamten Kreises. Daher ist es potenziell möglich, dass Wärmenetze mit einer FSA bereits im Jahr 2030 15 % bis 21 % des Gesamtwärmebedarfs im Kreis Borken decken können. Zu Beginn dieser Arbeit wurde darauf verwiesen, dass ein intensiver Ausbau erneuerbarer Wärmenetze bis zum Jahr 2030 vor allem dann nötig ist, wenn eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um 95 % bis zum Jahr 2050 angestrebt wird (vgl. Kapitel 2). Die konservative Abschätzung des CO₂-Einsparpotenzials dieser Arbeit ergibt, dass durch das Einbinden der FSA mit dem höchsten solaren Deckungsgrad in das potenzielle Wärmenetz der jeweiligen Wärmehotspots, der CO₂-Ausstoß um etwa 44.000 T/a reduziert werden könnte. Dies entspricht etwa 21 % des abgeschätzten CO₂-Ausstoßes der 88 Wärmehotspots für Raumwärme und Warmwasser im Kreis Borken. Diese Ergebnisse zeigen, dass Wärmenetze der 4. Generation mit einem solarthermischen Anteil im Kreis Borken, einen bedeutenden Anteil an einem klimaneutralen Gebäudebestand im Jahr 2050 ausmachen können.

Um das Potenzial der Wärmenetze zu nutzen, bedarf es genauerer Machbarkeitsstudien, welche beispielsweise durch die Bundesförderung für effiziente Wärmenetze gefördert werden (vgl. Kapitel 6.4.3). Des Weiteren steigt die Effizienz eines Wärmenetzes mit einem zunehmenden Anschlussgrad. Um einen möglichst hohen Anschlussgrad zu erreichen, können Gemeinden einen Anschluss- und Benutzungszwang aussprechen oder über Bürgerbeteiligungen und Genossenschaften die Verbraucher aktiv an ihrer Wärmeversorgung teilhaben lassen (vgl. Kapitel 3.3 und Kapitel 6.3).

In dieser Arbeit konnten 57 Wärmehotspots ermittelt werden, welche ein FSA-Potenzial aufweisen. Für diese und die übrigen 31 Wärmehotspots gilt, dass ein Wärmenetz sowohl technisch als auch wirtschaftlich sinnvoll sein kann. Die Siedlungsgebiete außerhalb dieser Wärmehotspots sollten allerdings nicht direkt ausgeschlossen werden, sie müssen jedoch genauer analysiert werden (Wetter et al. 2019: 11). In Zukunft könnte es wirtschaftlich sein, auch Gebiete außerhalb der Wärmehotspots im Kreis Borken an die potenziellen Wärmenetze anzuschließen. Folglich können die in dieser Arbeit untersuchten Wärmehotspots als Ausgangspunkt für eine kommunale

Wärmeplanung im Kreis Borken angesehen werden. In einer zukünftigen kommunalen Wärmeplanung sollte berücksichtigt werden, dass der Gesamtwärmebedarf für Raumwärme und Warmwasser in den Sektoren Haushalt und Industrie im Kreis Borken, durch Sanierungs- und Effizienzmaßnahmen um circa 36 % bis zum Jahr 2050 gesenkt werden kann. Des Weiteren rechnet die Fachhochschule Münster in diese 36 % die zukünftige Nutzung industrieller Abwärme mit ein (vgl. Kapitel 7.2).

Für 31 Wärmehotspots konnte kein FSA-Potenzial ermittelt werden. Dennoch ist ein Wärmenetz der 4. Generation nicht ausgeschlossen. Diese Hotspots müssen jedoch durch andere erneuerbare Wärmequellen versorgt werden. Hierzu wäre es ratsam, andere erneuerbare Wärmequellen wie beispielsweise Geothermie, Biomasse oder Wärmepumpen in Erwägung zu ziehen (vgl. Kapitel 3.1). Eine solche Gegenüberstellung der Wärmequellen und Senken ist ebenfalls für die 57 Wärmehotspots mit FSA-Potenzial vom Vorteil, um mögliche Wärmequellen für den Anteil des Gesamtwärmebedarfs der Hotspots zu finden, welcher nicht durch eine FSA gedeckt werden kann. So könnte ermittelt werden, welche der Wärmehotspots potenziell zu 100 % mit erneuerbarer Wärme versorgt werden kann und bei welchen konventionelle Anlagen vonnöten sind. Darüber hinaus unterliegen solarthermische Anlagen auch mit Langzeitwärmespeichern jahreszeitlich bedingten Ertragsschwankungen, weshalb derzeit nicht davon ausgegangen werden kann, dass ein solarer Deckungsgrad von 100 % technisch realisierbar ist. Deshalb benötigen Wärmenetze mit einem solarthermischen Anteil, nach dem derzeitigen Stand der Technik immer auch andere Wärmequellen.

Dennoch konnten einzelne Potenzialflächen ermittelt werden, welche einen solaren Deckungsgrad von über 100 % erreichen können und somit den zugewiesenen Wärmehotspot theoretisch vollständig mit solarer Wärmeenergie versorgen können. Auch wenn diese 100 % nur in der Theorie existieren, können diese Potenzialflächen als besonders geeignet angesehen werden um eine FSA zu errichten, da eine genügend große Fläche vorhanden ist. Somit können die FSA auf diesen Flächen optimal skaliert und an die Bedürfnisse des Wärmenetzes angepasst werden.

Es konnten im gesamten Kreis Borken 323 Potenzialflächen für den Bau einer FSA Anlage erhoben werden. Diese sind allerdings nicht homogen im gesamten Kreis verteilt, so dass das Potenzial auf Gemeindeebene näher betrachtet werden muss (vgl. Kapitel 9.3). Beispielsweise können in den Gemeinden Gescher, Legden und Raesfeld alle Wärmehotspots zumindest anteilig durch FSA mit Wärme versorgt werden,

während nach dieser Potenzialabschätzung in den Gemeinden Schöppingen und Velen keine Potenzialflächen für solarthermische Freiflächenanlagen vorhanden sind. Einen Sonderfall stellt die Gemeinde Heiden dar, da in dieser ein Wärmehotspot liegt, zu welchem insgesamt sechs Potenzialflächen zugewiesen wurden. Das Besondere an diesem Potenzial ist, dass keine der Potenzialflächen in der Gemeinde Heiden liegt, sondern alle in der Nachbargemeinde Borken. Um diese Potenziale nutzen zu können, ist eine Zusammenarbeit der beiden Gemeinden unausweichlich.

