

Würzburger  
Geographische  
Arbeiten

Julius-Maximilians-

**UNIVERSITÄT  
WÜRZBURG**

**Band 109**

Susanne Linder

Räumliche Diffusion  
von Photovoltaik-Anlagen  
in Baden-Württemberg

2013

Die Schriftenreihe Würzburger Geographische Arbeiten wird vom Institut für Geographie und Geologie zusammen mit der Geographischen Gesellschaft herausgegeben. Die Beiträge umfassen mit wirtschafts-, sozial- und naturwissenschaftlichen Forschungsperspektiven die gesamte thematische Bandbreite der Geographie. Der erste Band der Reihe wurde bereits 1953 herausgegeben

Prof. Dr. Roland Baumhauer  
Prof. Dr. Barbara Hahn  
Prof. Dr. Hubert Job  
Prof. Dr. Heiko Paeth  
Prof. Dr. Jürgen Rauh  
Prof. Dr. Birgit Terhorst

Julius-Maximilians-Universität Würzburg  
Institut für Geographie und Geologie  
Am Hubland  
D-97074 Würzburg  
<http://www.geographie.uni-wuerzburg.de>

Dieses Dokument wird bereitgestellt  
durch den Publikationsservice der  
Universität Würzburg.

Universitätsbibliothek Würzburg  
Am Hubland  
D-97074 Würzburg  
<http://opus.bibliothek.uni-wuerzburg.de>  
[opus@bibliothek.uni-wuerzburg.de](mailto:opus@bibliothek.uni-wuerzburg.de)

ISSN 0510-9833  
eISSN: 2194-3656

© Institut für Geographie und Geologie,  
JMU Würzburg, 2013

Zitation dieser Publikation:

Linder, Susanne (2013): Räumliche Diffusion von Photovoltaik-Anlagen  
in Baden-Württemberg.

Würzburger Geographische Arbeiten, Band 109. Würzburg: Universität Würzburg  
URN: [urn:nbn:de:bvb:20-opus-77789](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bvb:20-opus-77789)

Susanne Linder

Räumliche Diffusion  
von Photovoltaik-Anlagen  
in Baden-Württemberg



WÜRZBURGER GEOGRAPHISCHE ARBEITEN  
Mitteilungen der Geographischen Gesellschaft Würzburg

Herausgeber:

R. Baumhauer, B. Hahn, H. Job, H. Paeth, J. Rauh, B. Terhorst

Band 109

Susanne Linder

# Räumliche Diffusion von Photovoltaik-Anlagen in Baden-Württemberg

2013

# Würzburger Geographische Arbeiten

Herausgegeben vom Institut für Geographie und Geologie der Universität  
Würzburg in Verbindung mit der Geographischen Gesellschaft Würzburg

Herausgeber: R. Baumhauer, B. Hahn, H. Job, H. Paeth, J. Rauh, B. Terhorst

Schriftleitung: R. Klein

Julius-Maximilians-Universität Würzburg  
Institut für Geographie und Geologie  
Am Hubland  
D-97074 Würzburg  
[www.geographie.uni-wuerzburg.de](http://www.geographie.uni-wuerzburg.de)

© Institut für Geographie und Geologie, JMU Würzburg, 2013

# Danksagung

ICH DANKE . . .

- PD Dr. Ralf Klein für die Betreuung der Doktorarbeit und seine konstruktive Kritik. Prof. Dr. Jürgen Rauh danke ich für die Übernahme des Zweitgutachtens und Prof. Dr. Heiko Paeth für sein offenes Ohr bei Statistikfragen. Mein Dank gilt auch dem Kartographen Winfried Weber für die Unterstützung bei der graphischen Darstellung meiner Arbeit.
- dem Management des Europäischen Instituts für Energieforschung (EIFER) für die Ermöglichung meiner Doktorarbeit während der Tätigkeit am Institut. Besonderer Dank gilt meinen Gruppenleitern der letzten drei Jahre, Pablo Viejo Garcia, Boris Al-Nasrawi und Andreas Koch, die mir parallel zur Projektarbeit freie Zeit für meine Doktorarbeit zugestanden haben. Gemeinsam mit Pablo ist die Idee für das Thema dieser Arbeit entstanden. Er gab mir die Neugierde und Freude am Entdecken mit auf den Weg und hat mir gezeigt, wie man sich auf spielerische Art „ganz einfach“ neuen Themen und Methoden nähert.
- meinen Kollegen und Freunden am EIFER für das entspannte Arbeitsumfeld und besonders Monjur Syed Murshed und Jean-Marie Bahu für die gute Laune im Büro und die Rücksichtnahme während anstrengender Phasen der Arbeit. Des Weiteren danke ich Florian Stein für die gute Zusammenarbeit während seiner Diplomarbeit beim EIFER. Bedanken möchte ich mich auch bei Andreas Huber, Ines Mayer, Ulrike Strauch und Johannes Wirges für die zahlreichen Diskussionen zum Thema, konstruktives gemeinsames Nachdenken und das Korrekturlesen. Besonderer Dank gilt meinen Freundinnen Ines und Ulrike, die immer ein offenes Ohr für meine Anliegen hatten und mich immer wieder erfolgreich motivieren konnten.
- den Geographen Michael Bentlage und Christian Schultheiss vom Lehrstuhl für Raumentwicklung der TU München. Michael danke ich für das gemeinsame Durchforsten des Statistik-Dschungels – zu zweit macht's einfach mehr Spaß! Christian danke ich für die Unterstützung bei der Programmierung meiner Diffusionsmodelle in R.
- meinem Bruder Florian Linder, der mich dem Universum der Mathematik näher gebracht hat. Durch seine mathematische Unterstützung konnte ich die letzten Hürden der Doktorarbeit nehmen.
- meinen Eltern für ihre Großzügigkeit und ihre Gabe, jedes von uns Kindern in seiner Art zu fördern.
- meinem Freund Gustl, dem es immer gelungen ist, mich in schweren Zeiten wieder aufzubauen und der mir oft gezeigt hat, dass es andere spannende Dinge im Leben gibt. Jetzt freue ich mich auf neue, gemeinsame Projekte – der VW-Bus steht vor der Tür: Auf geht's in die Berge!

Freiburg, im April 2013

Susanne Linder





# Inhaltsverzeichnis

|  |           |
|--|-----------|
| Inhaltsverzeichnis .....   | I         |
| Abbildungsverzeichnis .....  | V         |
| Kartenverzeichnis .....  | VII       |
| Tabellenverzeichnis .....  | VIII      |
| Abkürzungsverzeichnis .....  | X         |
| Symbolverzeichnis .....  | XI        |
| <br>   |           |
| <b>1 Einleitung .....</b>  | <b>1</b>  |
| <br>   |           |
| <b>2 Photovoltaik – von der Innovation zur Diffusion .....</b>   | <b>4</b>  |
| 2.1 Definitionen .....   | 4         |
| 2.1.1 Photovoltaik-Anlagen .....   | 4         |
| 2.1.2 Innovation .....   | 5         |
| 2.1.3 Diffusion .....  | 7         |
| 2.2 Entwicklung der PV-Nutzung in Deutschland: Von der technologischen<br>Nische zum Massenprodukt ..... | 7         |
| 2.2.1 Die PV-Anlage als Innovation .....   | 9         |
| 2.2.2 Die PV-Diffusionsphase .....   | 11        |
| <br>   |           |
| <b>3 Theorie der Diffusion von Innovationen .....</b>  | <b>13</b> |
| 3.1 Klassische Diffusionstheorie .....   | 13        |
| 3.1.1 Ursprung und Ziele der klassischen Diffusionsforschung .....                                       | 13        |
| 3.1.2 Der Adoptionsprozess .....   | 14        |
| 3.1.2.1 Produktspezifische Einflussfaktoren .....  | 15        |
| 3.1.2.2 Adopterspezifische Einflussfaktoren .....  | 18        |
| 3.1.2.3 Umweltspezifische Einflussfaktoren .....   | 18        |
| 3.1.3 Der Diffusionsprozess .....  | 18        |
| 3.1.3.1 Kommunikationskanäle und soziales System .....   | 19        |
| 3.1.3.2 Die Bedeutung der Zeit im Diffusionsprozess .....  | 20        |
| 3.2 Theorie der räumlichen Diffusion von Innovationen .....  | 23        |
| 3.2.1 Entwicklung der geographischen Diffusionsforschung .....   | 24        |
| 3.2.2 Die Primärtheorie der räumlichen Diffusion nach T. Hägerstrand .....                               | 24        |
| 3.2.2.1 Das Grundkonzept .....   | 25        |
| 3.2.2.2 Modellierung der Diffusion .....   | 25        |
| 3.2.2.3 Empirische Regelmäßigkeiten und das Phasenmodell<br>der Diffusion .....                          | 26        |
| 3.2.3 Kritik und Erweiterungen der Theorie .....   | 29        |
| <br>   |           |
| <b>4 Modellierung der Diffusion von Innovationen .....</b>   | <b>31</b> |
| 4.1 Einführung in die Diffusionsmodellierung .....   | 31        |
| 4.2 Das exponentielle Diffusionsmodell .....   | 33        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 4.3      | Das logistische Diffusionsmodell .....  | 34        |
| 4.4      | Das semilogistische Diffusionsmodell .....  | 36        |
| 4.5      | Kritik am Bass-Modell und Modellerweiterungen .....   | 38        |
| 4.6      | Modellierung der räumlichen Diffusion.....  | 40        |
| <b>5</b> | <b>Stand der Forschung zur Diffusion von Innovationen .....</b>   | <b>43</b> |
| 5.1      | Studien zur Diffusion Erneuerbarer-Energie-Technologien.....  | 43        |
| 5.1.1    | Perspektive des sozialen Verhaltens .....   | 43        |
| 5.1.2    | Systemperspektive und Lernkurvenansatz .....  | 45        |
| 5.1.3    | Einfluss politischer Instrumente auf die Diffusion Erneuerbarer-<br>Energie-Technologien.....                   | 46        |
| 5.1.4    | Modellierung der Diffusion Erneuerbarer-Energie-Technologien.....   | 47        |
| 5.2      | Studien zur räumlichen Diffusion von Innovationen.....  | 50        |
| 5.2.1    | Modellierung der räumlichen Diffusion von Innovationen<br>auf Basis aggregierter Daten.....                     | 51        |
| 5.2.2    | Modellierung der räumlichen Diffusion von Innovationen<br>unter Berücksichtigung des Nachbarschaftseffekts..... | 52        |
| 5.3      | Fazit und Vorgehen der empirischen Untersuchung .....   | 55        |
| <b>6</b> | <b>Räumliche Unterschiede in der PV-Nutzung in Baden-Württemberg.....</b>                                       | <b>58</b> |
| 6.1      | Datengrundlage.....   | 58        |
| 6.1.1    | PV-Anlagen in Baden-Württemberg.....  | 58        |
| 6.1.2    | Daten auf Gemeindeebene.....  | 61        |
| 6.1.2.1  | Sozioökonomische Daten.....   | 61        |
| 6.1.2.2  | Globalstrahlungsdaten.....  | 62        |
| 6.1.2.3  | Daten zu den Raumkategorien .....   | 62        |
| 6.2      | Entwicklung und räumliche Verteilung der PV-Nutzung .....   | 64        |
| 6.3      | Räumliche Clusterung von PV-Anlagen in Baden-Württemberg .....  | 69        |
| 6.3.1    | Analyse der räumlichen Autokorrelation .....  | 69        |
| 6.3.1.1  | Globale räumliche Autokorrelation .....   | 70        |
| 6.3.1.2  | Lokale räumliche Autokorrelation.....   | 72        |
| 6.3.1.3  | Anwendungsbereiche .....  | 75        |
| 6.3.2    | Hot Spots und Cold Spots von PV-Anlagen in Baden-Württemberg ..   | 76        |
| 6.3.2.1  | Analyse der räumlichen Autokorrelation von<br>PV-Anlagen auf Gemeindeebene .....                                | 76        |
| 6.3.2.2  | Ergebnisse der Clusteranalyse .....   | 78        |
| 6.3.3    | Fazit der Clusteranalyse.....   | 81        |
| 6.4      | Ursachen für die räumlichen Unterschiede in der PV-Nutzung auf<br>Gemeinde-Ebene .....                          | 84        |
| 6.4.1    | Räumliche Regressionsanalyse .....  | 84        |
| 6.4.1.1  | Räumliche Abhängigkeiten als inhärente Struktur .....   | 85        |
| 6.4.1.2  | Anwendungsbereiche .....  | 86        |
| 6.4.1.3  | Das <i>Spatial Lag Model</i> .....  | 86        |
| 6.4.2    | Sozioökonomische Einflussfaktoren und die Bedeutung<br>der Nachbarschaft.....                                   | 87        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 6.4.2.1  | Modellspezifikation.....  | 87         |
| 6.4.2.2  | Ergebnisse der Regressionsanalyse.....  | 90         |
| 6.5      | Fazit .....   | 94         |
| <b>7</b> | <b>Diffusion von PV-Anlagen in der Region Heilbronn-Franken –<br/>eine Fallstudie</b> .....     | <b>96</b>  |
| 7.1      | Der PV-Diffusionsprozess aus Sicht der Akteure .....  | 96         |
| 7.1.1    | Experteninterviews der Akteure.....   | 98         |
| 7.1.2    | Die Rolle der einzelnen Akteure im Diffusionsprozess .....                                      | 100        |
| 7.1.3    | Ursachen für räumliche Unterschiede in der PV-Nutzung .....                                     | 107        |
| 7.1.4    | Die Bedeutung des Nachbarschaftseffekts.....  | 110        |
| 7.2      | Einflussfaktoren auf die PV-Diffusion am Beispiel der Gemeinden<br>Creglingen und Dörzbach..... | 111        |
| 7.2.1    | Auswahl der Gemeinden für die Haushaltsbefragung.....   | 112        |
| 7.2.2    | Befragung, Rücklaufquote und Auswertungsmethodik.....   | 115        |
| 7.2.3    | Einflussfaktoren auf die individuelle Adoptionsentscheidung .....                               | 117        |
| 7.2.4    | Ursachen für die Unterschiede in der PV-Nutzung in<br>Creglingen und Dörzbach.....              | 121        |
| 7.3      | Fazit .....   | 125        |
| <b>8</b> | <b>Räumliche Diffusion von PV-Anlagen in Baden-Württemberg<br/>von 2000 bis 2030</b> .....      | <b>127</b> |
| 8.1      | Modellierung der Diffusion von PV-Anlagen .....   | 127        |
| 8.1.1    | Das Bass-Modell der PV-Diffusion.....   | 129        |
| 8.1.2    | Schätzung des Innovations- und Imitationskoeffizienten .....                                    | 130        |
| 8.1.3    | Bestimmung des Marktpotentials.....   | 131        |
| 8.1.4    | Beurteilung der Modellgüte und Validierung der<br>Schätzung .....                               | 134        |
| 8.1.5    | Datengrundlage und Auswertung .....   | 135        |
| 8.2      | Räumliche Unterschiede in der Diffusion von PV-Anlagen von<br>2000 bis 2030 .....               | 135        |
| 8.2.1    | Raumkategorien im Vergleich .....   | 136        |
| 8.2.1.1  | Unterschiede in Adoptions- und Diffusionskurven .....   | 136        |
| 8.2.1.2  | Unterschiede im Innovations- und Imitationseffekt .....   | 138        |
| 8.2.2    | Typisierung der Gemeinden nach Innovations- und<br>Imitationseffekt .....                       | 141        |
| 8.3      | Räumlicher Nachbarschaftseffekt zwischen den Gemeinden.....                                     | 144        |
| 8.3.1    | Lösungsansatz zur Modellierung des Nachbarschaftseffekts<br>zwischen Gemeinden .....            | 144        |
| 8.3.2    | Hot Spots und Cold Spots im Vergleich.....  | 146        |
| 8.3.3    | Vergleich der Hot Spot-Gemeinden mit den übrigen<br>Gemeinden des ländlichen Raums .....        | 150        |
| 8.4      | Fazit .....   | 152        |
| <b>9</b> | <b>Synthese</b> .....   | <b>153</b> |

|   |            |
|---|------------|
| <b>10 Diskussion .....</b>                            | <b>155</b> |
| 10.1 Datenqualität .....                              | 155        |
| 10.2 Methodik .....                                   | 155        |
| 10.3 Ergebnisse .....                                 | 158        |
| <br>  |            |
| <b>11 Schlussbetrachtung und Ausblick.....</b>        | <b>160</b> |
| <br>  |            |
| Zusammenfassung.....                                  | 162        |
| Summary .....   | 164        |
| Literaturverzeichnis.....                             | 166        |
| Anhang 1: Diskriptive Statistik der PV-Daten.....     | 180        |
| Anhang 2: Analyse der räumlichen Autokorrelation..... | 182        |
| Anhang 3: Räumliche Regressionsanalyse.....           | 185        |
| Anhang 4: Haushaltsbefragung.....                     | 190        |
| Anhang 5: Modellierung der PV-Diffusion.....          | 199        |

# Abbildungsverzeichnis

|          |  |     |
|----------|--|-----|
| Abb. 1:  | Aufbau der Arbeit .....  | 3   |
| Abb. 2:  | Neu installierte PV-Leistung in Deutschland seit Beginn des EEG im Jahr 2000 .....                         | 8   |
| Abb. 3:  | Installierte Leistung von PV-Anlagen in kWp pro 1000 EW in den deutschen Bundesländern .....               | 8   |
| Abb. 4:  | Determinanten des Adoptionsprozesses .....   | 15  |
| Abb. 5:  | Adopter-Kategorien im Diffusionsprozess (Adoptionskurve).....  | 21  |
| Abb. 6:  | Kumulative Betrachtung der Adoptionsereignisse (Diffusionskurve) ...                                       | 21  |
| Abb. 7:  | Das Mean Information Field (MIF) im Diffusionsmodell .....   | 26  |
| Abb. 8:  | Der Hierarchieeffekt der räumlichen Diffusion.....   | 27  |
| Abb. 9:  | Diffusionswellen in Raum und Zeit .....  | 28  |
| Abb. 10: | Die exponentielle Diffusionskurve und ihre Ableitung .....   | 34  |
| Abb. 11: | Die logistische Diffusionskurve und ihre Ableitung .....   | 35  |
| Abb. 12: | Die semilogistische Diffusionskurve und ihre Ableitung .....   | 37  |
| Abb. 13: | Ablauf der empirischen Untersuchung.....   | 57  |
| Abb. 14: | Anzahl installierter PV-Anlagen in BW im Jahr 2009 bis zu einer Leistung von 30 kWp .....                  | 60  |
| Abb. 15: | Anzahl an neuen PV-Anlagen pro Jahr in BW von 1990 bis 2009 .....  | 60  |
| Abb. 16: | Histogramm der PV-Anlagen pro 1000 Einwohner im Jahr 2009 .....  | 61  |
| Abb. 17: | Ablauf der Analyse der räumlichen Autokorrelation.....   | 77  |
| Abb. 18: | Korrelogramm des Moran's I (PV-Anlagen/EW) – Vergleich verschiedener Distanzmaße .....                     | 79  |
| Abb. 19: | Moran Scatterplot der PV-Anlagen/EW (Distanzmaß: „fixed distance“, Distanz: 12 km) .....                   | 81  |
| Abb. 20: | Akteure im Diffusionsprozess .....   | 98  |
| Abb. 21: | Repräsentativität der Befragungsergebnisse: Berufsausbildung und Wohnverhältnisse.....                     | 116 |
| Abb. 22: | Einstellungen gegenüber PV – PV-Eigentümer vs. Nicht-Eigentümer (Frage 9) .....                            | 118 |
| Abb. 23: | Energieverhalten der PV-Eigentümer vs. der Nicht-Eigentümer (Frage 17) .....                               | 119 |
| Abb. 24: | Genutzte Informationsquellen – PV-Eigentümer vs. Nicht-Eigentümer (Frage 10) .....                         | 119 |
| Abb. 25: | Adoptionskurven von Creglingen und Dörzbach.....   | 122 |
| Abb. 26: | Diffusionskurven von Creglingen und Dörzbach .....   | 122 |
| Abb. 27: | Energieverhalten der EW von Creglingen vs. der EW von Dörzbach (Frage 17) .....                            | 123 |
| Abb. 28: | Ablauf der Analysen in Kapitel 8.....  | 128 |
| Abb. 29: | Standardfehler der Residuen (SFR) der vier Raumkategorien .....  | 133 |
| Abb. 30: | Vergleich des Innovationseffekts $p$ zwischen den Raumkategorien für verschieden Marktpotentiale $M$ ..... | 133 |

|          |  |     |
|----------|--|-----|
| Abb. 31: | Vergleich des Imitationseffekts $q$ zwischen den Raumkategorien für verschieden Marktpotentiale $M$ .....                        | 134 |
| Abb. 32: | Adoptions- und Diffusionskurven der vier Raumkategorien .....  | 137 |
| Abb. 33: | Anzahl der in die Auswertung eingehenden Gemeinden der einzelnen Raumkategorien .....  | 138 |
| Abb. 34: | Vergleich der Innovationseffekte $p$ zwischen den vier Raumkategorien .....  | 140 |
| Abb. 35: | Vergleich der Imitationseffekte $q$ zwischen den vier Raumkategorien .....   | 142 |
| Abb. 36: | Zusammenhang zwischen Innovations- und Imitationseffekt. Vergleich zwischen Gemeinden der unterschiedlichen Raumkategorien ..... | 143 |
| Abb. 37: | Adoptions- und Diffusionskurven der Hot und Cold Spots .....   | 147 |
| Abb. 38: | Vergleich der Imitationseffekte $p$ zwischen Hot und Cold Spots.....   | 147 |
| Abb. 39: | Vergleich der Innovationseffekte $p$ zwischen Hot und Cold Spots.....  | 149 |
| Abb. 40: | Zusammenhang zwischen Innovations- und Imitationseffekt. Vergleich zwischen Hot und Cold Spot-Gemeinden.....                     | 150 |
| Abb. 41: | Boxplot zur Analyse der Extremwerte der PV-Anlagen/1000 EW .....   | 180 |
| Abb. 42: | Fragebogen der Haushaltsbefragung .....  | 190 |
| Abb. 43: | Adoptions- und Diffusionskurve einer signifikanten Schätzung (Gemeinde Mötzingen).....   | 205 |
| Abb. 44: | Adoptions- und Diffusionskurve einer nicht signifikanten Schätzung (Gemeinde Schlat).....  | 206 |

# Kartenverzeichnis

|           |  |     |
|-----------|--|-----|
| Karte 1:  | Raumkategorien in Baden-Württemberg nach dem LEP 2002 .....  | 63  |
| Karte 2:  | Installierte PV-Anlagen (bis 30 kWp) pro 1000 Einwohner in Baden-Württemberg im Jahr 2009 .....  | 65  |
| Karte 3:  | Installierte PV-Anlagen (bis 30 kWp) pro 1000 Einwohner von 2000 bis 2009 in Baden-Württemberg .....   | 67  |
| Karte 4:  | Installierte PV-Anlagen (bis 30 kWp) pro 1000 Einwohner von 2000 bis 2009 in Franken (BW) (Main-Tauber-Kreis, Hohenlohekreis, Schwäbisch Hall) .....   | 68  |
| Karte 5:  | PV-Cluster in den Gemeinden Baden-Württembergs 2009 – Vergleich der LISA-Statistik und der Hot Spot Analyse (Distanzmaß: „fixed distance“, Distanz: 12 km). HH- bzw. Hot Spot-Gemeinden in ROT, LL- bzw. Cold Spot-Gemeinden in BLAU ..... | 82  |
| Karte 6:  | Vergleich der LISA-Statistik mit und ohne Bonferroni-Korrektur .....   | 83  |
| Karte 7:  | Die Region Heilbronn-Franken in Baden-Württemberg .....  | 97  |
| Karte 8:  | Clustereinteilung der Gemeinden in Heilbronn-Franken .....   | 113 |
| Karte 9:  | Auswahl der Gemeinden für die Haushaltsbefragung .....   | 114 |
| Karte 10: | Gemeinden mit signifikanten und nicht signifikanten Modellschätzungen. Raumkategorien im Vergleich. ....   | 139 |
| Karte 11: | Gemeinden mit signifikanten und nicht signifikanten Modellschätzungen. Hot Spots und Cold Spots im Vergleich. ....   | 148 |

# Tabellenverzeichnis

|          |   |     |
|----------|---|-----|
| Tab. 1:  | Grundmodelle der klassischen Diffusionstheorie.....   | 33  |
| Tab. 2:  | Studien zur Diffusion Erneuerbarer-Energie-Technologien.....  | 48  |
| Tab. 3:  | Studien zur räumlichen Diffusion von Innovationen.....  | 55  |
| Tab. 4:  | Variablendefinition und deskriptive Statistik.....  | 91  |
| Tab. 5:  | Ergebnisse der Regressionsanalysen für die abhängige Variable<br>PV/EW im Jahr 2009 .....   | 93  |
| Tab. 6:  | Interviewpartner und deren Codierung.....   | 99  |
| Tab. 7:  | Korrelationen der Cluster-Variablen.....  | 112 |
| Tab. 8:  | Rücklaufquoten der Haushaltsbefragung .....   | 115 |
| Tab. 9:  | Test auf Normalverteilung der PV-Anlagen/1000 EW .....  | 180 |
| Tab. 10: | Extremwerte der PV-Anlagen/1000 EW in den Gemeinden BWs .....   | 181 |
| Tab. 11: | Korrelation zwischen PV/EW und Raumkategorie .....  | 181 |
| Tab. 12: | HH-Cluster der LISA-Statistik mit Bonferroni-Korrektur .....  | 182 |
| Tab. 13: | LL-Cluster der LISA-Statistik mit Bonferroni-Korrektur.....   | 183 |
| Tab. 14: | Korrelationsmatrix der Variablen der Regressionsanalyse .....   | 185 |
| Tab. 15: | Ergebnisse der OLS-Schätzung (Modell 1 mit Globalstrahlung).....  | 185 |
| Tab. 16: | Ergebnisse der OLS-Schätzung (Modell 1 ohne Globalstrahlung) .....  | 187 |
| Tab. 17: | Ergebnisse der MLE-Schätzung (Modell 2).....  | 188 |
| Tab. 18: | KS-Test auf Normalverteilung der Residuen.....  | 189 |
| Tab. 19: | Ergebnisse der MLE-Schätzung (Modell 3).....  | 189 |
| Tab. 20: | Signifikanzwerte des U-Tests nach Mann-Whitney differenziert<br>nach PV-Eigentum und den Gemeinden.....   | 194 |
| Tab. 21: | Vergleich der Familienverhältnisse zwischen PV-Eigentümern<br>und Nichteigentümern – Kreuztabelle und Signifikanztest (Frage 22) ..               | 195 |
| Tab. 22: | Vergleich der Wohnverhältnisse zwischen PV-Eigentümern<br>und Nicht-Eigentümern – Kreuztabelle und Signifikanztest (Frage 12)                     | 195 |
| Tab. 23: | Vergleich der Gebäudetypen zwischen PV-Eigentümern und<br>Nicht-Eigentümern – Kreuztabelle und Signifikanztest (Frage 13).....                    | 196 |
| Tab. 24: | Vergleich der Häufigkeiten der Herkunft der Gesprächspartner<br>(PV-Eigentümer) zwischen PV-Eigentümern und Nicht-<br>Eigentümern (Frage 11)..... | 196 |
| Tab. 25: | Vergleich der Bedeutung der Gesprächspartner zwischen<br>PV-Eigentümern und Nicht-Eigentümern (Frage 14).....                                     | 196 |
| Tab. 26: | Vergleich der Bedeutung der Gesprächspartner zwischen<br>Creglingen (CR) und Dörzbach (DÖ) (Frage 14).....  | 197 |
| Tab. 27: | Vergleich der Bedeutung der wichtigsten Akteure im PV-Bereich<br>zwischen CR und DÖ (Frage 4) .....   | 197 |
| Tab. 28: | Wichtigste PV-Installateure in den Befragungsgemeinden nach<br>erfasstem Marktanteil (Frage 15) .....   | 197 |
| Tab. 29: | Firmensitze der wichtigsten PV-Installateure und Entfernungen<br>zu den Befragungsgemeinden (Frage 15).....                                       | 198 |
| Tab. 30: | R-Skript des Raumkategorie-Modells .....  | 199 |



|  |     |
|--|-----|
| Tab. 31: R-Skript des Gemeinde-Modells.....  | 202 |
| Tab. 32: Signifikanzniveaus der U-Tests nach Mann-Whitney: Vergleich<br>der Innovationskoeffizienten $p$ zwischen den Raumkategorien ..... | 206 |
| Tab. 33: Signifikanzniveaus der U-Tests nach Mann-Whitney: Vergleich<br>der Imitationskoeffizienten $q$ zwischen den Raumkategorien.....   | 206 |
| Tab. 34: KS-Test auf Normalverteilung von Innovations- und<br>Imitationseffekt .....   | 206 |
| Tab. 35: Korrelation zwischen Innovations- und Imitationseffekt .....  | 207 |
| Tab. 36: Ergebnisse der MLE-Schätzung (p-Modell).....  | 207 |
| Tab. 37: Ergebnisse der MLE-Schätzung (q-Modell) .....   | 208 |

# Abkürzungsverzeichnis

|           |   |
|-----------|---|
| AEE       | Agentur für Erneuerbare Energien                                      |
| BILDG     | Anteil an Beschäftigten mit Fachhochschul- oder Universitätsabschluss |
| BMWi      | Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie                      |
| BSW-Solar | Bundesverband Solarwirtschaft e.V.                                    |
| BW        | Baden-Württemberg   |
| BY        | Bayern  |
| CR        | Creglingen  |
| CS        | Cold Spot   |
| DÖ        | Dörzbach  |
| DWD       | Deutscher Wetterdienst  |
| EE        | Erneuerbare Energien  |
| EEG       | Erneuerbare Energien Gesetz   |
| EnBW      | Energie Baden-Württemberg AG  |
| EINK      | Einkünfte pro Steuerpflichtige  |
| EW        | Einwohner   |
| EZFH      | Ein- und Zweifamilienhäuser   |
| EZFH01    | Neubauten an EZFH pro EW  |
| FAM       | Anzahl an Familien pro EW   |
| GLOST     | Globalstrahlung (kW/m <sup>2</sup> )                                  |
| HH        | High High, d.h. Cluster von hohen PV/EW-Werten                        |
| HS        | Hot Spot  |
| kWp       | Kilowatt peak   |
| LEP       | Landesentwicklungsplan  |
| LL        | Low Low, d.h. Cluster von niedrigen PV/EW-Werten                      |
| LW        | Landwirtschaftliche Betriebe  |
| Lkr       | Landkreis   |
| MIF       | Mean Information Field  |
| MVI BW    | Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg           |
| MWp       | Megawatt peak   |
| PV        | Photovoltaik  |
| RK        | Raumkategorie   |
| SFR       | Standardfehler der Residuen   |
| VEIH      | Anzahl an landwirtschaftlichen Betrieben mit Viehhaltung pro EW       |

# Symbolverzeichnis

## Kapitel 4

|             |  |
|-------------|--|
| $a$         | Innovationskoeffizient, d.h. Koeffizient der Innovatorennachfrage bzw. für den von außen auf das soziale System wirkenden Einfluss |
| $a_x$       | Innovationskoeffizient in Abhängigkeit von der Entfernung $x$  |
| $b$         | Imitationskoeffizient, d.h. Koeffizient der Imitatorennachfrage bzw. für den von innen auf das soziale System wirkenden Einfluss   |
| $b_x$       | Imitationskoeffizient in Abhängigkeit von der Entfernung $x$   |
| $e$         | Exponentialfunktion  |
| $F_t$       | Lösung des Bass-Modells  |
| $f_t$       | Erste Ableitung der Lösungsfunktion des Bass-Modells   |
| $g_t$       | Adoptionswahrscheinlichkeit zum Zeitpunkt $t$ (Diffusionskoeffizient)  |
| $h_t$       | Hazard-Funktion  |
| $\ln$       | Natürlicher Logarithmus  |
| $M$         | Marktpotential, d.h. maximale Anzahl potentieller Adoptoren (Sättigungsgrenze)   |
| $\bar{N}_x$ | Marktpotential in Abhängigkeit von der Entfernung $x$  |
| $n_t$       | Anzahl der erwarteten Adoptoren pro Zeiteinheit zum Zeitpunkt $t$ (Diffusionsrate)   |
| $n_{x,t}$   | Anzahl der erwarteten Adoptoren pro Zeiteinheit zum Zeitpunkt $t$ in Abhängigkeit von der Entfernung $x$                           |
| $N_t$       | kumulierte Anzahl an Adoptoren zum Zeitpunkt $t$   |
| $N_{x,t}$   | kumulierte Anzahl an Adoptoren zum Zeitpunkt $t$ in Abhängigkeit von der Entfernung $x$  |
| $N_0$       | Anzahl der Adoptoren zum Startzeitpunkt  |
| $t$         | Zeit   |
| $t_w$       | Wendepunkt der Diffusionskurve   |
| $x$         | Räumliche Entfernung zum Ursprungsgebiet der Innovation  |

## Kapitel 6

|               |  |
|---------------|--|
| $\alpha$      | Signifikanzniveau  |
| $\beta$       | Regressionskoeffizienten der unabhängigen Variablen          |
| $d_{ij}$      | Distanz zwischen den Gemeinden $i$ und $j$                   |
| $\varepsilon$ | Residuum, Fehlerterm   |
| $E(G)$        | Erwartungswert des General G                                 |
| $E(G_i^*)$    | Erwartungswert des Local G                                   |
| $E(I)$        | Erwartungswert des Global Moran's I                          |
| $G$           | General G  |
| $G_i^*$       | Local G ( $x$ -Werte am Ort $i$ gehen in die Berechnung ein) |
| $i$           | Gemeinde   |
| $I$           | Global Moran's I   |
| $I_i$         | Local Moran's I  |
| $I$           | $n$ -dimensionale Identitätsmatrix                           |

|                 |   |
|-----------------|---|
| $j$             | Nachbargemeinde   |
| $k$             | Anzahl der Paarvergleiche   |
| $lag_i, \rho$   | „Spatial lag“, d.h. räumlich gewichteter Durchschnittswert der PV/EW der benachbarten Gemeinden |
| $n$             | Anzahl an Gemeinden   |
| $\mu$           | Mittelwert  |
| $Var, \sigma^2$ | Varianz   |
| $W$             | Räumliche Gewichtungsmatrix, Nachbarschaftsmatrix   |
| $w_{ij}$        | Nachbarschaft zwischen Gemeinde i und Gemeinde j  |
| $x_i$           | Anzahl der PV/EW in der Gemeinde i  |
| $x_j$           | Anzahl der PV/EW in der Gemeinde j  |
| $y$             | Abhängige Variable  |
| $\bar{x}$       | Durchschnittswert der PV/EW über alle n Gemeinden   |
| $X$             | Matrix aus unabhängigen Variablen   |
| $Z(G)$          | Z-Statistik des General G   |
| $Z(G_i^*)$      | Z-Statistik der Local G   |
| $Z_{(ii)}$      | Z-Statistik des Local Moran's I   |

## Kapitel 8

|           |   |
|-----------|---|
| $\alpha$  | Signifikanzniveau   |
| $c_i$     | Stärke des Nachbarschaftseffekts                                    |
| $e$       | Exponentialfunktion   |
| $F_t$     | Lösung des Bass-Modells   |
| $f_t$     | Erste Ableitung der Lösungsfunktion des Bass-Modells                |
| $i$       | Gemeinde  |
| $j$       | Nachbargemeinde   |
| $k$       | Anzahl der Gemeinden  |
| $M$       | Marktpotential  |
| $M_i$     | Marktpotential der Gemeinde i                                       |
| $M_j$     | Marktpotential der Nachbargemeinde j                                |
| $n_t$     | PV-Neuinstallationen pro EW   |
| $N_t$     | Kumulierte Anzahl an installierten PV/EW                            |
| $N_{i,t}$ | Kumulierte Anzahl an PV/EW zum Zeitpunkt t in Gemeinde i            |
| $N_{j,t}$ | Kumulierte Anzahl an PV/EW zum Zeitpunkt t in der Nachbargemeinde j |
| $p$       | Innovationskoeffizient  |
| $p_i$     | Innovationskoeffizient der Gemeinde i                               |
| $q$       | Imitationskoeffizient   |
| $q_i$     | Imitationskoeffizient der Gemeinde i                                |
| $t$       | Zeit  |
| $W_{ij}$  | Nachbarschaftsmatrix für Gemeinde i und j                           |

# 1 Einleitung

Noch vor zehn Jahren war es kaum vorstellbar, dass die Photovoltaik (PV) einen beachtlichen Beitrag zur Stromversorgung in Deutschland leisten könnte. Dank günstiger politischer Rahmenbedingungen in Form des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) kam es in den letzten Jahren zu einem ungeahnten Ausbau von PV-Anlagen in Deutschland: die installierte Leistung stieg von 76 Megawatt peak (MWp) in 2000 auf 24.820 MWp in 2011 an. Der Anteil des aus PV-Anlagen erzeugten Stroms lag mit 19.000 Gigawattstunden (GWh) im Jahr 2011 bei 3,1% der gesamten Stromerzeugung (BMW I 2012). Aufgrund des rasanten Wachstums stellt die PV mittlerweile einen wichtigen Wirtschaftsfaktor dar und sichert von der Produktion bis hin zur Installation in Deutschland ca. 128.000 Arbeitsplätze (BSW-SOLAR 2012).