Um die Verteilung der Potenzialflächen zu verstehen, ist zu beachten, dass solarthermische Freiflächenanlagen nur an Standorten Sinn ergeben, in deren Nähe auch potenzielle Abnehmer der Wärmeenergie vorhanden sind. Dies liegt vor allem an den Wärmeverlusten, welche durch den Wärmetransport entstehen und an den hohen Baukosten eines Wärmenetzes (vgl. Kapitel 3.2). Das heißt Wärmeenergie kann, im Gegensatz zu Strom, nicht über längere Distanzen transportiert werden. Obwohl Wärmequellen dementsprechend nah an den Verbrauchern errichtet werden müssen, kann kritisiert werden, dass sowohl im LEP NRW als auch im Regionalplan Münster nicht zwischen solarthermischen und PV-Freiflächen unterschieden wird (vgl. Kapitel 6.1 und Kapitel 6.2). Dies hat Auswirkungen auf das FSA-Potenzial im Kreis Borken, da dieser überdurchschnittlich stark landwirtschaftlich geprägt ist (vgl. Kapitel 7.1). Denn mit Ausnahme des Randstreifenpotenzials entlang der Verkehrswege, dürfen nach dem LEP NRW und dem Regionalplan Münster keine landwirtschaftlichen Nutzflächen für FSA genutzt werden. Infolgedessen muss eine Vielzahl ortsnaher Flächen ausgeschlossen werden.

Für den Flächentyp Verkehrswege ist weiterhin ein besonders hohes Potenzial in den Gemeinden erfasst, durch die oder entlang derer eine Bundesstraße, Autobahn oder Bahnstrecke führen. Gemeinden mit einem sehr hohen Potenzial in Bezug auf den Flächentyp Verkehrswege sind unter anderem Ahaus, Bocholt, Borken und Gronau (Westf.) (vgl. Abbildung 28). Bei den Potenzialflächen entlang der Verkehrswege ist darauf zu achten, dass bandartige Strukturen nach dem Regionalplan Münster zu vermeiden sind. Demzufolge ist es derzeit als unrealistisch einzuschätzen, dass mehrere Potenzialflächen entlang der Verkehrswege zusammen einen Wärmehotspot mit solarer Wärmeenergie versorgen dürfen.

Zwar sind die meisten Potenzialflächen entlang der Verkehrswege zu finden, dennoch bieten einzelne Deponien, Park- oder Rastplätze ein großes Potenzial für einzelne

Hotspots. Hervorzuheben ist hier die Gemeinde Stadtlohn, in welcher lediglich ein Parkplatz und eine Deponie als Potenzialflächen ermittelt wurden. Dennoch können beide Potenzialflächen zusammen den CO₂-Ausstoß in der Gemeinde Stadtlohn um 240 T/a senken (vgl. Kapitel 9.3.13). Somit ist anzunehmen, dass insbesondere Flächen entlang der Bundesfernstraßen und Bahnstrecken ein FSA-Potenzial aufweisen. Aber auch größere Park- und Rastplätze sowie ortsnahe Deponien können für solarthermische Freiflächenanlagen von Bedeutung sein.

Der solare Deckungsgrad ist in den Abbildungen 29 bis 43 für jede Potenzialfläche dargestellt. Insbesondere für Wärmehotspots mit einem hohen Gesamtwärmebedarf, sollte der solare Deckungsgrad in Bezug zum Wärmeertrag der Potenzialfläche gesehen werden. Denn einzelne Potenzialflächen weisen einen hohen Wärmeertrag auf, sind allerdings einem Wärmehotspot mit einem hohen Gesamtwärmebedarf zugewiesen. Folglich ist deren solarer Deckungsgrad niedriger als bei Potenzialflächen mit einem ähnlichen Wärmeertrag, welche zu einem Wärmehotspot mit einem geringeren Gesamtwärmebedarf zugewiesen wurden. Beispiele hierfür wären die Potenzialflächen mit dem höchsten solaren Deckungsgrad der Wärmehotspots 27 und 36 in der Gemeinde Borken (vgl. Kapitel 9.3.3). Obwohl die jeweiligen maximalen Wärmeerträge der Potenzialflächen beider Hotspots mit 10.412 MWh/a (Hotspot 27) und 10.647 MWh/a (Hotspot 36) annähernd gleich groß sind, ist der maximale solare Deckungsgrad des Hotspots 27 mit etwa 11 % deutlich geringer als der maximalen solare Deckungsgrad des Hotspots 36 mit etwa 232 % (vgl. Tabelle 5). Dies liegt insbesondere an den unterschiedlichen Wärmebedarfen der Hotspots. So benötigt der Hotspot 27 etwa 99.006 MWh/a, während der Hotspot 36 lediglich 4.590 MWh/a benötigt. Dennoch weist die Potenzialfläche mit dem höchsten solaren Deckungsgrad des Hotspots 27 ein deutlich höheres CO₂-Einsparpotenzial als die äquivalente Fläche des Hotspots 36 auf. Dies liegt daran, dass ein solarer Deckungsgrad von über 100 % nur theoretisch möglich ist. Wenn ein Wärmehotspot, wie in diesem Beispiel, der Hotspot 36 theoretisch zu über 100 % mit solarer Wärme versorgt werden kann, entspricht das CO₂-Einsparpotenzial den gesamten abgeschätzten CO₂-Emissionen des Hotspots für Raumwärme und Warmwasser. Somit wird nicht die gesamte Fläche benötigt, um den Hotspot 36 vollständig mit Wärmeenergie zu versorgen. Dementsprechend könnte eine FSA auf dieser Potenzialfläche entweder kleiner dimensioniert werden oder, je nach Lage, möglicherweise einen anderen Wärmehotspot mitversorgen.

Wärmespeicher konnten in dieser Potenzialabschätzung der FSA nur am Rande betrachtet werden. Es konnte für jede Potenzialfläche die benötigten Speichervolumen für Behälter-Wärmespeicher, Erdbecken-Wärmespeicher und Erdsonden-Wärmespeicher abgeschätzt werden. Es ergibt sich, dass ein Behälter-Wärmespeicher für 74 Potenzialflächen und ein Erdsonden-Wärmespeicher für 278 Potenzialflächen den volumenspezifischen Ansprüchen gerecht wird. Des Weiteren ist ein Erdbecken-Wärmespeicher für alle Potenzialflächen realisierbar. Eine genauere Analyse der Wärmespeicher ist nötig, wenn eine der potenziellen FSA realisiert werden soll.