Vor dem Hintergrund des Klimawandels, knapper werdender fossiler Ressourcen und der zunehmenden Importabhängigkeit von Energieträgern aus politisch instabilen Förderregionen hat sich die Bundesregierung im Nationalen Aktionsplan für erneuerbare Energien das Ziel gesetzt, den Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromversorgung bis 2020 auf 38,6% zu erhöhen (BUNDESREGIERUNG DEUTSCHLAND 2010). Auch der Zubau von PV-Anlagen soll damit weiter vorangetrieben werden, wenn auch mit niedrigeren Zuwachsraten als bisher.

Im Vordergrund der Diskussion um die deutsche Erfolgsgeschichte der PV-Entwicklung steht meist die Förderung der erneuerbaren Energien durch das EEG. Trotz dieser bundesweit einheitlichen finanziellen Förderbedingungen existieren jedoch räumliche Unterschiede in der Anzahl der installierten PV-Anlagen pro Einwohner (EW), sowohl auf Ebene der Bundesländer als auch zwischen einzelnen Gemeinden einer Region. Diese räumlichen Unterschiede werden häufig vernachlässigt oder allein auf Unterschiede in der Globalstrahlung zurückgeführt.

Ziel der Arbeit ist deshalb, die räumliche Diffusion von PV-Anlagen in den Gemeinden Baden-Württembergs (BW) zu untersuchen. Erstens werden die räumlichen Unterschiede in der PV-Nutzung zwischen den Gemeinden BWs aufgedeckt. Zweitens werden die Ursachen für die räumlichen Unterschiede in der PV-Diffusion analysiert. Besonderes Interesse gilt hierbei der Bedeutung des Nachbarschaftseffekts für die Diffusion von PV-Anlagen. Ergebnisse dieser Arbeit können Grundlagen für die Anpassung gezielter Förderungen oder Marketingmaßnahmen für die Verbreitung von PV-Anlagen liefern.

Die Untersuchungsregion stellt das Bundesland BW dar, da es nach Bayern (BY) die zweithöchste installierte Leistung an PV-Anlagen pro EW aufweist und im Fokus der Forschungsarbeiten des Europäischen Institut für Energieforschung (EIFER) liegt, an dem diese Arbeit entstanden ist.

Die Arbeit gliedert sich in elf Kapitel (vgl. Abb. 1). Auf die Einleitung folgt das zweite Kapitel, in dem zuerst die zentralen Begriffe dieser Arbeit definiert werden. Anschließend wird die Entwicklung der PV-Anlagen von der technologischen Nische hin zu einem Massenprodukt beschrieben und damit aufgezeigt, wie diese von der Innovationsphase in die Diffusionsphase eingetreten sind.

In Kapitel 3 wird die Theorie der Diffusion von Innovationen vorgestellt. Im ersten Abschnitt wird die klassische Diffusionstheorie erläutert. Zum einen wird gezeigt, welche Faktoren den Adoptionsprozess einer Innovation beeinflussen. Zum anderen wird der Diffusionsprozess beleuchtet, der die zeitliche Dynamik von Adoptionsvorgängen beschreibt und bei dem die Kommunikation innerhalb eines sozialen Systems im Vordergrund steht. Eine Erweiterung dieses Ansatzes stellt die Theorie der räumlichen Diffusion nach Hägerstrand dar, die im zweiten Abschnitt des Kapitels vorgestellt wird. Diffusionsprozesse finden demnach immer in einem räumlichen Kontext statt, bei denen Hierarchie- und Nachbarschaftseffekte eine zentrale Rolle spielen.

Kapitel 4 widmet sich der Darstellung der Diffusionsmodelle. Den Ausgangspunkt bilden das exponentielle und das logistische Diffusionsmodell, auf die das Bass-Modell aufbaut. Das Bass-Modell wird für die Modellierung der PV-Diffusion in Kapitel 8 verwendet und deshalb am Ende des Kapitels 4 ausführlicher diskutiert.

In Kapitel 5 wird der Stand der Forschung zur Diffusion von Innovationen dargestellt. Es werden Studien präsentiert, die sich mit der Diffusion von erneuerbaren Energie (EE)-Technologien auseinandersetzen sowie Studien, die sich explizit auf die Untersuchung der räumlichen Diffusion von Innovationen konzentrieren. Die Studien werden in Bezug auf die eigene Forschungsfrage diskutiert und daraus der Forschungsbedarf für diese Arbeit abgeleitet.

In Kapitel 6 steht die Analyse der räumlichen Unterschiede der PV-Nutzung in BW im Vordergrund. Im ersten Schritt wird eine Analyse zur räumlichen Autokorrelation von PV-Anlagen durchgeführt, um herauszufinden, ob eine signifikante Clusterung von PV-Anlagen pro EW in den Gemeinden BWs besteht und wo sich Hot Spots und Cold Spots der PV-Nutzung befinden. Im zweiten Schritt wird mit Hilfe der räumlichen Regressionsanalyse untersucht, was die Ursachen für die räumlichen Unterschiede in der PV-Nutzung auf Gemeindeebene sind.

Kapitel 7 stellt eine Fallstudie dar, in der die Diffusion von PV-Anlagen in der Region Heilbronn-Franken in BW im Detail beleuchtet wird. Die Ergebnisse auf Gemeindeebene des Kapitels 6 werden damit um Informationen auf Individualebene ergänzt. Ziel ist erstens mit Hilfe von Experteninterviews herauszufinden, was die Ursachen für die räumlichen Unterschiede in der PV-Nutzung aus Sicht der Akteure sind und welche Rolle der Nachbarschaftseffekt für die PV-Diffusion spielt. Zweitens soll durch eine Haushaltsbefragung in Creglingen und Dörzbach aufgedeckt werden, warum sich zwei strukturell ähnliche Gemeinden in der PV-Nutzung unterscheiden.

Kapitel 8 widmet sich schließlich der Modellierung der räumlichen Diffusion von PV-Anlagen in den Gemeinden BWs von 2000 bis 2030. Hierbei werden die räumlichen Unterschiede in der zeitlichen Dynamik der Diffusion zwischen den Gemeinden der einzelnen Raumkategorien untersucht, sowie die Bedeutung des Nachbarschaftseffekts zwischen Gemeinden für die PV-Diffusion aufgezeigt.

Die Ergebnisse der drei empirischen Kapitel werden in der Synthese zusammengeführt (Kapitel 9). In Kapitel 10 werden schließlich Daten, Methoden und Ergebnisse diskutiert. Die Arbeit endet mit einigen Schlussfolgerungen und gibt einen kurzen Ausblick auf weitere interessante Forschungsfragen (Kapitel 11).

Abb. 1: Aufbau der Arbeit

|            |  |  |
|------------|--|--|
|            | <b>Einführung in das Thema</b>   |  |
| Kapitel 1  | <b>Einleitung</b>  |  |
| Kapitel 2  | <b>PV – von der Innovation zur Diffusion</b><br>– Definitionen<br>– Entwicklung der PV-Nutzung in Deutschland  |  |
|            | <b>Theorie</b>   |  |
| Kapitel 3  | <b>Theorie der Diffusion von Innovationen</b><br>– Klassische Diffusionstheorie<br>– Theorie der räumlichen Diffusion von Innovationen                     |  |
| Kapitel 4  | <b>Diffusionsmodelle</b>   |  |
|            | <b>Stand der Forschung</b>   |  |
| Kapitel 5  | Studien zur Diffusion von EE-Technologien<br>Studien zur räumlichen Diffusion von Innovationen   |  |
|            | <b>Empirie</b>   |  |
| Kapitel 6  | <b>Räumliche Unterschiede in der PV-Nutzung in Baden-Württemberg</b><br><br>– Clusteranalyse<br><br>– Räumliche Regressionsanalyse                         | <p>Liegt räumliche Autokorrelation zwischen den Gemeinden BWs bzgl. der PV-Anlagen pro EW vor? Wo liegen die Cluster (Hot Spots und Cold Spots)?</p> <p>Was sind die Ursachen für die räumlichen Unterschiede in der PV-Nutzung?</p>       |
| Kapitel 7  | <b>Diffusion von PV-Anlagen in der Region Heilbronn-Franken</b><br><br>– Experteninterviews<br><br>– Haushaltsbefragung                                    | <p>Was sind die Ursachen für die räumlichen Unterschiede in der PV-Nutzung aus Sicht der Akteure? Welche Rolle spielt der Nachbarschaftseffekt?</p> <p>Warum unterscheiden sich zwei strukturell ähnliche Gemeinden in der PV-Nutzung?</p> |
| Kapitel 8  | <b>Modellierung der räumlichen Diffusion in BW von 2000 – 2050</b><br><br>– Analyse der räumlichen Unterschiede<br><br>– Analyse des Nachbarschaftseffekts | <p>Wie unterscheidet sich die Diffusion von PV-Anlagen zwischen den Raumkategorien?</p> <p>Welche Bedeutung hat der Nachbarschaftseffekt zwischen den Gemeinden für die PV-Diffusion?</p>  |
|            | <b>Schlussbetrachtungen</b>  |  |
| Kapitel 9  | <b>Synthese</b>  |  |
| Kapitel 10 | <b>Diskussion</b>  |  |
| Kapitel 11 | <b>Schlussfolgerungen und Ausblick</b>   |  |

## 2 Photovoltaik – von der Innovation zur Diffusion

Deutschland wies 2011 – wie in den Jahren zuvor – weltweit die größte installierte Leistung von Photovoltaik (PV)-Anlagen auf und kommt für knapp 50% der gesamten installierten Leistung der Länder der Europäischen Union auf (EUROOBSERV'ER 2012, S. 114). Obwohl Deutschland mit einer durchschnittlichen Globalstrahlung von 1055 kWh/m<sup>2</sup> (DWD 2011) deutlich schlechtere Voraussetzungen aufweist wie bspw. die südeuropäischen Länder, kam es in den letzten Jahren zu einer rasanten Verbreitung von PV-Anlagen. Die Art der Verbreitung weist typische Eigenschaften eines Diffusionsprozesses auf, in dem sich die innovative Energietechnologie zunächst langsam und schließlich mit zunehmender Geschwindigkeit in der Bevölkerung verbreitet. Die Innovationsphase, die bis in die 1990er Jahre andauerte, ging mit dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) im Jahr 2000 in die Diffusionsphase über, in der es zu einem sprunghaften Anstieg an PV-Installationen in Deutschland kam.

In diesem Kapitel werden zuerst die Begriffe „Photovoltaik-Anlage“, „Innovation“ und „Diffusion“ definiert, um ein einheitliches Verständnis der zentralen Begriffe dieser Arbeit zu ermöglichen (Abschnitt 2.1). Anschließend wird die Entwicklung der PV-Nutzung in Deutschland von einer Nischenanwendung in der Ökologiebewegung hin zu einem Massenprodukt zur Geldanlage und dezentralen Stromerzeugung beschrieben (Abschnitt 2.2.2).

### 2.1 Definitionen

#### 2.1.1 Photovoltaik-Anlagen

PV-Dachanlagen lassen sich in drei Komponenten unterteilen:

- **Solarmodule:** Ein Solarmodul setzt sich aus mehreren Solarzellen zusammen. Für PV-Dachanlagen kommen aufgrund der hohen Wirkungsgrade meist mono- und polykristalline Solarzellen zur Anwendung (Wirkungsgrade der Module von bis zu 19,7% bzw. 15,4%) (QUASCHNING 2011, S. 190).
- **Wechselrichter:** Zur Umformung der durch die Solarmodule erzeugten Gleichspannung (Direct Current, DC) in eine netzkonforme Wechselspannung (Alternate Current, AC) von 230 V und 50 Hz werden Wechselrichter benötigt. Sie stellen die Schnittstelle zwischen dem PV-Generator und dem örtlichen Stromnetz dar (KALTSCHMITT et al. 2006, S. 230).
- **Dachgestell** zur Fixierung der PV-Anlage auf dem Gebäudedach.

Durch die Sonneneinstrahlung fließt in den Solarmodulen Gleichstrom, der über den Wechselrichter in Wechselstrom umgewandelt und je nach Konfiguration der Anlage im Gebäude direkt verbraucht oder in das Niederspannungsnetz eingespeist wird.



Über den Einspeisezähler wird die eingespeiste Strommenge dokumentiert und an den Netzbetreiber zur Berechnung der Einspeisevergütung übermittelt (für technische Details zur Stromerzeugung mittels Photovoltaik vgl. KALTSCHMITT et al. (2006), SCHLABBACH (2008) oder QUASCHNING (2011)).

Für eine Anlagenleistung von 1 Kilowatt Peak<sup>1</sup> (kWp) werden 7-10 m<sup>2</sup> Dachfläche benötigt. Der Jahresertrag liegt in Deutschland bei optimaler Südausrichtung und einem Neigungswinkel von 30° bei 800-1000 kWh/kWp und Jahr (SOLARSERVER 2012). Einen wesentlichen Einfluss auf den Stromertrag hat die Globalstrahlung, die in Deutschland in den Jahren zwischen 1981 und 2010 im Mittel bei 1055 kWh/m<sup>2</sup> lag (Min: 951 kWh/m<sup>2</sup>, Max: 1257 kWh/m<sup>2</sup>) (DWD 2011).

In Deutschland existieren PV-Anlagengrößen von wenigen kWp bis zu über 50 MWp. Bei den Anlagen im MW-Bereich handelt es sich jedoch meistens um Freiflächenanlagen. In die Untersuchung dieser Arbeit gehen ausschließlich netzgekoppelte PV-Anlagen mit einer Leistung von bis zu 30 kWp ein, die in das Stromnetz der öffentlichen Versorgung einspeisen und damit die durch das EEG gesetzlich festgelegte Einspeisevergütung erhalten. Die Leistungsgrenze von 30 kWp wurde gewählt, da im EEG bis zu 30 kWp die höchste Vergütungsstufe für den eingespeisten Strom gewährt wurde, um bewusst den Bau von dezentralen kleinen Dachanlagen zu fördern (vgl. § 33 Abs. 1 EEG 2009). PV-Anlagen bis 30 kWp umfassen sowohl kleinere Anlagen auf privaten Häusern (meist bis ca. 10 kWp) als auch Anlagen auf Dächern landwirtschaftlich, gewerblich oder öffentlich genutzter Gebäude.

Bei der Entscheidung für die Investition in eine PV-Anlage müssen Wirtschaftlichkeitsberechnungen zu Grunde gelegt werden. Einfluss auf die Stromgestehungskosten haben (vgl. KALTSCHMITT et al. 2006, S. 260ff.):

- Investitionskosten des PV-Systems
- Wartungs- und Instandhaltungskosten (u.a. Reparaturen, Versicherungen)
- Zinssatz des zur Finanzierung der Anlage genutzten Kredits
- Abschreibungsdauer
- Volllaststunden pro Jahr (u.a. abhängig von der Globalstrahlung und den Leistungsverlusten durch z.B. Verschattung oder Verschmutzung).

Demgegenüber stehen die Erlöse aus der Einspeisevergütung durch das EEG und gegebenenfalls die Einsparungen von Stromkosten durch den Eigenverbrauch des selbsterzeugten Stroms.

## 2.1.2 Innovation

In dieser Arbeit werden PV-Anlagen, wie sie privaten Haushalten und Landwirten zur Stromerzeugung auf dem eigenen Hausdach zur Verfügung stehen, als Innovation betrachtet. In welchem Stadium des Innovations- und Diffusionsprozesses sich

---

<sup>1</sup> Maßeinheit zur Kennzeichnung der genormten elektrischen Leistung (Nennleistung) einer Solarzelle oder eines Solarmoduls

die Technologie derzeit in Deutschland befindet, wird in Abschnitt 2.2 diskutiert. Im Folgenden wird nun der Begriff Innovation, und wie er in dieser Arbeit verstanden wird, beschrieben.

Der Begriff Innovation stammt aus dem Lateinischen und bezeichnet die Einführung von etwas Neuem bzw. die Realisierung einer neuartigen, fortschrittlichen Lösung für ein bestimmtes Problem. Die industrielle Innovationsforschung wurde wesentlich durch Schumpeter und seine „Theorie der wirtschaftlichen Entwicklung“ aus dem Jahr 1911 geprägt. Er sieht das Wesen der Innovation in der „Durchsetzung neuer Kombinationen“ bei der Produktion von Gütern (SCHUMPETER 1939, S. 88). Damit ist die Innovation nicht nur ein naturwissenschaftlich-technisches Phänomen, sondern betrifft auch Ökonomie, Management und damit einhergehende gesellschaftliche Veränderungen (HAUSCHILDT und SALOMO 2011, S. 9).