11 Diskussion der Methodik

Im 8. Kapitel dieser Arbeit wurde die Methodik zur Potenzialabschätzung von FSA im Kreis Borken beschrieben. Diese soll im Folgenden diskutiert werden.

Die Daten der Potenzialabschätzung sind alle entweder kostenfrei über das Portal Opengeodata.NRW oder über das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) zu beziehen. Die vom LANUV NRW stammenden Daten sind durch eine Anfrage kostenfrei zu erhalten.

Da bislang keine Potenzialabschätzung solarthermischer-Freiflächenanlagen für Wärmenetze der 4. Generation im Land Nordrhein-Westfalen oder für den Kreis Borken vorliegt, wurde diese Methodik unter Berücksichtigung der technischen Grundvoraussetzungen und Mindestanforderungen, den rechtlichen Rahmenbedingungen und Förderprogramme entwickelt. Die aus der Literaturrecherche abgeleiteten grundlegenden Annahmen wurden in Kapitel 8.1 dargestellt. Diese Annahmen stellen die Basis für diese Potenzialabschätzung dar.

Die potenziellen Flächen für den Bau einer FSA im Kreis Borken wurden aus dem LEP NRW und dem Regionalplan Münsterland abgeleitet (vgl. Kapitel 6). Aus diesen stammen ebenfalls die Ausschlussflächen und somit die Flächen, auf denen keine FSA gebaut werden darf. Neben den Randstreifen entlang von Bundesfernstraßen und Schienenwege sowie auf Halden und Deponien, sind Brach- und Konversionsflächen für den Bau von FSA geeignet. Jedoch existieren keine Informationen über die Lage und Verbreitung von Brach- und Konversionsflächen im Kreis Borken. Deshalb wurde dieser Flächentyp in dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Für eine landesweite Studie wäre es daher ratsam, Brach- und Konversionsflächen mit Hilfe des Leitfadens des LANUV NRW zu erheben (LANUV NRW 2015a: o.S.). Dies war im Rahmen dieser Arbeit aufgrund des hohen zeitlichen und technischen Aufwandes nicht möglich.

Des Weiteren wurden Park- und Rastplätze in dieser Analyse betrachtet, da diese nicht eindeutig im LEP NRW und im Regionalplan Münster ausgeschlossen werden. Zusätzlich wurden in Deutschland bereits Park- oder Rastplätze mit solarthermischen Kollektoren, zur Einspeisung in ein Wärmenetz, überbaut.

Zu den Ausschlussflächen gehören neben den rechtlich verbotenen Flächen, auch potenziell verschattete Flächen. Um mögliche Verschattungen zu berücksichtigen, wurden die Ausschlussflächen (vor allem Gebäude und Vegetation), welche eine

Potenzialfläche verschatten könnten um 20 m gepuffert (vgl. Kapitel 8.3.4). Dieser Schritt war nötig, da die Bearbeitung eines DOM aufgrund des Datenvolumens im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich war (vgl. Kapitel 8.2). Eine Verschattungsanalyse mit einem DOM kann im Gegensatz zu dem generellen 20 m Puffer eine höhere Genauigkeit liefern. Andererseits wurden lediglich potenzielle Flächen berücksichtigt, welche eine Kollektorfläche von mindestens 1.000 m² und somit eine Gesamtfläche von 3.500 m² aufweisen. Daher ist anzunehmen, dass kleinere Verschattungen durch Bäume oder angrenzende Gebäude nur einen sehr kleinen prozentualen Anteil der Gesamtfläche ausmachen. Dementsprechend kann davon ausgegangen werden, dass die Erhebung der Potenzialflächen auch ohne DOM repräsentativ ist.

Damit der jährliche Kollektorertrag einer Potenzialfläche ermittelt werden kann, wurde die Annahme getroffen, dass ein Quadratmeter Kollektorfläche im Jahr 350 kWh Wärme produzieren kann. Dieser Wert beruht auf dem Förderprogramm Erneuerbare Energien „Premium“ der KfW-Bank (KfW 2019: 2). Die Entscheidung fiel auf diesen Wert, da für eine Berechnung des jährlichen Kollektorertrages über die Formel aus Kapitel 5.1.4 Annahmen über die Kollektorbauweise und dem Temperaturgradienten ($T_M - T_U$) getroffen werden müssen. Der für diese Arbeit herangezogene Wert hat den Vorteil, dass für diesen keine Annahmen getroffen werden müssen. So ermöglicht dieses Vorgehen, dass das ermittelte Potenzial auch bei verschiedenen Kollektorbauweisen und Temperaturniveaus erreicht wird, wenn ein jährlicher Kollektorertrag von mindestens 350 kWh/m² erzielt wird. Des Weiteren ist dieser Wert im Gegensatz zu dem jährlichen Mindestkollektorertrag aus dem Förderprogramm progress.NRW für große Solarthermieanlagen festgelegt (vgl. Kapitel 6.4.2). Es muss berücksichtigt werden, dass mit zunehmendem jährlichen Kollektorertrag der Ertrag einer potenziellen FSA ansteigt. Zum Vergleich liegt der jährliche Kollektorertrag dänischer FSA im Durchschnitt bei 409 kWh/m² (Trier et al. 2018: 14). Somit gilt der angenommene Kollektorertrag als konservativ und es ist anzunehmen, dass der tatsächliche Kollektorertrag pro Quadratmeter Kollektorfläche tendenziell unterschätzt wird.

Des Weiteren geht diese Potenzialabschätzung verstärkt von der Verbraucherseite aus. Das bedeutet, es werden nur potenzielle Flächen betrachtet, welche in der Nähe potenzieller Verbraucher liegen (max. 1.000 m entfernt von einem Wärmehotspot). Dies liegt vor allem an den hohen Investitionskosten für den Bau einer Trasse und an den

Wärmeverlusten durch den Transport (vgl. Kapitel 3.2). Somit wurden die Wärmeverluste für die Trassen zwischen Potenzialflächen und Wärmehotspots abgeschätzt (vgl. Kapitel 8.3.9). Weitere Wärmeverluste, wie beispielsweise durch einen Wärmespeicher oder die Trassenverluste innerhalb des gesamten Wärmehotspots, konnten nicht berücksichtigt werden. Somit wurden einzig die Trassenverluste berechnet und folglich, wie viel Wärmeenergie von einer potenziellen FSA an einem Wärmehotspot angelangt. Dies reicht allerdings aus, um das Potenzial der FSA für den zugewiesenen Wärmehotspot auszuweisen.

Unter Berücksichtigung des Wärmertrages nach Abzug der Trassenverluste wurde der solare Deckungsgrad jeder Potenzialfläche für die infrage kommenden Wärmehotspots ermittelt. Die ermittelten Potenzialflächen wurden daraufhin, durch einen Indikator einem Wärmehotspot zugewiesen. Dieser Schritt war nötig, da die Potenzialflächen ansonsten mehrfach in die Ergebnisse eingeflossen wären. Der Indikator wurde zu 90 % über die Distanz zwischen Wärmehotspot und Potenzialfläche und zu 10 % über den solaren Deckungsgrad bestimmt. Dies bedeutet, dass bei zwei annähernd gleich weit von einer Potenzialfläche entfernt liegenden Hotspots, der höhere solare Deckungsgrad über die Zuweisung entscheidet. In den meisten Fällen bestimmt allerdings die Distanz über die Zuordnung. Dies ist infolge der hohen Baukosten einer Wärmeleitung und den Trassenverlusten, welche mit zunehmender Entfernung ansteigen, als sinnvoll zu erachten (vgl. Kapitel 3.2).

Das CO₂-Einsparpotenzial wurde über den solaren Deckungsgrad jeder Potenzialfläche für den zugewiesenen Wärmehotspot ermittelt. Dieses Potenzial würde jedoch überschätzt werden, wenn alle Potenzialflächen in die Rechnung einfließen würden. Deshalb wurde das CO₂-Einsparpotenzial für jeden Wärmehotspot nur über die Potenzialfläche mit dem höchsten solaren Deckungsgrad ermittelt. Des Weiteren liegen keine genauen Daten über die CO₂-Emissionen der Wärmehotspots im Kreis Borken vor, weshalb die theoretischen CO₂-Emissionen aller Wärmehotspots so berechnet wurden, als würden sie bereits jetzt über ein Wärmenetz auf Basis einer KWK-Anlage mit einem fossilen Energieträger mit Wärme versorgt werden. In Kapitel 3.1 wurde beschrieben, dass dezentrale Wärmeversorgungen tendenziell mehr CO₂ ausstoßen als die für die Berechnung angenommenen KWK-Anlagen. Zusätzlich wurde in diese Berechnung lediglich die Potenzialfläche mit dem höchsten solaren Deckungsgrad berücksichtigt. Folglich kann die Abschätzung des CO₂-Einsparpotenzials als

konservativ angesehen werden. Demzufolge kann davon ausgegangen werden, dass tendenziell mehr CO₂ durch die Versorgung der Wärmehotspots mit einem Wärmenetz der 4. Generation und einer FSA eingespart werden kann.

Wie in Kapitel 5 beschrieben, können Wärmespeicher dazu beitragen, die jahres- und tageszeitlichen Schwankungen des Wärmeertrages einer solarthermischen Anlage auszugleichen und die solare Wärmeenergie für kältere Jahreszeiten zu speichern. Da Wärmespeicher sehr genau geplant werden müssen, konnten sie im Rahmen dieser Arbeit nur am Rande betrachtet werden. Daher wurde der Flächenbedarf der Speicher in den Berechnungen nicht berücksichtigt. Dies ist insbesondere daher nicht möglich, da der Flächenbedarf der unterschiedlichen Bauweisen eines Wärmespeichers stark variiert. Beispielsweise ist es nicht auszuschließen, dass die Fläche oberhalb eines Erdsonden-Wärmespeichers ebenfalls für eine FSA genutzt werden kann. Daher ist nicht davon auszugehen, dass die Potenzialabschätzung durch Berücksichtigung des Flächenbedarfs der Speicher stark beeinflusst wird.

Abschließend ist zu sagen, dass eine Übertragbarkeit dieser Methodik auf andere Kreise in Nordrhein-Westfalen nur möglich ist, wenn eine Analyse möglicher Wärmevorrangzonen vorhanden ist. Diese Wärmehotspots könnten beispielsweise analog zu der Hotspot-Analyse der Fachhochschule Münster erhoben werden. Aber auch über das Wärmebedarfsmodell des LANUV NRW könnten Wärmevorrangzonen analysiert werden. Die Wärmehotspots wurden bislang für die Kreise Borken, Coesfeld, Steinfurt und Warendorf berechnet. Folglich könnte bereits jetzt für einen Großteil des Regierungsbezirkes Münster eine Potenzialabschätzung der FSA durchgeführt werden.

12 Fazit

Zu Beginn der vorliegenden Arbeit wurde die Frage aufgeworfen, wie das Potenzial solarthermischer Freiflächenanlagen für Wärmenetze der 4. Generation im Kreis Borken abgeschätzt werden kann.

Diese Frage ist im Rahmen dieser Arbeit von zentraler Bedeutung, da verschiedene erneuerbare Wärmequellen für das Land Nordrhein-Westfalen bereits analysiert wurden, unter diesen auch das solarthermische Dachflächenpotenzial. Dennoch wurde das solarthermische Freiflächenpotenzial bislang noch nicht für das Land Nordrhein-Westfalen und somit auch nicht für den Kreis Borken ermittelt. Dementsprechend wurde diese Methodik neu entwickelt. Hierfür wurden technische Grundvoraussetzungen und Mindestanforderungen, die rechtlichen Rahmenbedingungen und Förderprogramme berücksichtigt. Aus diesen wurden grundlegende Annahmen abgeleitet, welche die Basis der Potenzialabschätzung darstellen. Daraufhin wurden die Potenziale der FSA für jeden Wärmehotspot und jede Gemeinde im Kreis Borken abgeschätzt. Wichtig für die Potenzialabschätzung ist die räumliche Nähe zwischen Potenzialflächen und möglichen Verbrauchern. Um dies zu gewährleisten, wurden nur potenzielle Flächen berücksichtigt, welche maximal einen Kilometer von einem Wärmehotspot entfernt liegen. Die Herangehensweise wurde so gewählt, dass die Methodik auf andere Landkreise im Land Nordrhein-Westfalen übertragen werden kann. Um eine landesweite Potenzialabschätzung umzusetzen, bedarf es allerdings zweier Voranalysen. Zunächst einmal wäre es sinnvoll, für das gesamte Bundesland Wärmevorrangzonen zu ermitteln. Zusätzlich wäre eine Erhebung der Brach- und Konversationsflächen für das gesamte Bundesland von Vorteil, um die möglichen Potenziale dieses Flächentyps ebenfalls analysieren zu können. Ebenso müssen die Rahmenbedingungen der jeweiligen Regionalpläne berücksichtigt werden, damit die Analyse an die regionalen Besonderheiten angepasst werden kann.