Bei Innovationen handelt es sich häufig um eine neue Technologie, wie auch im Fall der PV. Um ein einheitliches Verständnis der Termini zu ermöglichen, werden im Folgenden die Begriffe Technologie, Technik, Invention und Innovation gegeneinander abgegrenzt. Technologie „...bezeichnet das Wissen über naturwissenschaftlich-technische Wirkungsbeziehungen, das bei der Lösung praktischer Probleme Anwendung findet“ (SPECHT et al. 2002, S. 13). Demgegenüber steht der Begriff der Technik, unter dem die konkrete Anwendung der Technologie in Produkten und Produktionsprozessen verstanden wird (BROCKHOFF 1999, S. 27). Die Innovation einer Technologie setzt immer eine Invention voraus, d.h. die Erfindung einer Technologie, die meist als geplantes oder zufälliges Ergebnis aus F&E-Aktivitäten hervorgeht. Die Innovation ist schließlich die Einführung der Invention auf dem Markt (Produktinnovation) oder deren Einsatz als neues Verfahren (Prozessinnovation) (BROCKHOFF 1999, S. 37). Nach HAUSCHILDT und SALOMO (2011) sind Prozessinnovationen „neuartige Faktorkombinationen, durch die die Produktion eines bestimmten Gutes kostengünstiger, qualitativ hochwertiger, sicherer oder schneller erfolgen kann“ (HAUSCHILDT und SALOMO 2011, S. 5). Prozessinnovationen treten in der Regel nur innerhalb von Unternehmen auf. Die Produktinnovation erbringt hingegen „eine Leistung, die dem Benutzer erlaubt, neue Zwecke zu erfüllen oder vorhandene Zwecke in einer völlig neuartigen Weise zu erfüllen“ (ebd. S. 5). Zur Durchsetzung sind Produktinnovationen immer auf eine Marktnachfrage angewiesen (vgl. auch STONEMAN 2002, S. 12ff.). PV-Anlagen stellen demzufolge Produktinnovationen dar. Eine weitere Systematisierung von Innovationen findet sich bei HENSEL (2008, S. 11ff.) und ROTH (1993, S. 45ff.).

Entgegen dem objektiven Innovationsbegriff, der sich auf den Zeitpunkt der Erfindung oder der erstmaligen Nutzung bezieht, wird hier die subjektive Definition nach ROGERS (2003) verwendet: „An innovation is an idea, practice, or object that is perceived as new by an individual or other unit of adoption“ (ROGERS 2003, S. 12). Die Idee, die einem Individuum als neu erscheint, ist folglich eine subjektiv wahrgenommene Innovation. PV-Anlagen stellen also eine Innovation dar, solange sie von (potentiellen) Nutzern als solche betrachtet werden. So kann in einer Region, in der wenige PV-Anlagen installiert sind, die Technologie als Innovation angesehen werden, wohingegen in Regionen mit weiter Verbreitung von PV-Anlagen diese schon als Massenprodukt gelten.

### 2.1.3 Diffusion

Der Begriff der Diffusion wird in dieser Arbeit aus sozial- und wirtschaftswissenschaftlicher Perspektive betrachtet. Die Grundlage bildet die Definition nach ROGERS: „Diffusion is the process by which an innovation is communicated through certain channels over time among the members of a social system“ (ROGERS 2003, S. 5). Demnach ist die Diffusion ein Prozess, bei dem sich die Innovation innerhalb eines sozialen Systems mittels bestimmter Kommunikationskanäle ausbreitet. Die Diffusion basiert somit auf der Adoption der Innovation einzelner Individuen und beschreibt die Summe dieser Adoptionen im Zeitverlauf (vgl. Abschnitt 3.1.3).

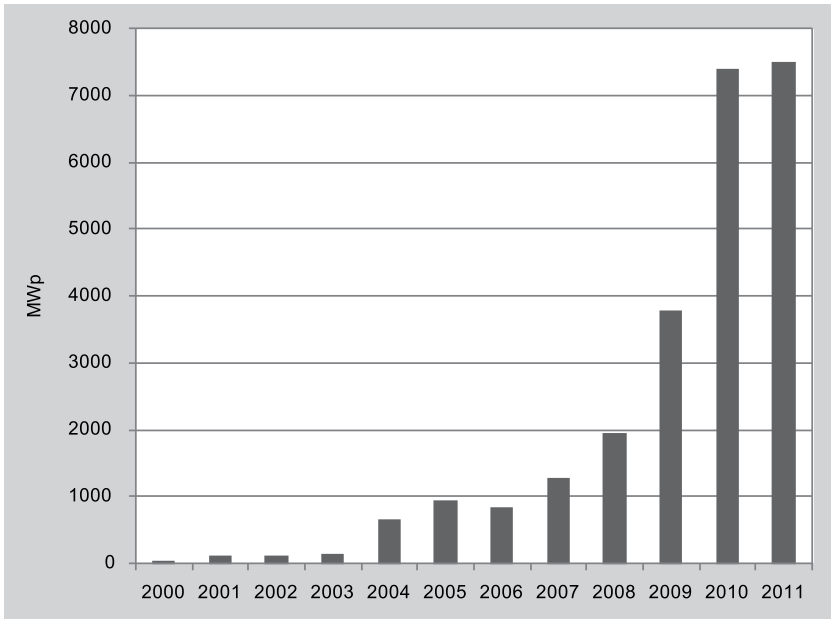
Neben der zeitlichen Perspektive spielt in dieser Arbeit die räumliche Perspektive eine entscheidende Rolle. Da die Adoption einer Innovation immer in einem räumlichen Kontext stattfindet, versteht HÄGERSTRAND (1952) die Diffusion als einen raum-zeitlichen Prozess, der von den räumlichen Gegebenheiten als auch von den Distanzen zwischen Adoptoren und potentiellen Adoptoren abhängt (HÄGERSTRAND 1952). Besondere Bedeutung hat in diesem Zusammenhang der Nachbarschaftseffekt, der beschreibt, dass die räumliche Nähe von Individuen die Adoption von Innovationen begünstigt (HÄGERSTRAND 1967, S.163). Der Begriff der räumlichen Diffusion wird in Abschnitt 3.2 nochmals ausführlich erläutert.

In dieser Arbeit bezieht sich der Begriff der Diffusion also auf die raum-zeitliche Ausbreitung von PV-Dachanlagen in privaten Haushalten. Die Diffusion bezeichnet damit die kumulierte Zunahme an PV-Anlagen über die Zeit als auch die räumliche Ausbreitung in den Gemeinden Baden-Württembergs (BW).

## 2.2 Entwicklung der PV-Nutzung in Deutschland: Von der technologischen Nische zum Massenprodukt

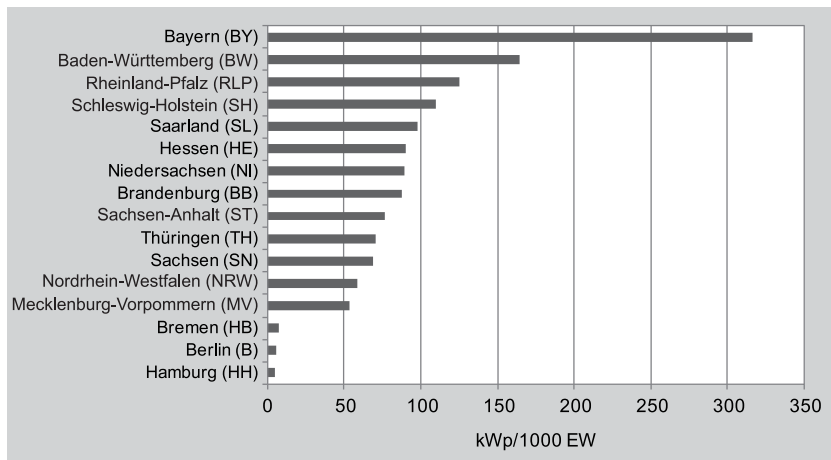
Seit der Einführung des EEG im Jahr 2000 hat die Stromproduktion durch PV in Deutschland von 64 GWh/Jahr auf 19.000 GWh/Jahr im Jahr 2011 zugenommen. PV-Anlagen trugen 2011 damit mit 3,1% zur deutschen Stromerzeugung bei (BMWi 2012). Dies entspricht etwa dem Jahresstrombedarf von 5,2 Mio. Haushalten (BSW-SOLAR 2012b, S. 2). In Abb. 2 ist die Entwicklung der PV-Neuinstallationen seit der Einführung des EEG im Jahr 2000 dargestellt. Die neu installierte Leistung nahm fast jedes Jahr zu, mit Rekordzuwächsen in den Jahren 2010 und 2011, in denen neue Anlagen mit einer Gesamtleistung von 7400 MWp bzw. 7500 MWp ans Stromnetz angeschlossen wurden. In Deutschland ist mit insgesamt 24,8 GWp weltweit die größte Leistung von PV-Anlagen installiert (BMWi 2012). Aufgrund des in der EEG-Novelle 2012 festgelegten Zubaukorridors, der die jährlich geförderte neuinstallierte Leistung beschränkt (2.500-3.500 MW für 2012), wird jedoch in Zukunft von einem Rückgang der jährlich neuinstallierten Leistung ausgegangen (vgl. § 20a EEG 2012).

Abb. 2: Neu installierte PV-Leistung in Deutschland seit Beginn des EEG im Jahr 2000



Quelle: BMWI (2012)

Abb. 3: Installierte Leistung von PV-Anlagen in kWp pro 1000 EW in den deutschen Bundesländern



Quelle: AEE (2012)

In Abb. 3 ist die installierte Leistung an PV-Anlagen pro 1000 EW in den einzelnen Bundesländern für das Jahr 2009 dargestellt. Bayern (BY) und BW nehmen mit 316 kWh/1000 EW bzw. 165 kWh/1000 EW die Spitzenpositionen ein. Mit einer Gesamt-

leistung von 3995 MWp in BY und 1772 MWp in BW, entfielen in 2009 knapp 60% der installierten Leistung an PV-Anlagen in Deutschland auf die beiden südlichen Bundesländer (AEE 2012).

Hauptverantwortlich für die rasante Entwicklung in Deutschland ist das EEG, das durch die gesetzlich geregelte Einspeisung von Strom aus erneuerbaren Energien und die über 20 Jahre garantierte Einspeisevergütung Anreize zur Investition in PV schuf. Die Höhe der Einspeisevergütung wurde im Laufe der Jahre an die Entwicklung der Marktpreise für PV-Anlagen angepasst (vgl. BSW-SOLAR 2012a). Im Jahr 2004 betrug die Einspeisevergütung für PV-Anlagen bis 30 kWp 57,4 ct/kWh; bis zu Beginn des Jahres 2012 sank diese auf 24,43 ct/kWh ab (QUASCHNING 2012). Demgegenüber steht ein deutlicher Preisverfall von PV-Systemen. Aufgrund des Wettbewerbs, größerer produzierter Stückzahlen und technischer Weiterentwicklungen nahm der Systempreis (für PV-Anlagen bis 100 kWp) seit 2006 um 65% ab und lag im ersten Quartal 2012 nur mehr bei durchschnittlich 1776 €/kWp (BSW-SOLAR 2012b, S. 4).

Im nächsten Abschnitt wird erläutert, wie es zu diesem weltweit einzigartigen PV-Wachstum kommen konnte. Es werden die Ursachen dargestellt, die für das wachsende Interesse an PV in der Bevölkerung verantwortlich sind (Abschnitt 2.2.1) und welche Bedeutung das EEG für die massenhafte Verbreitung von PV-Anlagen hatte (Abschnitt 2.2.2).

## 2.2.1 Die PV-Anlage als Innovation

Die PV-Zelle wurde zwar bereits 1954 in den USA erfunden, jedoch erst seit den 1970er Jahren für die Stromerzeugung in PV-Anlagen in größerem Maßstab genutzt (QUASCHNING 2011, S. 164). Durch die Wiederentdeckung der Technologie und die Erschließung neuer Anwendungsbereiche kann die PV als Innovation bezeichnet werden (vgl. Abschnitt 2.1.2).

Ausgangspunkt für das Interesse an erneuerbaren Energien war die Ölkrise 1973, die die Abhängigkeit der Energieerzeugung von fossilen Ressourcen stärker in das Bewusstsein der Bevölkerung rückte. Es entstand eine Ökologiebewegung, aus der sich organisierte Interessenvertretungen herausbildeten, wie der BUND (1975) und die Partei „Die Grünen“ (1980). Ziel der Bewegung war, die alten Strukturen des Energiesystems aufzubrechen und eine ökologische und sozial verträgliche Energiewende einzuleiten. MAUTZ et al. (2008) beschreiben, dass sich bei der Stromversorgung zwei Paradigmen gegenüberstanden. Auf der einen Seite stand das „dominierende“ Paradigma, das auf der Nutzung fossil-atomarer Energieträger basiert, durch eine zentralisierte Stromproduktion und -verteilung gekennzeichnet ist und von wenigen einflussreichen Akteuren geprägt wird. Auf der anderen Seite stand das „alternative, sozialökologische Paradigma“, in dem dezentrale Erzeugungs- und Versorgungsstrukturen angestrebt wurden. Dieses war anfangs stark von pluralisierten und basisorientierten Organisationsstrukturen geprägt, die vom Ökologiedanken geleitet wurden (MAUTZ et al. 2008, S. 9).

Es zeigte sich, dass die Energiewende hin zu einer verstärkten Nutzung von erneuerbaren Energien nur eingeleitet werden kann, wenn das neue Energiesystem

außerhalb des alten entsteht (JACOBSSON et al. 2004, S. 3f.). In der Innovationsforschung wird von „technologischen Nischen“ gesprochen, wenn sich eine Innovation, vor dem freien Markt geschützt, außerhalb des dominanten technologischen Systems ausbreitet (BRAUN-THÜRMAN 2005, S. 46). Damit sich Innovationen erfolgreich entwickeln können, ist meist eine gezielte staatliche Förderung nötig. Dieses sog. „strategische Nischenmanagement“ ermöglicht Lernkurven, durch die Innovationen zur Marktreife gelangen können (COENEN et al. 2010, S. 296).

Im Bereich der erneuerbaren Energien bzw. der PV zeichnete sich die staatliche Förderung in den 1990er Jahren durch drei wesentliche Maßnahmen aus: Das Stromeinspeisegesetz, sowie das 1.000- und das 100.000-Dächer-Programm (WÜSTENHAGEN und BILHARZ 2006, S. 1692). Das Stromeinspeisegesetz wurde 1991 verabschiedet und garantierte einen Mindestabnahmepreis für Strom aus erneuerbaren Energien. Im gleichen Jahr wurde das 1.000-Dächer-Programm ins Leben gerufen, das PV-Anlagenbetreiber mit einem Investitionskostenzuschuss von bis zu 70% unterstützte. Dieses Programm galt als erster wissenschaftlicher Feldtest für netzgekoppelte PV-Anlagen (HOFFMANN 2008, S. 38). Bis 1995 entstanden in diesem Rahmen 2.200 PV-Anlagen im Leistungsbereich zwischen 1 bis 5 kWp. Im Jahr 1999 folgte das 100.000-Dächer-Programm, durch das Investitionsbeihilfen in Form zinsverbilligter Darlehen für PV-Anlagen gewährt wurden (STAISS 2007, S. 129f.).

Allein durch die Existenz der Förderprogramme kann das zunehmende Interesse an erneuerbaren Energien bzw. PV jedoch nicht erklärt werden. Die Energiewende muss im Rahmen der gesellschaftlichen Entwicklung betrachtet werden, die den Boden für die Ausbreitung der Technologien bereitet haben. Entscheidend war *erstens* das zunehmende Bewusstsein in der Bevölkerung für die Krisenanfälligkeit des fossil-atomaren Systems der Stromerzeugung. Dies zeigte sich nicht nur in den Ölkrisen 1973 und 1979, sondern auch durch den Super-GAU im Atomkraftwerk in Tschernobyl 1986. *Zweitens* wurde durch das Scheitern von Großprojekten, besonders im Bereich der Windenergie, deutlich (vgl. GROWIAN-Projekt (MAUTZ et al. 2008, S. 50ff.)), dass die Entwicklung von großtechnischen Lösungen zunächst nicht umsetzbar war. Der Staat wandte sich durch die gezielte Förderung der Anwenderseite deshalb vom top-down-Ansatz der Förderung von bottom-up Prozessen zu. Dieser Lernprozess wäre ohne das Engagement einiger Akteursgruppen, die sich seit den 1970er Jahren für dezentrale, kleine Anlagen stark machten, nicht möglich gewesen. *Dritter* wesentlicher Faktor für die Vorbereitung der Energiewende waren also sog. Schlüsselakteure, die den Diffusionsprozess angestoßen haben. „Eine pragmatisch gewordene Umweltszene bildete das Gravitationszentrum einer neuen „Kultur“ sozialökologischer Projekte und verfügte damit über Kommunikationskanäle und Netzwerkstrukturen, in denen sich „Erfindungen (...) im Bereich regenerativer Energien verbreiteten“ (MAUTZ et al. 2008, S. 66). Diese Schlüsselakteure werden nach der Diffusionstheorie von ROGERS als „Technikpioniere bzw. Innovatoren“, „Change Agents“ und „Meinungsführer“ bezeichnet (vgl. Abschnitt 3.1.3.1). Den Akteuren ist gemeinsam, dass sie durch die frühe Anwendung der Technologie Demonstrationsprojekte schufen und durch ihre kommunikativen Fähigkeiten weitere Personen von der Technologie überzeugen konnten. Die *vierte*, und für die politische

Umsetzung der Förderprogramme wahrscheinlich entscheidende Entwicklung, war die Institutionalisierung der Ökologiebewegung in Interessenvertretungen, die Öffentlichkeits- und Lobbyarbeit für die Anwendung und Förderung von PV leisteten (JACOBSSON et al. 2004, S. 15). 1975 entstand die „Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e.V.“ (DGS), 1978 der „Bundesverband Solarwirtschaft“ (BSW Solar). Der 1986 gegründete Förderverein für Solarenergie in Aachen entwickelte das Konzept für die kostendeckende Vergütung von Solarstrom, das beispielhaft in ca. 50 Städten und Gemeinden umgesetzt wurde, und schließlich als Vorlage für das EEG 2000 diente. Gleichzeitig entstand eine professionelle Herstellerszene sowie ein Markt für anwenderbezogene Dienstleistungen (Planungsbüros, Handwerksbetriebe etc.) (MAUTZ et al. 2008, S. 71).

Durch die besondere Förderung von PV-Anlagen in den kleinen Leistungsbereichen wurden in den 1990er Jahren v.a. Privathaushalte angesprochen. Kaufmotive waren – neben der Voraussetzung der Wirtschaftlichkeit der Anlage – meist der Umweltschutzgedanke und die Unabhängigkeit von der öffentlichen Energieversorgung (HÜBNER und FELSER 2001, S. 25ff.). Auch diente die Anlage häufig als Statussymbol: durch die gut sichtbare Installation der PV-Anlage auf dem Hausdach konnte das ökologische Bewusstsein nach außen demonstriert werden (MAUTZ et al. 2008, S. 60). Die zweite große Anwendergruppe waren die Landwirte, die bereits Erfahrung mit größeren Investitionen hatten und über ausreichend Dachflächen für PV-Anlagen verfügten. Die Installation erfolgte meist aus ökonomischen Gründen und weniger aus ökologischer Überzeugung (MAUTZ et al. 2008, S. 94).

### **2.2.2 Die PV-Diffusionsphase**

Die PV-Diffusionsphase wurde durch das EEG im Jahr 2000 eingeleitet, das zum ersten Mal eine bundesweite, kostendeckende Einspeisevergütung garantierte. Das EEG legte die Grundlage für die explosionsartige Diffusion der Technologie, da die PV somit der breiten Masse der Bevölkerung zugänglich gemacht wurde (vgl. Abb. 2). Die entscheidende Motivation für die Investition in PV war ab 2000 meist die Aussicht auf eine gewinnbringende und sichere Geldanlage; der eigene Beitrag zur Energiewende galt häufig nur als angenehmer Nebeneffekt (MAUTZ et al. 2008, S. 94). Die gesellschaftlichen Kosten, die durch die EEG-Umlage für alle Stromverbraucher entstehen, wurden als notwendige Startfinanzierung der EE angesehen, um die Klimaschutzziele zu erreichen und den Atomausstieg zu ermöglichen (MAUTZ et al. 2008, S. 92).

Das EEG 2000 löste das Stromeinspeisegesetz von 1991 ab. Wesentliche Merkmale des EEG für PV-Investoren sind (EEG 2000):

- vorrangige Abnahme des Stroms aus erneuerbaren Energien,
- über den gesamten Förderzeitraum von 20 Jahren garantierte Einspeisevergütung,
- Degressionsregelung, d.h. stufenweise Verringerung der Vergütungssätze, um eine Innovationsdynamik zu garantieren und langfristig eine Anpassung der Marktpreise der EE zu erreichen.

Das EEG ist in Deutschland das größte Förderprogramm für EE. Auf Bundesebene wird die PV-Förderung ergänzt durch zinsgünstige Darlehen der KfW-Bank (STAIB 2007, S. 166). Einzelne Bundesländer unterstützen zusätzlich Demonstrationsprojekte oder Investitionen in Forschung und Entwicklung. Diese Programme stellen jedoch keine Breitenförderung dar (BSW-Solar 2009). In BW existieren auf Landesebene keine zusätzlichen Fördermaßnahmen, da die Förderung auf Bundesebene als ausreichend angesehen wird (AMMON und UHLEMANN 2009, S. 41).

Novellierungen des EEG erfolgten in den Jahren 2004, 2009 und 2012 (EEG 2004; EEG 2009; EEG 2012). Entscheidende Veränderungen für PV-Investitionen entstanden durch die EEG-Novelle 2004. Durch den Wegfall des 100.000-Dächer-Programms im Jahr 2003 wurde die Einspeisevergütung von PV-Dachanlagen bis 30 kWp von 50,6 ct/kWh auf 57,4 ct/kWh erhöht. Gleichzeitig wurde der Deckel für die Förderung aufgehoben, so dass ab 2004 vermehrt Großanlagen im MW-Bereich entstanden (§11 Abs. 2 EEG 2004).

Durch die erhöhte Förderung von Dachanlagen in den kleineren Leistungsbereichen bis 30 kWp, war die Investition in PV besonders für Eigenheimbesitzer von Ein- und Zweifamilienhäusern (EZFH) interessant. Neben der klassischen PV-Anlage auf EZFH entstanden durch das EEG auch häufiger Bürgersolkraftwerke, sowie Dachanlagen auf Gebäuden von Industrie, Gewerbe und kommunalen Liegenschaften. Die Vergütungsregelung des EEG 2004 machte PV für Landwirte besonders attraktiv, für die die Rendite aus großen Dach- und Freiflächenanlagen lukrative Nebeneinkünfte darstellten (MAUTZ et al. 2008, S. 95).

Die besondere Förderung von Installationen in kleinen Leistungsbereichen führte zur dezentralen Verbreitung der PV in Deutschland. Wie Abb. 3 verdeutlicht, kam es trotz bundesweit gleicher Förderbedingungen durch das EEG und die KfW-Bank jedoch zu Unterschieden in der räumlichen Verteilung der PV-Anlagen, wobei BW die zweithöchste installierte Leistung an PV-Anlagen unter den Bundesländern in Deutschland aufweist. Die Entwicklung der PV-Nutzung kann als Diffusionsprozess bezeichnet werden (vgl. 2.1.3), der in Deutschland von vielen Einflussfaktoren abhing (vgl. 2.2.1). Die Theorie der Diffusion von Innovationen bildet deshalb einen geeigneten Rahmen, die Diffusion von PV-Anlagen zu untersuchen und wird nun im folgenden Kapitel 3 vorgestellt. Sie dient damit als Grundlage für die Analysen der Kapitel 6, 7 und 8, in denen die Ursachen für die räumlichen Unterschiede in der PV-Nutzung in BW sowie die räumlichen Unterschiede im Diffusionsverlauf der einzelnen Gemeinden in BW untersucht werden.



## 3 Theorie der Diffusion von Innovationen

### 3.1 Klassische Diffusionstheorie

Die Diffusion von Innovationen ist seit langem ein viel beachtetes Forschungsfeld, da Innovationen gesellschaftliche Umbrüche einleiten können und meist zu wirtschaftlicher Entwicklung und Fortschritt beitragen. SCHUMPETER stellte bereits 1911 in seiner Theorie der wirtschaftlichen Entwicklung Innovationen als Treiber der wirtschaftlichen Dynamik und damit als Ursache für die wellenförmige Konjunkturentwicklung heraus (SCHUMPETER 1939).

Durch die Auswertung empirischer Forschungsarbeiten zur Diffusion von Konsumgütern zeichnen sich Regelmäßigkeiten im Diffusionsprozess ab, die in einer allgemeinen Theorie der Diffusion zusammengefasst werden. Im folgenden Abschnitt werden zuerst Ursprung und Ziele der klassischen Diffusionsforschung vorgestellt (3.1.1), woraufhin anschließend der Adoptionsprozess (3.1.2) und der Diffusionsprozess (3.1.3) detailliert beschrieben werden.

#### 3.1.1 Ursprung und Ziele der klassischen Diffusionsforschung

Die traditionelle Diffusionsforschung wurde entscheidend von ROGERS geprägt, der 1962 seine Arbeit zum ersten Mal unter dem Titel „Diffusion of Innovations“ veröffentlichte (ROGERS 1962). Basierend auf einer Vielzahl von empirischen Untersuchungen entwarf er die Theorie der Diffusion von Innovationen, die heute die Grundlage für einen Großteil der Diffusionsstudien darstellt.

Die Anfänge der Diffusionsforschung gehen jedoch auf das Ende des 19. Jahrhunderts zurück (KAAS 1973, S. 4ff.; WINDHORST 1983, S. 5ff.). Von Interesse waren zunächst besonders Fragestellungen aus der Anthropologie mit dem Ziel, die Diffusion von Innovationen (Ideen oder Objekte) in verschiedenen Kulturkreisen, sowie die damit einhergehenden gesellschaftlichen Entwicklungen zu untersuchen (KROEBER 1948, S. 412). Wichtige Beiträge zur Diffusionsforschung stammen aus der Geographie, die sich der Beschreibung und Erklärung von räumlichen Ausbreitungsprozessen widmen und wesentlich durch die Ideen HÄGERSTRANDS geprägt wurden (detailliertere Ausführungen folgen in Abschnitt 3.2) (HÄGERSTRAND 1952; HÄGERSTRAND 1967). Die Theorie der Diffusion von Innovationen nach ROGERS begründet sich jedoch zum Großteil auf empirischen Untersuchungen aus dem Bereich der Agrarsoziologie, die seit den 1940er Jahren in den USA durchgeführt wurden. Ziel dieser Studien war, die Effizienz von Maßnahmen des landwirtschaftlichen Beratungsdienstes zu untersuchen, und damit zu verfolgen, wie sich landwirtschaftliche Praktiken, Düngemittel und Hybrid-Saatgut unter den Landwirten ausbreiten (ROTH 1993, S. 32f.). Weitere Forschungsbereiche umfassen die Medizinsoziologie, mit Fragestellungen bspw. zur Diffusion von Medikamenten oder die industrielle Diffusionsforschung zur Analyse von Produkt- oder Prozessinnovationen in Unternehmen. In jüngster Zeit liegt der Fokus der Diffusionsforschung im Bereich des Marketings. Aufbauend auf dem Ver-

ständnis von Diffusionsprozessen von Konsumgütern werden marketingpolitische Instrumente für eine erfolgreiche Markteinführung neuer Produkte entwickelt (ROTH 1993, S. 35). Eine Zusammenfassung der einzelnen Forschungsbereiche und deren Bedeutung in der Diffusionsforschung findet sich bei ROGERS (2003, S. 44f.).

In der Diffusionsforschung kann zwischen dem Adoptions- und dem Diffusionsprozess unterschieden werden. Die Adoption wird definiert als die Entscheidung eines Nachfragers zur Übernahme einer Innovation. Der Adoptionsprozess, d.h. der Prozess von der ersten Wahrnehmung der Innovation bis zur endgültigen Übernahme, wird von jedem Adoptor durchlaufen. Gegenstand der Adoptionsforschung ist schließlich herauszufinden, welche Faktoren den individuellen Adoptionsprozess beeinflussen und warum die einzelnen Adoptoren die Innovation zu unterschiedlichen Zeitpunkten übernehmen (WEIBER 1992, S. 3). Während die Adoption die individuelle Übernahmeentscheidung beschreibt, stellt die Diffusion die kumulierte Zunahme an Adoptoren über die Zeit dar. Ziel der Diffusionsforschung ist damit, die Ausbreitung einer Innovation in einem sozialen System vom Ursprung bis zum letzten Übernehmer zu untersuchen d.h. die „...Analyse zeitraumbezogener aggregierter Adoptionsvorgänge...“ (WEIBER 1992, S. 3). Der Schwerpunkt der Diffusionsforschung kann hierbei auf die Beschreibung, Erklärung oder Prognose der Diffusion von Innovationen gelegt werden, die folgende Fragen in den Vordergrund stellen (ROTH 1993, S. 36):

- Beschreibung: Wie und wie schnell breiten sich Innovationen aus (Diffusionsgeschwindigkeit, Adoptionsverlauf)?
- Erklärung: Welche Einflussfaktoren wirken auf den Diffusionsprozess?
- Prognose: Wie verläuft die zukünftige raumzeitliche Ausbreitung der Innovation?

Aufbauend auf diesen Definitionen wird im nächsten Schritt der Adoptionsprozess und die auf diesen Prozess wirkenden Einflussfaktoren erörtert.

### 3.1.2 Der Adoptionsprozess

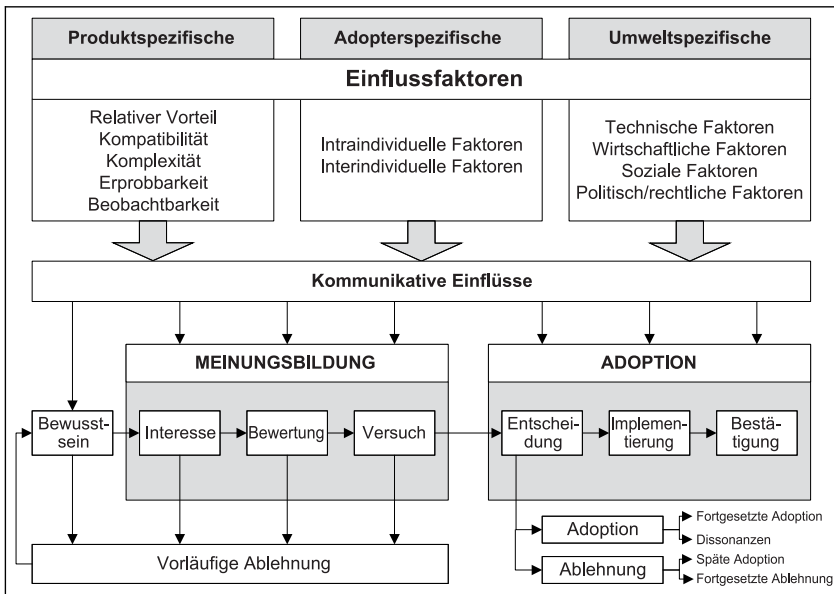
Der Adoptionsprozess kann nach ROGERS idealtypisch in fünf Phasen eingeteilt werden (ROGERS 2003, S. 168ff.). Diese Phasen sind allerdings nicht isoliert voneinander zu betrachten, da es im Ablauf auch zu Sprüngen, Rückkoppelungen oder einem Abbruch des Adoptionsprozesses kommen kann (HENSEL und WIRSAM 2008, S. 22).

Am Anfang steht die *Bewusstseins- oder Erkenntnisphase*, in der ein Individuum zum ersten Mal von der Innovation erfährt. „Dieser Kontakt ist häufig noch nicht sehr intensiv, zudem ist das vermittelte Informationsvolumen zunächst relativ gering. Auf Grund der empfangenen Stimuli mutmaßt der potentielle Adopter, inwieweit die Innovation für seine Situation verwendbar scheint“ (BACKHAUS 1999, S. 621). In der *Interessensphase* holt die Person gezielt Informationen über die Funktionsweise und den möglichen Nutzen der Innovation ein. Darauf folgt die *Bewertungsphase*, in der die Vor- und Nachteile der Neuerung gegeneinander abgewogen werden. Das Individuum bildet also seine persönliche Meinung darüber, inwieweit die Innovation die individuellen Bedürfnisse deckt. Durch die Erprobung der Neuerung in der *Ver-*

*suchsphase* können praktische Erfahrungen gesammelt werden, die zur endgültigen Entscheidungsfindung beitragen. Im letzten Schritt kommt es schließlich zur Übernahme der Innovation, die bei Konsumgütern mit dem Kauf gleichgesetzt werden kann. Diese *Adoptionsphase* kann weiterhin untergliedert werden in die *Entscheidung* für die Innovation, die tatsächliche *Implementierung* und die *Bestätigung* bzw. abschließende Beurteilung der Innovation (HENSEL und WIRSAM 2008, S. 21f.).

Im Gegensatz zum eben dargestellten prozessorientierten Ansatz, soll mit Hilfe des ergebnisorientierten Ansatzes herausgefunden werden, welche Faktoren die Adoption beeinflussen. Hierbei wird meist eine Untergliederung nach produkt-, adopter- und umweltspezifischen Einflussfaktoren vorgenommen (vgl. Abb. 4) (WEIBER 1992, S. 3ff.; SPETH 1999, S. 144ff.; LIEHR 2005, S. 26ff.; HENSEL und WIRSAM 2008, S. 23ff.).

Abb. 4: Determinanten des Adoptionsprozesses



Quelle: verändert nach WEIBER (1992), S. 8

### 3.1.2.1 Produktspezifische Einflussfaktoren

ROGERS arbeitete basierend auf seiner empirischen Forschung fünf Eigenschaften von Innovationen heraus, anhand derer diese klassifiziert werden können (ROGERS 2003, S. 15f; S. 223ff.). Diese produktspezifischen Einflussfaktoren sind von besonderer Bedeutung, da die Eigenschaften von Produkten und deren Verwendungsmöglichkeiten darüber bestimmen, inwiefern die Adoption Verhaltensänderungen erforderlich macht (WEIBER 1992, S. 5). Im Folgenden werden die produktspezifischen Einflussfaktoren vorgestellt und im Bezug auf privat genutzte PV-Anlagen diskutiert (vgl. auch HÜBNER und FELSER (2001), S. 14ff. bzgl. Solarthermieanlagen).

### 1. *Relativer Vorteil*

Der relative Vorteil gibt an, zu welchem Grad die Innovation als besser im Vergleich zur Idee oder des Produkts wahrgenommen wird, das sie ersetzen soll. Je größer der relative Vorteil, desto höher ist die Adoptionsgeschwindigkeit. Der Vorteil wird meist in Kosten ausgedrückt, kann sich aber auch durch technische Erleichterungen oder einen Gewinn an sozialem Prestige äußern (ROGERS 2003, S. 229ff.). In Bezug auf Innovationen im Umweltbereich wurde der relative Vorteil in empirischen Studien konkret erfasst durch die Einsparung an Energiekosten (NYRUD et al. 2008, S. 3171), die Umweltfreundlichkeit (SCHWARZ und ERNST 2008, S. 41) oder die Möglichkeit zur unabhängigen Energieversorgung (HÜBNER und FELSER 2001).

Diese Faktoren beeinflussen auch die Überlegungen zur Investition in eine PV-Anlage. So steht bei der Entscheidung für den Kauf und die Nutzung einer PV-Anlage oft die Möglichkeit zur eigenen, emissionsfreien Stromerzeugung im Vordergrund. Der Haushalt kann damit ein sichtbares Zeichen für die Energiewende und den Klimaschutz setzen und sein Umweltbewusstsein nach außen demonstrieren (FAIERS und NEAME 2006, S. 1798). Andere Formen der Energieerzeugung durch erneuerbare Energien, wie Pelletheizung oder Wärmepumpe, sind im Gegensatz zu PV-Anlagen weniger sichtbar. Gleichzeitig bietet eine PV-Anlage auch die Möglichkeit zum Eigenverbrauch des Stroms, der eine teilweise Entkopplung von der herkömmlichen zentralen Stromerzeugung möglich macht. Die entscheidende Ursache für die große Verbreitung kleiner, dezentraler PV-Anlagen liegt jedoch in der finanziellen Förderung durch das EEG. Für viele private Haushalte stellt die Technologie im Vergleich zu anderen Formen der Geldanlage eine attraktive Investitionsmöglichkeit dar, da die Kosten abschätzbar und die Rendite durch das EEG festgesetzt ist. Zudem kann durch den Stromzähler die Stromproduktion auf dem eigenen Hausdach direkt verfolgt werden. Die hohen Anschaffungskosten und die relativ lange Amortisationszeit sind in manchen Fällen jedoch auch Hinderungsgründe für die Installation.