Abschließend lässt sich sagen, dass die Methodik einen konservativen Ansatz verfolgt. Insbesondere bei der Berechnung des Gesamtwärmeertrags der Potenzialflächen und der Berechnung des CO₂-Einsparpotenzials wird dieser konservative Ansatz deutlich. Daher kann davon ausgegangen werden, dass die ermittelten Potenziale nicht überschätzt wurden und die gewählte Methodik für die Potenzialabschätzung der FSA im Kreis Borken als geeignet angesehen werden kann. Somit können diese

Berechnungen als Ausgangspunkt einer landesweiten Potenzialabschätzung solarthermischer Freiflächenanlagen in Nordrhein-Westfalen gesehen werden.

Des Weiteren befasst sich diese Arbeit mit der Frage, wie hoch das Potenzial solarthermischer Freiflächenanlagen für Wärmenetze der 4. Generation im Kreis Borken ist.

Da die in dieser Arbeit gewählte Methodik von der Verbraucherseite ausgeht, ist zu erwähnen, dass im Kreis Borken 88 Wärmehotspots liegen, für welche eine leitungsgebundene Wärmeversorgung als geeignet angesehen wird. Für insgesamt 57 dieser Wärmehotspots wurde mindestens eine Potenzialfläche für den Bau einer FSA ermittelt. So kann insgesamt 23 % des Gesamtwärmebedarfs für Raumwärme und Warmwasser des Kreises, durch Wärmenetze mit einem solarthermischen Anteil versorgt werden. Folglich sind die in dieser Arbeit ermittelten Potenziale ausreichend, um im Jahr 2030 15 % bis 21 % des Endenergiebedarfs für Raumwärme und Warmwasser durch Wärmenetze mit einem solarthermischen Anteil zu versorgen. Diese Forderung für das Jahr 2030 wurde in der Agorastudie zur Wärmewende 2030 aufgestellt, damit das Ziel von 95 % weniger Treibhausgasemissionen im Gebäudebereich bis zum Jahr 2050 erreicht werden kann.

Weiterhin konnten 323 Potenzialflächen für den Bau einer FSA ermittelt werden, welche insgesamt einen Gesamtwärmeertrag von 1.076 GWh/a erzeugen könnten. Wird die FSA mit dem höchsten solaren Deckungsgrad in das hypothetische Wärmenetz des jeweiligen Wärmehotspots eingespeist, können die CO₂-Emissionen aller Wärmehotspots im Kreis Borken um 21 % gesenkt werden. Somit könnte der Kreis Borken durch FSA 44.000 T/a CO₂ einsparen.

Allerdings variiert das Potenzial der FSA in den unterschiedlichen Gemeinden des Kreises stark. So ergibt sich, dass in den Gemeinden Schöppingen und Velen keine Wärmehotspots mit einer FSA und in den Gemeinden Gescher, Legden und Raesfeld alle Wärmehotspots zumindest anteilig mit einer FSA versorgt werden könnten. In den übrigen Gemeinden konnten Potenzialflächen ermittelt werden, doch nicht für jeden Wärmehotspot. Daher ist die Verteilung der Potenzialflächen im Kreis Borken heterogen.

Damit das ermittelte Potenzial im Kreis Borken umgesetzt werden kann, müssen neben den politischen Entscheidungsträgern auch die Anwohner von einer

leitungsgebundenen Wärmeversorgung überzeugt werden. Während ein Anschluss- und Benutzungszwang Anwohner verpflichten würde, sich an das Wärmenetz anzuschließen, bieten insbesondere Genossenschaften oder Bioenergiedörfer die Möglichkeit, dass Anwohner sich an den Wärmenetzen beteiligen und an Entscheidungen teilhaben dürfen.

Schlussendlich zeigen die Ergebnisse dieser Arbeit, dass die ermittelten Potenziale hoch genug sind, damit Wärmenetze der 4. Generation mit einem solarthermischen Anteil einen wichtigen Beitrag zur Wärmewende im Kreis Borken leisten können. Des Weiteren bietet die erarbeitete Methodik viele Grundlagen für eine landesweite Potenzialabschätzung in Nordrhein-Westfalen. Dementsprechend ist die Hoffnung groß, dass FSA für Wärmenetze der 4. Generation im Kreis Borken und im Land Nordrhein-Westfalen in Zukunft an Bedeutung gewinnen und die Wärmewende stärker in den politischen und gesellschaftlichen Fokus rückt.

13 Literatur

ALTMAYER, P. (2018): dena Energiewende Kongress 2018. URL: <https://www.dena-kongress.de/rueckblicke/rueckblick-2018/?type=90>, zuletzt geprüft am: 28.07.2020.

ARBEITSGEMEINSCHAFT DER VERMESSUNGSVERWALTUNGEN DER LÄNDER DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND (ADV) (2008): Dokumentation zur Modellierung der Geoinformationen des amtlichen Vermessungswesens (GeoInfoDok). ATKIS-Katalogwerke. ATKIS-Objektartenkatalog Basis-DLM NRW - Erfassung. URL: https://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk_internet/geobasis/landschaftsmodelle/basis_dlm/index.html, zuletzt geprüft am: 17.07.2020.

ARBEITSGEMEINSCHAFT ENERGIEBILANZEN (AGEB) (2020): Endenergieverbrauch in Deutschland. Nach Sektoren - Anteile in Prozent 2018. Eigenverlag, Berlin, Bergheim.

BEZIRKSREGIERUNG KÖLN (2020A): 3D-Messdaten. URL: https://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk_internet/geobasis/hoeihenmodelle/3d-messdaten/index.html, zuletzt geprüft am: 29.06.2020.

BEZIRKSREGIERUNG KÖLN (2020B): Digitales Basis-Landschaftsmodell. URL: https://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk_internet/geobasis/landschaftsmodelle/basis_dlm/index.html, zuletzt geprüft am: 29.06.2020.

BEZIRKSREGIERUNG MÜNSTER (2016): Regionalplan Münster. Sachlicher Teilplan "Energie". URL: https://www.bezreg-muenster.de/zentralablage/dokumente/regionalplanung/teilplan_energie/001-01_STE_Text.pdf, zuletzt geprüft am: 24.08.2020.

BUNDESAMT FÜR KARTOGRAPHIE UND GEODÄSIE (BKG) (2020): Verwaltungsgebiete 1:250 000 (Kompakt, Stand 01.01. (VG250 01.01.)). URL: <https://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/open-data/verwaltungsgebiete-1-250-000-kompakt-stand-01-01-vg250-kompakt-01-01.html>, zuletzt geprüft am: 24.06.2020.

BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND NUKLEARE SICHERHEIT (BMU) (2019): Klimaschutzplan 2050. Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. 2. Aufl. Druck- und Verlagshaus Zarbock GmbH & Co. KG, Berlin.

- BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE (BMWi) (2015):** Energieeffizienzstrategie Gebäude. Wege zu einem nahezu klimaneutralen Gebäudebestand. Schöne Drucksachen GmbH, Berlin.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE (BMWi) (2019):** Förderbekanntmachung zu den Modellvorhaben Wärmenetzsysteme 4.0. Wärmenetze 4.0 – Bundesförderung effiziente Wärmenetze. Vom 11. Dezember 2019. Bundesanzeiger Verlag, Berlin.
- DER ENERGIEEFFIZIENZVERBAND FÜR WÄRME, KÄLTE UND KWK E.V. (AGFW) (2013):** Transformationsstrategien Fernwärme. TRAFÖ - Ein Gemeinschaftsprojekt von ifeu-Institut, GEF Ingenieur AG und AGFW. AGFW-Projektgesellschaft für Rationalisierung, Information und Standardisierung mbH, Frankfurt am Main (Forschung und Entwicklung / AGFW, 24).
- ENTSORGUNGSGESELLSCHAFT WESTMÜNSTERLAND MBH (EGW) (2020):** Deponiestandorte. Eine saubere Sache. URL: <https://www.egw.de/anlagen-standorte/deponiestandorte/>, zuletzt geprüft am: 28.06.2020.
- ESCH, T.; TAUBENBÖCK, H.; GEIB, C.; SCHILLINGS, C.; NAST, M.; METZ, A.; HELDENS, W.; KEIL, M. (2011):** Potenzialanalyse zum Aufbau von Wärmenetzen unter Auswertung siedlungsstruktureller Merkmale. Endbericht zum Vorhaben. Eigenverlag, Oberpfaffenhofen.
- FACHHOCHSCHULE MÜNSTER (2015):** Wiefm Effizienz-Dashbord. Kreis Borken. URL: <http://www.wiefm.eu/wp-content/uploads/2017/05/Dashboard-Kreis-Borken.pdf>, zuletzt geprüft am: 22.06.2020.
- FRAUNHOFER INSTITUT FÜR WINDENERGIE UND ENERGIESYSTEMTECHNIK (IWES) & FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR BAUPHYSIK (IBP) (2017):** Wärmewende 2030. Schlüsseltechnologien zur Erreichung der mittel- und langfristigen Klimaschutzziele im Gebäudesektor. Studie im Auftrag von Agora Energiewende. Eigenverlag, Berlin.
- GEOPORTAL.NRW (2020):** 3D-Messdaten Laserscanning (LAS). Paketierung: Einzelkacheln. URL: https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/geobasis/hm/3dm_1_las/3dm_1_las/, zuletzt geprüft am: 29.06.2020.
- INFORMATION UND TECHNIK NORDRHEIN-WESTFALEN (IT.NRW) (2020A):** Digitales Basis-Landschaftsmodell. Paketierung: gesamt NRW. URL: <https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/geobasis/lm/basis-dlm/>, zuletzt geprüft am: 28.06.2020.

- INFORMATION UND TECHNIK NORDRHEIN-WESTFALEN (IT.NRW) (2020B):** Landschaftsinformationssammlung (LINFOS) NRW. URL: https://www.opengeo-data.nrw.de/produkte/umwelt_klima/naturschutz/linfos/, zuletzt geprüft am: 28.06.2020.
- KIRCHNER, J.; PEHNT, M.; THAMLING, N. (2015):** Hintergrundpapier zur Energieeffizienzstrategie Gebäude. Erstellt im Rahmen der Wissenschaftlichen Begleitforschung zur Erarbeitung einer Energieeffizienzstrategie Gebäude. Eigenverlag, Berlin, Heidelberg, Darmstadt.
- KREDITANSTALT FÜR WIEDERAUFBAU (KfW) (2019):** Antrag auf Gewährung eines Tilgungszuschusses im Programm 271, 281. KfW-Programm Erneuerbare Energien "Premium". URL: [https://www.kfw.de/Download-Center/F%C3%B6rderprogramme-\(Inlandsf%C3%B6rderung\)/PDF-Dokumente/6000000204-Antrag-Zuschuss-271-281.pdf](https://www.kfw.de/Download-Center/F%C3%B6rderprogramme-(Inlandsf%C3%B6rderung)/PDF-Dokumente/6000000204-Antrag-Zuschuss-271-281.pdf), zuletzt geprüft am: 24.06.2020.
- KREDITANSTALT FÜR WIEDERAUFBAU (KfW) (2020):** Merkblatt Erneuerbare Energien "Premium". URL: [https://www.kfw.de/Download-Center/F%C3%B6rderprogramme-\(Inlandsf%C3%B6rderung\)/PDF-Dokumente/60000002410-Merkblatt-271-281-272-282.pdf](https://www.kfw.de/Download-Center/F%C3%B6rderprogramme-(Inlandsf%C3%B6rderung)/PDF-Dokumente/60000002410-Merkblatt-271-281-272-282.pdf), zuletzt geprüft am: 24.06.2020.
- KREIS BORKEN (2019):** Zahlen und Fakten 2019-2020. URL: <https://kreis-borken.de/de/service/kreisverwaltung/statistik/statistik-der-kreis-borken-in-zahlen/>, zuletzt geprüft am: 17.06.2020.
- LANDESAMT FÜR NATUR, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ NORDRHEIN-WESTFALEN (LANUV NRW) (2013):** Potenzialstudie Erneuerbare Energien NRW. Teil 2 - Solarenergie. LANUV- Fachbericht 40. Eigenverlag, Recklinghausen.
- LANDESAMT FÜR NATUR, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ NORDRHEIN-WESTFALEN (LANUV NRW) (2014):** Potenzialstudie Erneuerbare Energien NRW. Teil 3 - Biomasse-Energie. LANUV- Fachbericht 40. Eigenverlag, Recklinghausen.
- LANDESAMT FÜR NATUR, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ NORDRHEIN-WESTFALEN (LANUV NRW) (2015A):** Leitfaden zur Erfassung von Brachflächen in Nordrhein-Westfalen. LANUV-Arbeitsblatt 26. Eigenverlag, Recklinghausen.
- LANDESAMT FÜR NATUR, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ NORDRHEIN-WESTFALEN (LANUV NRW) (2015B):** Potenzialstudie Erneuerbare Energien