### 2. *Kompatibilität*

Je kompatibler eine Innovation mit den Werten, Normen, Erfahrungen und Bedürfnissen der potentiellen Adoptoren ist, desto schneller wird sie übernommen (ROGERS 2003, S. 240). Die PV-Technologie und deren emissionsfreie Stromproduktion trifft den Puls der Zeit, da durch die zunehmende gesellschaftliche Bedeutung des Klimawandels auch umweltbewusstes Verhalten als Wert angesehen wird. Die Möglichkeit zur eigenen Stromproduktion befriedigt für viele Haushalte auch das Bedürfnis, selbst zur Energiewende beitragen zu können. Selbst wenn die Beschäftigung mit einer derartigen Technologie für die meisten Personen neu ist, so kann doch bereits auf die Erfahrungen von Installateuren zurückgegriffen werden, oder von Bekannten und Nachbarn, die bereits Nutzer dieser Technologie sind.

### 3. *Komplexität*

Innovationen, die relativ komplex sind und die vom potentiellen Adopter neue

Fähigkeiten erfordern, werden langsamer übernommen als solche, die einfach zu verstehen sind (ROGERS 2003, S. 257). Die PV-Technologie ist zwar eine Innovation, die physikalisches Wissen voraussetzt, um den Prozess der Stromgenerierung zu verstehen, für die Nutzung der Anlage ist dies jedoch nicht erforderlich. Die Komplexität von PV-Anlagen ergibt sich aus dem hohen Aufwand der Informationsbeschaffung im Vorfeld der Installation: Interessenten müssen anhand der Dacheigenschaften und -ausrichtung entscheiden, welche PV-Technologie am besten geeignet ist, sowie Informationen über Bauvorschriften und Finanzierungskonzepte einholen (vgl. JAGER (2006), S. 1937). Mittlerweile bieten jedoch die meisten Elektroinstallateure in Deutschland die Projektierung und Installation von PV-Anlagen an. Lokale Banken haben bereits Erfahrung mit PV-Finanzierungen und stehen für Beratungsgespräche zur Verfügung. Es zeigt sich also, dass die Komplexität der Technologie aufgrund der Unterstützung anderer Akteure des sozialen Systems den Adopter und die eigentliche Nutzung der PV-Anlage nicht direkt betrifft.

#### 4. *Erprobbarkeit*

Die Erprobbarkeit spiegelt den Grad wider, zu dem eine Innovation im Vorfeld bereits ausprobiert werden kann, und stellt damit eine gute Möglichkeit dar, Unsicherheiten gegenüber der Innovation zu reduzieren (ROGERS 2003, S. 258). Die direkte Erprobbarkeit von PV-Anlagen ist allerdings sehr gering, auch weil deren Funktionsweise nicht mit anderen solar betriebenen Anwendungen (z.B. Taschenrechnern) verglichen werden kann. Befinden sich jedoch Anlagen im eigenen Umfeld, so bietet die Beobachtung der Anlagennutzung bei Nachbarn oder Bekannten eine Möglichkeit, sich mit der Technologie vertraut zu machen, wie im nächsten Punkt dargestellt wird.

#### 5. *Beobachtbarkeit*

Unter Beobachtbarkeit wird das Ausmaß verstanden, zu dem Innovationen wahrnehmbar und demonstrierbar sind. Je sichtbarer eine Technologie ist, desto schneller wird sie übernommen (ROGERS 2003, S. 258). Dieser Aspekt spielt vermutlich besonders für die Diffusion von PV-Anlagen eine wichtige Rolle: Je mehr PV-Anlagen sich im lokalen Umfeld eines potentiellen Adoptors befinden, desto häufiger wird er mit der Technologie konfrontiert, und desto wahrscheinlicher ist der Kauf einer eigenen Anlage. Eine große Anzahl von bestehenden Anlagen demonstriert die Funktionsfähigkeit der Technologie und gibt Hinweis auf die Rentabilität einer solchen Investition. Zudem können besonders über die Anlagen in der Nachbarschaft Informationen leicht durch die kurzen Kommunikationswege ausgetauscht und mögliche Unsicherheiten damit beseitigt werden. LEONARD-BARTON (1981) beobachtete diesen Nachbarschaftseffekt der Diffusion von Solaranlagen bereits in den 80er Jahren in Kalifornien, wo Inseln von Solardächern entstanden sind: Dort wo eine Solaranlage entstanden war, setzte sich die Installation von Solaranlagen auch bei anderen Nachbarn fort (LEONARD-BARTON 1981).

### 3.1.2.2 Adopterspezifische Einflussfaktoren

Der Adoptionsprozess wird auch durch die Eigenschaften der Adoptoren und das soziale System, in dem diese agieren, beeinflusst. FANTAPIÉ ALTOBELLI (1991) unterscheidet zwischen intra- und interindividuellen Determinanten (FANTAPIÉ ALTOBELLI 1991, S. 27f.). Intraindividuelle Determinanten beziehen sich auf die persönlichen Eigenschaften der potentiellen Adoptoren, die die Innovationsübernahme positiv oder negativ beeinflussen. Hierzu zählen folgende Merkmale, die aus empirischen Studien hervorgehen (KAAS 1973, S. 24ff.):

- Demographische Merkmale (Einkommen, Bildungsniveau, Lebensstandard)
- Persönlichkeitsmerkmale (Selbstbewusstsein, Wagemut, Spontanität, Neugierde)
- Merkmale des sozialen Verhaltens (Aufgeschlossenheit, Weltoffenheit, Kontaktfreudigkeit).

Die Persönlichkeitsmerkmale und die Merkmale des sozialen Verhaltens, die einen hohen Erklärungswert für die Beschreibung des Adoptionsprozesses und die Kategorisierung von potentiellen Adoptoren haben, sind jedoch meist schwer zu erfassen und zu quantifizieren (WEIBER 1992, S. 7).

Unter interindividuellen Determinanten werden Faktoren zur Beschreibung der Beziehung eines Individuums mit seinem sozialen Umfeld zusammengefasst (FANTAPIÉ ALTOBELLI 1991, S. 28). Die Adoption kann durch Rollenerwartungen, Normen und Wertvorstellungen beeinflusst werden, die durch das soziale System vorgegeben werden. So kann beispielsweise die gesellschaftliche Orientierung hin zu umwelt- und energiebewussterem Verhalten auch dazu führen, dass der Einzelne die Investition in erneuerbare Energien oder den Kauf energiesparender Geräte in Erwägung zieht. Aber auch die Interaktion zwischen den Mitgliedern des Systems kann sich auf die Adoption auswirken. Hierbei spielt der Kontakt zu früheren Adoptoren (v.a. Meinungsführern) eine große Rolle, die durch persönliche Kommunikation oder die Demonstration der Innovation den potentiellen Adopter zur Nachahmung bewegen können (SPETH 1999, S. 147). Auf die Bedeutung der Kommunikation wird im folgenden Kapitel 3.1.3.1 näher eingegangen.

### 3.1.2.3 Umweltspezifische Einflussfaktoren

Die umweltspezifischen Einflussfaktoren gehen über das soziale System hinaus und umfassen politisch-rechtliche, technische, wirtschaftliche und soziale Faktoren (GATIGNON und ROBERTSON 1985, S. 858). Eine ausführliche Darstellung findet sich bei SPETH (1999, S. 150ff.). In der Regel bilden diese Faktoren lediglich den Gesamtrahmen, in den die Adoptionsentscheidung eingebettet ist. Sie wirken sich jedoch nicht so stark wie produkt- und adopterspezifische Determinanten auf den Adoptionsprozess aus (SPETH 1999, S. 149).

## 3.1.3 Der Diffusionsprozess

Die Diffusion, d.h. die raumzeitliche Ausbreitung einer Innovation, ergibt sich aus der Summe der einzelnen Adoptionsvorgänge und wird nach ROGERS (2003) wie folgt

definiert: „Diffusion is the process by which an innovation is communicated through certain channels over time among the members of a social system“ (ROGERS 2003, S. 5). Nach dieser Definition bezieht sich die Diffusion immer auf die Verbreitung von Innovationen (s. Abschnitt 2.1.2), wobei der Kommunikation innerhalb des sozialen Systems in diesem Prozess eine besondere Bedeutung zukommt. Im Folgenden wird deshalb näher auf diesen Aspekt eingegangen.

### **3.1.3.1 Kommunikationskanäle und soziales System**

Informationen über Innovationen werden über sog. Kommunikationskanäle verbreitet, wobei ROGERS zwischen den Mitteln der Massenkommunikation und der interpersonellen Kommunikation unterscheidet (ROGERS 2003, S. 18f.). Der Vorteil der Massenkommunikation liegt darin, dass in kurzer Zeit ein relativ großes Publikum erreicht werden kann. Besonders zu Beginn des Diffusionsprozesses ist dieses Medium hilfreich, um Wissen über die Innovation zu verbreiten und schnell verfügbar zu machen (ROGERS 2003, S. 205). Durch die unpersönliche Kommunikationsform sind Massenmedien allerdings vorwiegend in der Bewusstseinsphase von Bedeutung (s. Abschnitt 3.1.1.2). Um potentielle Adoptoren von einer Innovation zu überzeugen, spielt die interpersonelle Kommunikation die entscheidende Rolle.

Unter interpersoneller Kommunikation im engeren Sinn werden „face-to-face“ Kontakte von Individuen verstanden, die dem potentiellen Adopter ermöglichen, zusätzliche Informationen und Erfahrungswerte von früheren Adoptoren einzuholen und damit Unsicherheiten gegenüber der Neuerung zu beseitigen. Erfahrungsgemäß lassen sich Personen eher durch subjektive Bewertungen und Einstellungen von Freunden und Bekannten, die das neue Produkt bereits nutzen, überzeugen, als durch die Informationen aus Internet, Fernsehen oder Fachzeitschriften (ROGERS 2003, S. 205). HÜBNER und FELSER (2001) stellen in einer Studie zur Verbreitung von Solarthermieanlagen dar, dass die Mundpropaganda durch Freunde und Bekannte als eine der wichtigsten Informationsquellen angesehen wird (HÜBNER und FELSER 2001, S. 53). Damit ein Informationsaustausch zustande kommt, ist ein gewisser Grad an sozialer Übereinstimmung nötig. Zwischen Individuen, die einem ähnlichen sozialen Milieu angehören und unter denen „common meanings, beliefs and mutual understandings“ vorliegen (GREENHALGH et al. 2005, S. 115), findet nach ROGERS eine effektivere Kommunikation statt (ROGERS 2003, S. 306). Um neue Informationen in eine bestehende soziale Gruppe hineinzutragen, sind jedoch Kontakte zu heterophilen Personen wichtig.

WEIBER (1992) unterscheidet zwischen Modellen der persönlichen und der unpersönlichen Kommunikation (WEIBER 1992, S. 14). Das Modell der persönlichen Kommunikation wird oft mit der Theorie sozialer Netzwerke in Verbindung gebracht, da Individuen nie isoliert von ihrem sozialen Umfeld handeln und die Adoptionsentscheidung wesentlich durch Kommunikation innerhalb des sozialen Netzwerks geprägt wird (GREENHALGH et al. 2005, S.116; GÖBEL 2009, S. 44ff.). Eine besondere Bedeutung kommt in sozialen Netzwerken den Innovatoren, Meinungsführern („opinion leaders“) und Diffusionsagenten („change agents“) zu, wie dies u.a. von KAAS (1973) empirisch untersucht wurde (1973, S. 38ff.). Meinungsführer sind Personen, die einen hohen Einfluss auf das Verhalten anderer ausüben, bedingt durch

ihr Charisma, besondere Kompetenzen oder ihre gesellschaftliche Verankerung (GREENHALGH et al. 2005, S. 55). Sie gehören meist zu den Innovatoren und können durch ihre besondere Stellung im Kommunikationssystem und das ihnen gewährte Vertrauen den Diffusionsprozess in Gang bringen. Change Agents sind dagegen Personen oder Organisationen, die bewusst versuchen, die Innovationsentscheidung positiv zu beeinflussen (Rogers 2003, S. 365ff.), d.h. dass sie den Diffusionsprozess „...gezielt und effizient initiieren, organisieren und gestalten“ (HÜBNER und FELSER 2001, S. 91). Sie sind in der Regel technisch kompetenter als andere Individuen des sozialen Systems oder beschäftigen sich beruflich mit der Thematik, so dass sie auch Personen des Vertrauens darstellen (MAUTZ et al. 2008, S. 67). Im Bereich PV sind dies beispielsweise Elektroinstallateure oder Energieagenturen.

Die Modelle der unpersönlichen Kommunikation gehen davon aus, dass auch die bloße Beobachtung eines neuen Verhaltens bei anderen zur Adoption führen kann, ohne dass eine spezielle Kommunikation stattgefunden hat (KAAS 1973, S. 37f.). Dieser Ansatz ist typisch für Diffusionsprozesse in modernen Massengesellschaften und trifft v.a. auf Produkte mit ausgeprägter sozialer Auffälligkeit zu (SCHMALEN 1992, S. 34), wie dies auch für die PV-Technologie angenommen wird. Denn aufgrund der Vielzahl an Anlagen und deren Sichtbarkeit durch die Installation auf Hausdächern wird vermutet, dass dies den Diffusionsprozess messbar beeinflusst. SCHMALEN (1992) beschreibt, dass der Kommunikationsprozess in den sozialen Schichten unterschiedlich verläuft. So steht in den oberen sozialen Schichten oft die unpersönliche Kommunikation bei der Informationsbeschaffung im Vordergrund, wohingegen in den unteren sozialen Schichten Ratschläge eher von Freunden und Bekannten angenommen werden (SCHMALEN 1992, S. 34).

Auf der Idee der unpersönlichen Kommunikation baut das Diffusionsmodell von BASS auf, das zwischen zwei Adopterkategorien unterscheidet: den Innovatoren und den Imitatoren (Modell der gemischten Kommunikation vgl. Kapitel 4.4) (BASS 1969). Imitatoren haben in der Regel eine geringere Risikoneigung und warten deshalb besonders bei teuren und schwer zu beurteilenden Innovationen – wie dies bei der PV-Technologie der Fall ist – auf die Erfahrung früherer Adoptoren. Mit steigender Marktverbreitung nehmen jedoch die Menge an Informationen und der Erfahrungsfundus zu, so dass das Investitionsrisiko zurückgeht. Setzt sich die Innovation als Standard durch, so wird die Diffusion der Technologie schließlich durch den sozialen Übernahmepressur beschleunigt (SCHMALEN 1992, S. 25).

### **3.1.3.2 Die Bedeutung der Zeit im Diffusionsprozess**

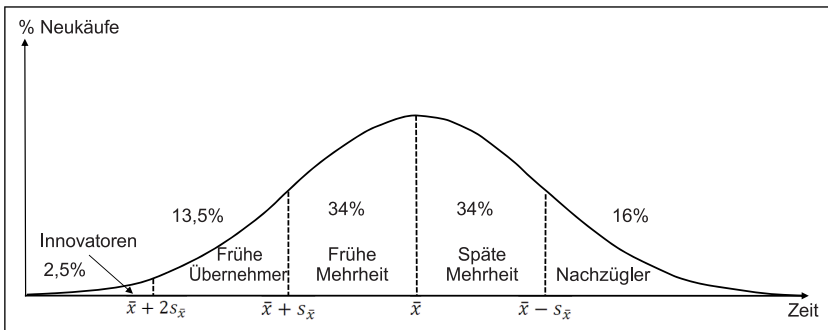
Wie aus der Definition von ROGERS hervorgeht, ist die Diffusion ein Prozess, bei dem die zeitliche Dimension eine wichtige Rolle spielt. Die Bedeutung der Zeit beim Adoptionsprozess wurde bereits in Abschnitt 3.2.1.2 erläutert. Zudem spielt die Zeit aber auch eine Rolle bei der Beurteilung der Innovativität der Adoptoren, die vom jeweiligen Adoptionszeitpunkt abhängt sowie bei der Übernahmegeschwindigkeit, die an der Anzahl der Adoptoren pro Zeiteinheit gemessen wird (ROGERS 2003, S. 20).



## Adoptions- und Diffusionskurve

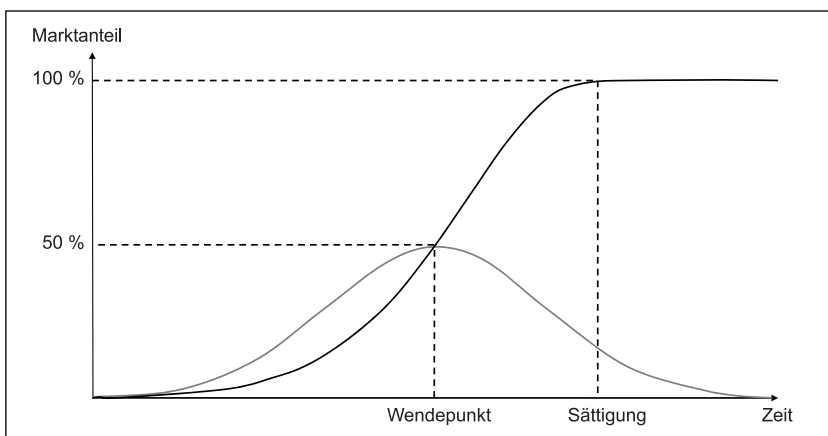
Wird die Anzahl der Adaptionen über die Zeit angetragen, so stellt dies die sog. Adoptionskurve dar, die im idealtypischen Fall einen glockenförmigen Verlauf beschreibt und damit der Dichtefunktion einer Normalverteilung entspricht. Mit Hilfe der statistischen Kenngrößen Mittelwert und Standardabweichung der Normalverteilung kann die Adoptionskurve in Abschnitte eingeteilt werden, so dass eine Zuordnung der Adoptoren zu den einzelnen Adopterkategorien möglich ist (s. Abb. 5). Innovatoren bilden die erste und kleinste Gruppe (Innovators: 2,5%), gefolgt von den frühen Übernehmern (Early Adopters: 13,5%), der frühen Mehrheit (Early Majority: 34%), der späten Mehrheit (Late Majority: 34%) und schließlich den Nachzüglern (Laggards: 16%) (ROGERS 2003, S. 280ff.). Die Annahme der Normalverteilung wurde zwar in zahlreichen Studien nachgewiesen (WEIBER 1992, S. 12; ROGERS 2003, S. 275), bei hoher Unsicherheit gegenüber der Innovation oder mangelndem Angebot kann es jedoch zu Nachfragestaus und damit beispielsweise zu einer linksschiefen Adoptionskurve kommen (HELM 2001, S. 114).