NRW. Teil 4 - Geothermie. LANUV-Fachbericht 40. Eigenverlag, Recklinghausen.

**LANDESAMT FÜR NATUR, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ NORDRHEIN-
WESTFALEN (LANUV NRW) (2019):** Potenzialstudie Industrielle Abwärme.
LANUV-Fachbericht 96. Eigenverlag, Recklinghausen.

**LANDESAMT FÜR NATUR, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ NORDRHEIN-
WESTFALEN (LANUV NRW) (2020A):** Energieatlas NRW. Solarkataster. URL:
https://www.energieatlas.nrw.de/site/karte_solarkataster, zuletzt geprüft am:
12.08.2020.

**LANDESAMT FÜR NATUR, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ NORDRHEIN-
WESTFALEN (LANUV NRW) (2020B):** Gebäudescharfes Wärmebedarfsmodell.
je Hausumring. Datensatz.

**LANDESAMT FÜR NATUR, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ NORDRHEIN-
WESTFALEN (LANUV NRW) (2020C):** Globalstrahlung und Sonnenscheindauer.
der Klimanormalperiode 1981 bis 2010. Datensatz.

**LANDESAMT FÜR NATUR, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ NORDRHEIN-
WESTFALEN (LANUV NRW) (2020D):** Klimaatlas NRW. Karten. URL:
<https://www.klimaatlas.nrw.de/karte-klimaatlas>, zuletzt geprüft am: 28.08.2020.

**LANDESAMT FÜR NATUR, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ NORDRHEIN-
WESTFALEN (LANUV NRW) (2020E):** Wärmehotspots. aus dem des
INTERREG-VA-Projekt „Wärme in der Euregio: fokussieren & modernisieren“
(WiEfm) der Fachhochschule Münster. Datensatz.

LANDESREGIERUNG NORDRHEIN-WESTFALEN (2019): Verordnung zur Änderung
der Verordnung über den Landesentwicklungsplan. Vom 12.07.2019. URL:
https://recht.nrw.de/lmi/owa/br_vbl_detail_text?anw_nr=6&vd_id=17882, zuletzt
geprüft am: 18.07.2020.

LASK, A. & GÜLKER, E. (2014): Klimaschutzkonzept für den Kreis Borken 2014.
Eigenverlag, Borken.

**MAGOLD, D.; MIEDANER, O.; TZIGGILI, E. P.; SCHMIDT, T.; UNTERBERGER, M.;
ZEH, B. (2012):** Technisch-wirtschaftliche Analyse und Weiterentwicklung der
solaren Langzeit-Wärmespeicherung. Wissenschaftlich- Technische Programm-
begleitung für Solarthermie2000Plus. Forschungsbericht zum BMU-Vorhaben
0329607N. Eigenverlag, Stuttgart.

- MIEDANER, O., PAUSCHINGER, T., DALENBÄCK, J.-O. (2012):** Categories of solar district heating systems. Fact sheet 6.1. In: Solar district heating (SDH) (Hrsg.): Solar district heating guidelines: Collection of fact sheets 2012, S. 87–90.
- MINISTERIUMS FÜR WIRTSCHAFT, INNOVATION, DIGITALISIERUNG UND ENERGIE DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN (MWIDE) (2020A):** progres.nrw – Markteinführung 2020 Anlage zur Richtlinie. Anlage zur Richtlinie. URL: https://www.bezreg-arnsberg.nrw.de/themen/p/progres_nrw_markteinfuehrung_breitenprogramm/foerdergrundlagen/richtlinie_progresnrw_markeinfuehrung_anhang.pdf, zuletzt geprüft am: 02.06.2020.
- MINISTERIUMS FÜR WIRTSCHAFT, INNOVATION, DIGITALISIERUNG UND ENERGIE DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN (MWIDE) (2020B):** Richtlinie über die Gewährung von Zuwendungen aus dem „Programm für Rationelle Energieverwendung, Regenerative Energien und Energiesparen“ (progres.nrw) – Programmbereich Markteinführung. progres.nrw-Markteinführung 2020. URL: https://www.bezreg-arnsberg.nrw.de/themen/p/progres_nrw_markteinfuehrung_breitenprogramm/foerdergrundlagen/richtlinie_progresnrw_markeinfuehrung.pdf, zuletzt geprüft am: 20.08.2020.
- NIELSEN, J. E., BATTISTI, R. (2012):** Feasibility study. Fact sheet 2.3. In: Solar district heating (SDH) (Hrsg.): Solar district heating guidelines: Collection of fact sheets 2012, S. 21–31.
- NITSCH, J.; PREGGER, T.; NAEGLER, T.; HEIDE, D.; LUCA DE TENA, D.; TRIEB, F.; SCHOLZ, Y.; NIENHAUS, K.; GERHARDT, N.; STERNER, M.; TROST, T.; VON OEHSEN, A.; SCHWINN, R.; PAPE, C.; HAHN, H.; WICKERT, M.; WENZEL, B. (2012):** Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. Schlussbericht BMU-FKZ 03MAP146. URL: https://www.dlr.de/dlr/Portaldata/1/Resources/bilder/portal/portal_2012_1/leitstudie2011_bf.pdf, zuletzt geprüft am: 12.07.2020.
- PEHNT, M. (2017):** Wärmenetzsysteme 4.0. Endbericht - Kurzstudie zur Umsetzung der Maßnahme "Modellvorhaben erneuerbare Energien in hocheffizienten Niedertemperaturwärmenetzen. Eigenverlag, Heidelberg, Berlin, Düsseldorf, Köln.
- PFNÜR, A.; WINIEWSKA, B.; MAILACH, B.; OSCHATZ, B. (2016):** Dezentrale vs. zentrale Wärmeversorgung im deutschen Wärmemarkt. Vergleichende Studie aus energetischer und ökonomischer Sicht. Eigenverlag, Darmstadt, Dresden.

- QUASCHNING, V. (2019):** Regenerative Energiesysteme. Technologie – Berechnung – Klimaschutz. 10. Aufl. Hanser-Verlag, München.
- SCHMIDT, T., MIEDANER, O. (2012):** Storage. Fact sheet 7.2. In: Solar district heating (SDH) (Hrsg.): Solar district heating guidelines: Collection of fact sheets 2012, S. 117–129.
- SCHNELLER, A.; FRANK, L.; TÖPFER, K. (2017):** Wärmenetze 4.0 im Kontext der Wärmewende. Analyse der Regelungs- und Förderlandschaft innovativer Wärmenetzsysteme. Eigenverlag, Berlin.
- SORENSEN, P. A. (2012):** Where to place the solar collectors. Fact sheet 2.2. In: Solar district heating (SDH) (Hrsg.): Solar district heating guidelines: Collection of fact sheets 2012, S. 13–20.
- SORENSEN, P. A., STEINBEIS FORSCHUNGSINSTITUT FÜR SOLARE UND ZUKUNFTSFÄHIGE THERMISCHE ENERGIESYSTEME (SOLITES) (2012):** Ownership and financing. Fact sheet 2.5. In: Solar district heating (SDH) (Hrsg.): Solar district heating guidelines: Collection of fact sheets 2012, S. 38–45.
- STÄDTE- UND GEMEINDEBUND NORDRHEIN-WESTFALEN (STGB NRW) (2019):** Leitfaden zur Erfassung von Brachflächen in NRW. STGB NRW-Mitteilung 158/2019 vom 05.03.2019. URL: <https://www.kommunen.nrw/informationen/mitteilungen/datenbank/detailansicht/dokument/leitfaden-zur-erfassung-von-brachflaechen-in-nrw-1.html>, zuletzt geprüft am: 28.06.2020.
- STEINBEIS FORSCHUNGSINSTITUT FÜR SOLARE UND ZUKUNFTSFÄHIGE THERMISCHE ENERGIESYSTEME (SOLITES) (2015):** Solare Wärmenetze für Baden-Württemberg. Grundlagen | Potenziale | Strategien. URL: https://www.hamburg-institut.com/images/pdf/forschungsberichte/150701_SolnetBW_web.pdf, zuletzt geprüft am: 01.06.2020.
- STEINBEIS FORSCHUNGSINSTITUT FÜR SOLARE UND ZUKUNFTSFÄHIGE THERMISCHE ENERGIESYSTEME (SOLITES) (2016):** www.saisonalspeicher.de. URL: <http://www.saisonalspeicher.de/Speichertypen/%C3%9Cber-sicht/tabid/107/Default.aspx>, zuletzt geprüft am: 13.05.2020.
- STEINBEIS FORSCHUNGSINSTITUT FÜR SOLARE UND ZUKUNFTSFÄHIGE THERMISCHE ENERGIESYSTEME (SOLITES) (2020):** Central SDH system. URL: https://sdh-online.solites.de/Content/sites/CentralInfo_en.html, zuletzt geprüft am: 16.08.2020.

- STIEGLITZ, R. & HEINZEL, V. (2012):** Thermische Solarenergie. Grundlagen. Technologie. Anwendungen. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg.
- STREICHER, W. (2013A):** Solarthermische Wärmenutzung. Physikalische Grundlagen. In: Kaltschmitt, M., Streicher, W., Wiese, A. (Hrsg.): Erneuerbare Energien: Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte, Berlin, Heidelberg 2013, S. 181–191.
- STREICHER, W., STEGELMEIER, M., KALTSCHMITT, M. (2013B):** Systemtechnische Beschreibung. In: Kaltschmitt, M., Streicher, W., Wiese, A. (Hrsg.): Erneuerbare Energien: Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte, Berlin, Heidelberg 2013, S. 191–229.
- TRIER, D. (2012):** Solar collectors. Fact sheet 7.1. In: Solar district heating (SDH) (Hrsg.): Solar district heating guidelines: Collection of fact sheets 2012, S. 101–116.
- TRIER, D.; BAVA, F.; SKOV, C. K.; SORENSEN, S. S. (2018):** Solar District heating trends and possibilities. Characteristics of ground-mounted systems for screening of land use requirements and feasibility. Technical Report of IEA SHC Task 52, Subtask B – Methodologies, Tools and Case studies for Urban Energy concepts. Eigenverlag, Kopenhagen.
- VERBRAUCHERZENTRALE BUNDESVERBAND E.V. (VZBV) (2016):** Fernwärme – Notwendige Reformen des Monoporsektors. Positionspapier des Verbraucherzentrale Bundesverbandes e.V. (VZBV) anlässlich der gemeinsamen Pressekonferenz am 24. Februar 2016 mit dem Deutschen Mieterbund e.V. (DMB) und dem Bundesverband neue Energiewirtschaft e.V. (bne). Eigenverlag, Berlin.
- WESSELAK, V.; SCHABBACH, T.; LINK, T.; FISCHER, J. (2013):** Regenerative Energietechnik. 2. Aufl. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg.
- WETTER, C.; BRÜGGING, E.; WILLENBRINK, H.; RUSSELL-WELLS, K.; KÄUFLER, C. (2019):** Wärmenetze im Münsterland. Grundlagen für kommunalspezifische Entscheidungsstrategien. Erstellt im Rahmen des Projektes Wärme in der EUREGIO --- fokussieren & modernisieren (WiEfm). URL: <http://www.wiefm.eu/wp-content/uploads/2019/02/W%C3%A4rmenetze-im-M%C3%BCnsterland-Entscheidungsstrategien-f%C3%BCr-Kommunen.pdf>, zuletzt geprüft am: 20.08.2020.