Abb. 5: Adopter-Kategorien im Diffusionsprozess (Adoptionskurve)



Quelle: ROGERS (2003), S. 281

Abb. 6: Kumulative Betrachtung der Adoptionsereignisse (Diffusionskurve)



Quelle: ROGERS (2003)

Durch die Aggregation der einzelnen Adaptionen über die Zeit entsteht die Diffusionskurve, die – unter der Annahme der Normalverteilung – einen S-förmigen Verlauf beschreibt (ROGERS 2003, S. 272ff.). Abb. 6 macht deutlich, dass am Anfang des Diffusionsprozesses eine kleine Anzahl an Adoptoren steht, die Kurve jedoch daraufhin sprunghaft ansteigt, bis eine Sättigung erreicht ist. Dies ist auf das unterstellte Kommunikationsmodell zurückzuführen, bei dem jeder Adopter potentielle Adoptoren anregt, so dass die Anzahl an Adoptoren exponentiell zunimmt. Hat die Hälfte der potentiellen Adoptoren die Innovation übernommen, so ist der Wendepunkt erreicht und die Steigung der Kurve nimmt ab (ROGERS 2003, S. 272ff.).

### **Adoptorkategorien**

Basierend auf empirischen Studien leitet ROGERS die oben bereits aufgelisteten fünf idealtypischen Adoptorkategorien ab und beschreibt deren Eigenschaften wie folgt (ROGERS 2003, S. 282ff.):

#### *Innovatoren (Innovators)*

Innovatoren sind Personen, die eine neue Technologie oder Idee als erste adoptieren und damit auch als erste in ein bestehendes soziales System hineinbringen. Durch die vergleichsweise starke Nutzung von Massenmedien sind sie meist gut über Neuigkeiten informiert. Ihr hohes Interesse an Innovationen, ihre hohe Risikobereitschaft als auch ihr Vermögen, komplexe Sachverhalte zu verstehen, begünstigt die schnelle Adoption von Innovationen. Zudem verfügen sie meist über die notwendigen finanziellen Ressourcen, so dass sich eine Fehlinvestition nicht spürbar auswirkt. Innerhalb der Gesellschaft nehmen sie jedoch eher eine Außenseiterrolle ein.

#### *Frühe Übernehmer (Early Adopters)*

Die frühen Übernehmer verfügen über ein hohes Maß an Kreativität, Mobilität und Informiertheit. Im Gegensatz zu den Innovatoren sind sie gut in das soziale System integriert und nehmen oft die Position von Meinungsführern ein. Der Einschätzung der Innovation durch die frühen Übernehmer wird hohes Vertrauen geschenkt, so dass sie eine entscheidende Rolle im Diffusionsprozess spielen.

#### *Frühe Mehrheit (Early Majority)*

Die frühe Mehrheit übernimmt die Innovation noch in der ersten Hälfte des Diffusionsprozesses. Sie handelt wohlüberlegt und lässt sich in ihrer Adoptionsentscheidung häufig von den frühen Übernehmern leiten, durch die das Investitionsrisiko bereits herabgesetzt wurde. Die frühe Mehrheit zeichnet sich dadurch aus, dass sie weder die ersten noch die letzten beim Kauf eines neuen Produktes sein möchte.

#### *Späte Mehrheit (Late Majority)*

Die späte Mehrheit übernimmt die Innovation erst, wenn sich die Mehrheit der potentiellen Adoptoren bereits dazu entschieden hat. Sie ist eher skeptisch und abwartend und lässt sich erst überzeugen, wenn die Innovation mit den Werten und Normen des sozialen Systems vereinbar ist. Die Adoption erfolgt meist aus ökonomischer Notwendigkeit oder unter sozialem Druck.

### *Nachzügler (Laggards)*

Nachzügler handeln traditions gelenkt, orientieren sich also mehr an der Vergangenheit und sind Veränderungen gegenüber misstrauisch. Sie verfügen oft über begrenzte finanzielle Ressourcen und nehmen eine eher isolierte gesellschaftliche Position ein.

Eine Einteilung in diese fünf Adoptertypen lässt sich in der Praxis oft nicht vornehmen. Leichter fällt die Abgrenzung von frühen zu späteren Adoptoren, deren Eigenschaften sich auf die sozioökonomischen und Persönlichkeitsmerkmale als auch auf das Kommunikationsverhalten beziehen (KAAS 1973, S. 24ff.; ROGERS 2003, S.287ff.). Frühere Adoptoren verfügen meist über eine höhere formale Bildung, einen höheren sozialen Status und haben in der Regel ein höheres Einkommen. Aufgrund ihrer Fähigkeiten zur Abstraktion, ihrer intellektuellen Fähigkeiten und ihrer Kreativität gelingt es ihnen mühelos, neue Situationen zu meistern. Sie sind offen gegenüber Neuheiten und können besser mit Risiko und Unsicherheiten umgehen als der Durchschnitt der Bevölkerung. Zudem sind sie stark in soziale Netzwerke eingebunden und pflegen Kontakte über das lokale Umfeld hinaus. Sie nutzen häufiger Massenmedien, legen ein ausgeprägtes Kommunikationsverhalten an den Tag und suchen aktiv nach Informationen über Innovationen.

Über diese Kriterien ist es also möglich, die Adoptoren im Zeitablauf zu klassifizieren. Die allgemeine Theorie der Diffusion betrachtet jedoch immer die Gesamtheit an Adoptionsvorgängen einer Gesellschaft ohne räumliche Unterschiede in der Diffusion zu berücksichtigen. In der Wissenschaft der Geographie interessiert allerdings zusätzlich der Einfluss dieser räumlichen Faktoren auf Veränderungsprozesse, so dass parallel zum klassischen Ansatz der Diffusionstheorie eine Theorie der räumlichen Diffusion entwickelt wurde, die im nächsten Kapitel vorgestellt wird.

## **3.2 Theorie der räumlichen Diffusion von Innovationen**

Die Geographie leistet einen wichtigen Beitrag in der Diffusionsforschung, da sie die Analysemöglichkeiten um die räumliche Komponente erweitert. Eine räumlich differenzierte Betrachtung ermöglicht es, die Diffusion nicht nur als Kurve über die Zeit zu beschreiben, sondern den Ursprung einer Innovation zu verorten und deren Ausbreitung im Raum nachzuvollziehen. Unterschiedliche räumliche Gegebenheiten wie die Gebäudestruktur oder unterschiedliche sozioökonomische Verhältnisse in einzelnen Gemeinden können Erklärungen für die räumlichen Unterschiede in der Diffusion von Innovationen bieten. Ebenso kann die Entfernung der einzelnen potentiellen Adoptoren zueinander Einfluss auf die Diffusion ausüben.

Erste Ansätze der geographischen Diffusionsforschung stammen aus der Kulturgeographie, die durch eine stärker modellorientierte Phase abgelöst wurde. Aus dieser ging schließlich die „Theorie der räumlichen Diffusion“ nach T. HÄGERSTRAND hervor. In den folgenden Abschnitten wird die Entwicklung der geographischen Diffusionsforschung (3.2.1), die Primärtheorie HÄGERSTRANDS (3.2.2) sowie deren Erweiterungen (3.2.3) beschrieben.

### 3.2.1 Entwicklung der geographischen Diffusionsforschung

Die Anfänge der geographischen Diffusionsforschung liegen in der Kulturgeographie, die sich mit der Erforschung der Diffusion von Kulturelementen beschäftigte und damit wichtige Erklärungsansätze für die Entwicklung von Kulturlandschaften lieferte. HETTNER (1929) beschreibt in seinem Werk „Der Gang der Kulturen über die Erde“ die Bedeutung von Innovationen für die gesellschaftliche Entwicklung (HETTNER 1929, S. 8): „Die meisten Fortschritte setzen sich aus einer großen Zahl einzelner Erfindungen zusammen. Deren Zahl ist unendlich groß; aber aus ihnen heben sich manche durch besondere Bedeutung heraus, indem sie eine vollkommene Umwälzung, Revolution der Verhältnisse, eine Änderung der Lebensformen bewirken.“

Ziel der sogenannten Kulturraumforschung ist es zu erörtern, worin der Ursprung neuer kultureller Erscheinungen liegt und wie sich diese im Raum verbreiten, um zu einem besseren Verständnis der Struktur und der funktionellen Zusammenhänge von Kulturlandschaften zu gelangen (WINDHORST 1983, S. 9). Die Diffusion von Innovationen führt jedoch nicht nur zu Veränderungen der Kulturlandschaft an sich, sondern ist im Zuge ihrer Verbreitung und Anwendung auch selbst Veränderungen unterworfen (BROWN 2009, S. 172).

Einflussreiche Studien in der Geographie waren die Arbeit von C.O. SAUER (1952), einem Schüler HETTNERs, der die räumliche Verbreitung von Innovationen im Agrarbereich untersuchte, sowie die Arbeit der amerikanischen Agrarsoziologen RYAN und GROSS (1943) zur Analyse des Verlaufs und der Ausbreitung von Hybridsaatgut in Iowa, USA (SAUER 1925; RYAN und GROSS 1943). Besondere Beachtung erlangte SVENSSON (1942), der in seinen Studien zur Ausbreitung von Kulturelementen in Siedlungen (Kleidung, Baustile etc.) erstmals quantifizierende Verfahren zur Beschreibung der Diffusionsprozesse einsetzte (SVENSSON 1942; WINDHORST 1983, S. 11).

Eine neue Phase der Diffusionsforschung wurde schließlich durch T. HÄGERSTRAND eingeleitet, einem schwedischen Geographen der Universität Lund. Er interessierte sich besonders für den räumlichen Prozess der Diffusion und untersuchte, welche Rolle die Entfernung zwischen Personen auf die Informationsausbreitung und schließlich auf die Adoption von Innovationen hat. Seine Ideen veröffentlichte er erstmals 1952 in seiner Dissertation „The Propagation of Innovation Waves“ und 1967 in „Innovation Diffusion as a Spatial Process“. Basierend auf empirischen Untersuchungen, leitete er bestimmte Regelmäßigkeiten im Diffusionsprozess ab, die es ihm ermöglichten, ein stochastisches Modell aufzubauen und räumliche Diffusionsprozesse zu simulieren (HÄGERSTRAND 1952; HÄGERSTRAND 1967).

Die Arbeiten HÄGERSTRANDs gelten bis heute als grundlegende Werke in der geographischen Innovations- und Diffusionsforschung und sind Ausgangspunkt einer Vielzahl von Diffusionsstudien, so dass auch von der „Theorie der räumlichen Diffusion“ nach HÄGERSTRAND gesprochen wird.

### 3.2.2 Die Primärtheorie der räumlichen Diffusion nach T. Hägerstrand

Ziel der Forschung HÄGERSTRANDs war es, die raum-zeitliche Ausbreitung von Inno-

vationen zu erklären. Seine Ideen zur räumlichen Diffusion stützen sich zu einem Großteil auf empirische Arbeiten in Mittelschweden, wo er die Ausbreitung von einigen landwirtschaftlichen Innovationen untersuchte. Darauf aufbauend formulierte er seine Hypothesen zur räumlichen Diffusion (HÄGERSTRAND 1967).

### 3.2.2.1 Das Grundkonzept

HÄGERSTRAND geht davon aus, dass die Adoption von Innovationen an die persönliche Informationsübertragung gebunden ist. Die mündliche Kommunikation über Innovationen spielt damit eine größere Rolle als die Informationsübermittlung durch Massenmedien. Des Weiteren nimmt er an, dass sich die Diffusion allein durch die räumliche Lage der Individuen und deren soziale Kommunikationsnetze erklären lässt. Der Diffusionsprozess wird also „losgelöst von der physisch-geographischen Raumausstattung und deren sozioökonomischen Rahmenbedingungen analysiert“ und allein auf die räumlichen Lagebeziehungen der Individuen reduziert (WINDHORST 1983, S. 73). Die Intensität des Informationsaustausches zwischen den einzelnen Personen wird jedoch auch von der räumlichen Struktur beeinflusst, d.h. sogenannte physische Barrieren wie Gebirge oder Seen können den Informationsfluss behindern. In gleichem Maße können auch soziale und ökonomische Barrieren die Diffusion beeinträchtigen. So geht HÄGERSTRAND davon aus, dass Individuen oder gesellschaftliche Gruppen ein unterschiedliches Adoptionsverhalten aufweisen. Je höher der Widerstand, desto mehr Informationen sind nötig, bis die Person die Innovation übernimmt. Schließlich kann der Diffusionsprozess auf unterschiedlichen hierarchischen Ebenen stattfinden, je nachdem ob sich Informationen über lokale, regionale oder nationale Netzwerke sozialer Kommunikation ausbreiten (BROWN 2009, S. 173).

Bei der Definition von Innovationen ist für HÄGERSTRAND allein entscheidend, ob die Innovation subjektiv als neu beurteilt wird, unabhängig vom Zeitpunkt ihrer tatsächlichen Markteinführung. Die Eigenschaften der Innovation selbst, sowie deren Veränderungen im Laufe des Diffusionsprozesses werden nicht berücksichtigt (WINDHORST 1983, S. 73).

### 3.2.2.2 Modellierung der Diffusion

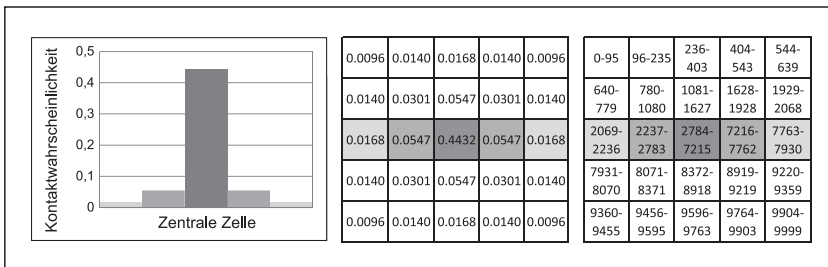
Um die Diffusion zu simulieren, stellte HÄGERSTRAND ein Modell auf, für das er einige vereinfachende Annahmen traf (s. WINDHORST 1983, S. 102ff.; HAGGETT 1991, S. 392f.). So wird eine Innovation erst übernommen, wenn ein Individuum eine bestimmte Anzahl von Nachrichten über die Innovation erhalten hat. Simuliert wird in diskreten Zeitschritten, wobei jeder Adopter im jeweils nächsten Zeitschritt eine Nachricht über die Innovation versendet. Die Wahrscheinlichkeit, eine Nachricht von einem Adopter zu erhalten, nimmt mit der Entfernung ab.

Zur Bestimmung der Kontaktwahrscheinlichkeit berechnete HÄGERSTRAND sog. „mean information fields“ (MIF), d.h. Felder, in denen sich Kontakte ereignen können. Abhängig von der Distanz zum Sender und den dazwischen liegenden Informationsbarrieren, bekommt jedes Feld eine bestimmte Wahrscheinlichkeit zugewiesen, mit der Kontakte zwischen Adoptern und Nicht-Adoptern eintreten können (BROWN 2009, S. 174). In jedem Zeitintervall wird also ein 25-Zellen-Gitter von MIFs über jeden Adopter zentriert, um zu bestimmen, in welche Zelle bzw. in welches MIF die

Nachricht im nächsten Zeitschritt  $t+1$  übertragen wird (s. Abb. 7). Zur Berechnung der Zufallszahlen, nach denen die Empfänger-Zelle im folgenden Schritt ausgewählt wird, verwendet HÄGERSTRAND eine Monte-Carlo-Simulation. Die erhaltenen Nachrichten werden in der jeweiligen Zelle gespeichert. Bei ausreichender Anzahl an Nachrichten erfolgt die Adoption und die Zelle wird im nächsten Zeitschritt selbst zum Sender. Mit Hilfe der MIFs und der Monte-Carlo-Simulation konnte HÄGERSTRAND somit den räumlichen Diffusionsprozess simulieren.

Die MIFs wurden auf Basis des Umzugsverhaltens von Personen und der Reichweite durchgeführter Telefongespräche erstellt. Zudem berücksichtigte HÄGERSTRAND das unterschiedliche Kommunikationsverhalten von Stadt- und Landbewohnern. Für detailliertere Beschreibungen des Modells siehe WINDHORST (1983, S. 99ff.) und HAGGETT (1991, S. 390ff.).

Abb. 7: Das Mean Information Field (MIF) im Diffusionsmodell



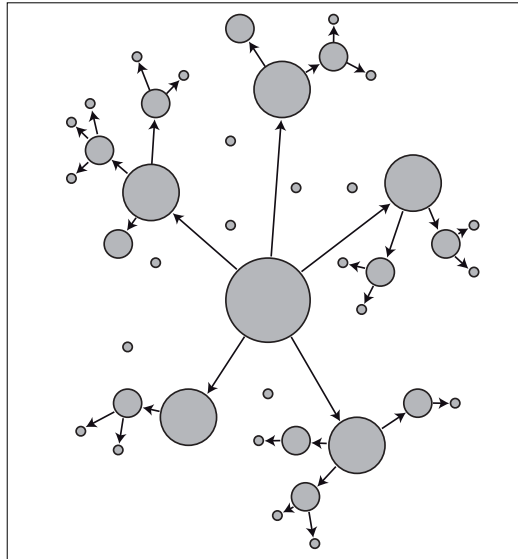
Quelle: HAGGETT (1991), S. 392

### 3.2.2.3 Empirische Regelmäßigkeiten und das Phasenmodell der Diffusion

Aus den empirischen Arbeiten HÄGERSTRANDS, seinen Simulationsergebnissen sowie aus nachfolgenden Studien lassen sich bestimmte Regelmäßigkeiten ableiten, mit denen ein Diffusionsprozess beschrieben werden kann. Zentrale Aspekte der räumlichen Diffusion sind demnach der Hierarchieeffekt, der Nachbarschaftseffekt und die Ausbildung einer S-Kurve, die die kumulierte Zunahme an Adoptionen über die Zeit beschreibt (WINDHORST 1983, S. 15f.; BROWN 2009, S. 174):

- Der **Hierarchieeffekt** ist Ausdruck für eine Diffusion, bei der sich Innovationen entlang eines hierarchischen Systems ausbreiten. So stellt HÄGERSTRAND fest, dass Innovationen zunächst in Orten höherer Zentralität entstehen und daraufhin in Orte niedrigerer Rangordnung vordringen. Die Diffusion verläuft folglich modellhaft von größeren zu kleineren Städten und gelangt schließlich zu Dörfern in abgelegeneren Räumen (s. Abb. 8).
- Beim **Nachbarschaftseffekt** handelt es sich um eine Diffusion, die an die direkte Übertragung der Information gebunden ist und damit von der Entfernung zwischen den einzelnen Personen abhängt. Modellhaft kann dies als eine zentrifugale Ausbreitung von einem Ursprungsort nach außen beschrieben werden. Die Innovation breitet sich also im Laufe der Zeit vom Stadtzentrum über das städtische

Abb. 8: Der Hierarchieeffekt der räumlichen Diffusion



Quelle: Eigene Darstellung nach HAGGETT (1991)

Umland bis in die ländlichen Gebiete aus. Der Nachbarschaftseffekt kann aber auch unabhängig von Städten im ländlichen Raum auftreten.

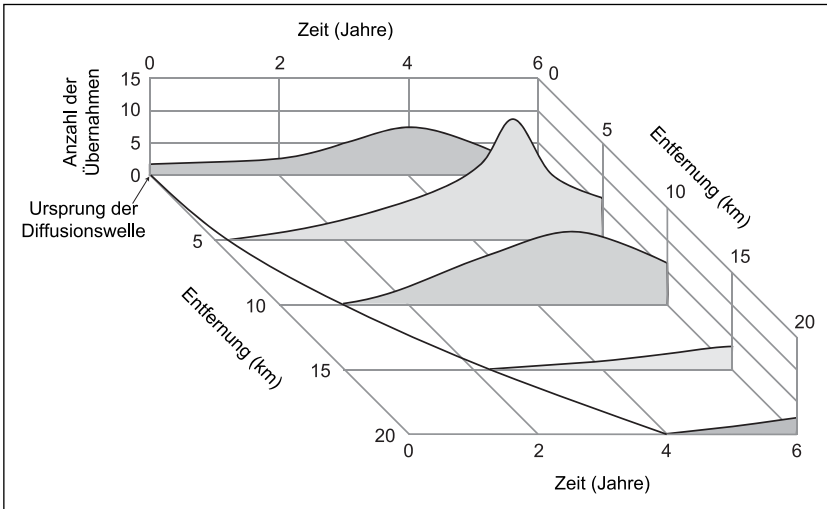
MORRILL, ein Schüler HÄGERSTRANDS, bestätigt den Ausbreitungsprozess vom Zentrum ins Hinterland und spricht in diesem Zusammenhang von Diffusionswellen: „the form is wave-like because as an area nearer the origin becomes saturated, the crest of most active change is displaced outward, and those who were at the edge of the original teller's fields of acquaintances now tell others at the edge of their own“ (MORRILL 1970, S. 259). Die Wellenform ergibt sich also aus dem Nachbarschaftseffekt, durch den die Innovation in immer weiter entfernte Räume getragen wird.

- Die Anzahl der Adoptoren über die Zeit lässt sich idealtypisch mit einer logistischen Kurve beschreiben, die der Form eines S gleicht. Die **S-Kurve** stellt das Integral der Normalverteilungskurve dar, in der die Adoptoren pro Zeiteinheit erfasst werden und mit Hilfe derer ROGERS (1962) die Klassifizierung in Adopterkategorien vornahm (vgl. Abschnitt 3.1.3.2). Auf die mathematische Formulierung des logistischen Diffusionsmodells wird in Kapitel 4.3 eingegangen.

MORRILL stellte in seinen Ausführungen über die Diffusionswellen die Diffusionskurven im dreidimensionalen Raum dar, indem er die Distanz als dritte Achse hinzunahm. In Abb. 9 wird deutlich, dass die Diffusion zunächst nur eine geringe Reichweite hat und geringe Adoptionsraten auftreten. Mit der Zeit nimmt die Reichweite der Diffusionswelle zu und der Gipfel der Diffusionswelle entfernt sich immer weiter vom Diffusionszentrum.

Je weiter die Entfernung vom Ausgangsort, desto später beginnt aufgrund der Wirkung des Nachbarschaftseffekts der Diffusionsprozess und desto geringer wird die Steigung der Diffusionskurve (s. Abb. 9) (MORRILL 1968, S. 4).

Abb. 9: Diffusionswellen in Raum und Zeit



Quelle: MORRILL (1968), S. 4

Die Ergebnisse der Diffusionsstudien fasst HÄGERSTRAND in einem Phasenmodell zusammen, das den idealtypischen Ablauf eines Diffusionsprozesses in einem städtischen System beschreibt. Demnach beginnt der Diffusionsprozess mit dem *Initialstadium*, in dem erste Adoptionszentren entstehen, so dass sich ein deutlicher Kontrast zwischen den Innovationszentren und den umliegenden Gebieten abzeichnet. Die zweite Phase wird als *Diffusionsstadium* bezeichnet, da nun die eigentliche Diffusion eintritt: Durch den Nachbarschaftseffekt dringt die Innovation in entlegene Regionen vor. Der Hierarchieeffekt bewirkt, dass die Innovation jetzt auch in Nebenzentren übernommen wird. In der dritten Phase, dem *Verdichtungsstadium*, nimmt die Adoption an allen Standorten zu, so dass sich die räumlichen Unterschiede ausgleichen. Im *Sättigungsstadium*, der vierten Phase, geht der Diffusionsprozess zu Ende. Die Anzahl an neuen Übernahmen nimmt weiter ab, bis alle potentiellen Adoptoren die Innovation übernommen haben (WINDHORST 1983, S. 107; HAGGETT 1991, S. 388).

Das idealtypische Modell HÄGERSTRANDS wurde aufgrund seiner vereinfachenden Annahmen und seiner Fokussierung auf die Nachfrage-Seite der Adoption stark kritisiert. Im Folgenden werden daher Kritikpunkte und Erweiterungen der Theorie der räumlichen Diffusion dargestellt.



### 3.2.3 Kritik und Erweiterungen der Theorie

HÄGERSTRAND selbst war sich bewusst, dass sein Grundmodell der Diffusion eine starke Vereinfachung der Wirklichkeit darstellt, so dass er im Laufe der Zeit einige Veränderungen vornahm. So stellte er die Kontaktwahrscheinlichkeit nicht allein als Funktion der Distanz, sondern auch in Abhängigkeit von der Anzahl an Personen pro Zelle dar, um der ungleichmäßigen Bevölkerungsverteilung Rechnung zu tragen. Zudem berücksichtigte er bei der Auslegung der MIFs verstärkt kulturelle, wirtschaftliche und politische Diffusionsbarrieren (HAGGETT 1991, S. 394ff.).

WINDHORST (1983) beschreibt, dass sich im Anschluss an das HÄGERSTRAND-Modell vier Forschungsschwerpunkte abzeichneten (WINDHORST 1983, S. 17f.). So beschäftigten sich einige Geographen vorwiegend mit einer verbesserten Anpassung des MIF an die Realität. Mit dem Einsatz von Computern war es möglich, den Diffusionsprozess unter verschiedenen Ausgangssituationen und Diffusionsbarrieren zu simulieren und damit die Auslegung des MIF zu variieren. Eine andere Forschungsrichtung lag in der einfachen Anwendung des Diffusionsmodells, um reale Diffusionsprozesse nachzuvollziehen und Prognosen zu erstellen. Auch wurde das Modell in andere Disziplinen übertragen, wie in die Migrations- oder Verkehrsforschung. Der letzte Forschungszweig beschäftigte sich vor allem mit der mathematischen Formulierung des Diffusionsprozesses in Anlehnung an Ansätze aus der Physik und der Biologie. Besonders in den USA kam das stochastische Modell zum Einsatz, wobei das Interesse vorrangig der Beschreibung der Diffusion in städtischen Systemen galt. In der deutschen Geographie kamen dagegen die quantitativen Ansätze und das Simulationsmodell HÄGERSTRANDS nicht zur Anwendung; hier wurde nur mit dem deskriptiven Phasenmodell gearbeitet. WINDHORST (1983) führt dies auf die starke Präsenz der Münchner Schule der Sozialgeographie zurück, welche die Geographie der 60er Jahre in Deutschland bedeutend prägte (WINDHORST 1983, S. 22).

Eine theoretische Neuorientierung in der Diffusionsforschung setzte erst Anfang der 70er Jahre ein. So bemängelte COHEN (1972), dass soziale und wirtschaftliche Faktoren im Modell nicht berücksichtigt werden (COHEN 1972, S. 11f.). GOULD (1975) hält fest, dass das persönliche Kommunikationsfeld mit dem Einkommen variiert, d.h. Personen, die über höhere finanzielle Mittel verfügen, bewegen sich tendenziell über größere Distanzen, was Auswirkungen auf den Diffusionsprozess hat (GOULD 1975, S. 11).

Am meisten Beachtung fanden jedoch die Arbeiten BROWNS (BROWN 1979; BROWN 1981). Er selbst war der Überzeugung, einen Paradigmenwechsel in der geographischen Innovations- und Diffusionsforschung herbeizuführen (BROWN 1979, S. 52). Die entscheidende Veränderung lag in der Verlagerung der Perspektive von der Nachfrage- zur Angebotsseite der Diffusion. Damit stand nicht mehr der individuelle Adoptionsprozess im Blickfeld der Untersuchung, sondern das äußere Umfeld, in das der Diffusionsprozess eingebettet ist. BROWN (1979) bezeichnet dies als Markt- und Infrastrukturperspektive (BROWN 1979, S. 45). Diese Forschungsrichtung geht der Frage nach, wie die Innovation verschiedenen sozialen Gruppen verfügbar gemacht wird. Als zentrale Begriffe nennt er den „diffusion propagator“, die „diffusion agency“ und die „diffusion strategy“. Nach BROWN beginnt der Diffusionsprozess mit einem

„propagator“, d.h. einer Person oder einer Institution, die die Diffusion vorantreiben will. Mit Hilfe von „diffusion agencies“, die bestimmte Vermarktungsstrategien verfolgen, wird die Innovation verbreitet. Als Beispiel nennt er die Diffusion von Hybridsaatgut unter Landwirten in Iowa, die das Produkt nicht als erste adoptierten, weil sie innovativer waren, sondern weil sie auf bestimmte Marketingstrategien der landwirtschaftlichen Einrichtungen reagierten (BROWN 2009, S. 180). Erst wenn die Innovations-Information über die „agencies“, d.h. in diesem Fall über die landwirtschaftlichen Einrichtungen, verfügbar gemacht wird, beginnt schließlich der individuelle Adoptions- und Diffusionsprozess.

Entscheidend für die Diffusion ist damit die Lage der „diffusion agencies“ und die Entfernung der potentiellen Adoptoren zu diesen „agencies“. Zudem tragen die wirtschaftlichen, sozialen und demographischen Eigenschaften der Adoptoren zur raum-zeitlichen Differenzierung des Diffusionsprozesses bei. Brown räumt jedoch ein, dass es Diffusionsprozesse gibt, die unabhängig von „diffusion agencies“ ablaufen, in denen sich die Innovation allein durch Mundpropaganda verbreitet (BROWN 1981). Eine wichtige Rolle spielt auch das Vorhandensein einer funktionierenden Infrastruktur, wie er anhand von Untersuchungen in Mexico und Indien feststellte (BROWN 2009, S. 179).

Neben der Markt- und Infrastrukturperspektive beschreibt Brown eine Entwicklungsperspektive der Diffusion (BROWN 1979, S. 45). Hier steht der Einfluss der Diffusion auf das individuelle Wohlergehen, die wirtschaftliche Entwicklung und den sozialen Wandel im Vordergrund. Studien in Entwicklungsländern zeigten, dass die Diffusion von technologischen Innovationen die regionalen Disparitäten oft erhöhen (BROWN 1981).

Etwa zur gleichen Zeit entstanden auch Forschungsarbeiten, die den Adoptionsprozess über einen behavioristischen Ansatz wieder stärker in den Fokus rücken. So versucht WINDHORST (1979), den Verlauf der Adoption anhand der unterschiedlichen Beurteilung der Innovation von Adoptoren und deren Verhalten zu erklären (WINDHORST 1979). AVINOAM (1982) betont in seiner Arbeit, dass jedes Individuum unterschiedlichen Umweltbedingungen ausgesetzt ist, unter denen der Adoptionsprozess stattfindet. Um die Diffusion zu erklären, müssten also Informationen über die individuellen Werte, Normen und Einstellungen gegenüber der Innovation, sowie der sozioökonomische Status und der institutionelle Rahmen, in den das Individuum eingebettet ist, bekannt sein (AVINOAM 1982, S. 62).

Die Theorieentwicklung zeigt also, dass es sowohl Ansätze gibt, die den Einfluss von äußeren Faktoren als Erklärung der unterschiedlichen Verläufe der räumlichen Diffusion heranziehen, als auch solche, die auf das spezifische Adoptionsverhalten von Individuen abheben. Aktuelle Forschungsarbeiten der letzten Jahre, die in Kapitel 5 beschrieben sind, zeigen, inwiefern sich die Theorie der (räumlichen) Diffusion auch aus heutiger Sicht zur Erklärung von Diffusionsprozessen eignet.

## 4 Modellierung der Diffusion von Innovationen

Der Ansatz der Diffusionsmodellierung stammt ursprünglich aus der Epidemiologie, in der die Diffusion von Krankheiten in Form von Ansteckungsprozessen modelliert wurde (PEARL 1925; BAILEY 1957). Bei der Modellierung der Diffusion von Innovationen wird die Idee der Ansteckung auf den Kommunikationsprozess übertragen, in dem ein Individuum die Information über die Innovation an eine andere Person weitergibt.

Die Grundmodelle der Innovationsdiffusion wurden bis in die 1970er Jahre entwickelt, so dass die darauf folgenden Modelle hauptsächlich Erweiterungen darstellen. Durch die Möglichkeiten der Erklärung und Prognose der Diffusion mittels Diffusionsmodellen genießt die Diffusionsforschung hohe Popularität. Die meisten Anwendungen finden sich im Bereich Marketing und in der Konsumgüterforschung (MEADE und ISLAM 2006, S. 520).

In diesem Kapitel werden zuerst das Grundmodell der Diffusion (Abschnitt 4.1) und darauf aufbauend die drei klassischen Variationen des Grundmodells vorgestellt: das exponentielle (4.2), das logistische (4.3) und das semilogistische Diffusionsmodell (4.4), das auch Bass-Modell genannt wird und für die Modellierung der Diffusion in Kapitel 8 verwendet wird. Zum Schluss des Kapitels werden Kritikpunkte am Bass-Modell genannt (4.5) und eine Erweiterung des Bass-Modells vorgestellt, in dem die räumliche Dimension der Diffusion integriert ist (4.6).

### 4.1 Einführung in die Diffusionsmodellierung

Diffusionsmodelle sind mathematische Funktionen, die darauf abzielen, den Ausbreitungsverlauf von Innovationen auf aggregierter Ebene im Zeitverlauf zu beschreiben. Gelingt es, den Diffusionsprozess in einem Diffusionsmodell abzubilden, so können Prognosen für die weitere Entwicklung erstellt werden (MAHAJAN und MULLER 1979, S. 55).

Um Produktion und Absatz besser planen zu können, interessiert in der Marktforschung meist der Ausbreitungsverlauf, die Geschwindigkeit der Diffusion sowie der Zeitpunkt und die Höhe der maximalen Nachfrage eines Produkts und schließlich dessen Gesamtabsatz. Je nach Fragestellung und Ziel der Untersuchung lassen sich Diffusionsmodelle in drei verschiedene Kategorien einteilen (MAHAJAN et al. 1990, S. 15f.):

- Deskriptive Modelle beschreiben den Diffusionsprozess und dienen v.a. der Überprüfung von Hypothesen.
- Normative Modelle haben zum Ziel, wesentliche Einflussfaktoren auf den Diffusionsprozess zu identifizieren und darauf aufbauend optimale Marketingstrategien (bzgl. Preis und Werbung) zu entwickeln, um den Absatz zu erhöhen.
- Mit Hilfe von Prognose-Modellen sollen Aussagen über die zukünftige Diffusion eines Produkts und somit über potentielle Verkaufszahlen getroffen werden.

Diffusionsmodelle erfreuen sich seit Jahrzehnten großer Beliebtheit, da sie aufgrund ihrer einfachen Struktur und der intuitiven Interpretation der Parameter zur Beantwortung praktischer Fragestellungen herangezogen werden können (BASS 2004, S. 1834f.). Um verschiedene Einflussfaktoren auf den Diffusionsprozess zu berücksichtigen, wurde im Laufe der Zeit eine Vielzahl an Diffusionsmodellen entwickelt, die sich jedoch auf eine einfache Differentialgleichung, das Grundmodell der Diffusion, zurückführen lassen.

Ziel dieses Grundmodells ist es, die Anzahl an Adoptoren pro Zeiteinheit zu berechnen. Zur Vereinfachung wird davon ausgegangen, dass jedes Individuum nur eine Einheit eines Produkts erwerben kann und keine Wiederholungs- oder Ersatzkäufe stattfinden. Des Weiteren besteht die Annahme eines konstanten, homogenen Marktpotentials, d.h. die maximale Anzahl potentieller Adoptoren bleibt im Betrachtungszeitraum unverändert (MAHAJAN und PETERSON 1985, S. 13ff.).

Das Modell geht davon aus, dass es für jede Innovation eine maximale Anzahl an Adoptoren gibt, die das Produkt übernehmen (Marktpotential  $M$ ). Durch die Adoption des Produkts, die oft mit dem Kauf gleichgesetzt wird, ergibt sich für jede Zeitperiode die kumulierte Anzahl an Adoptoren  $N_t$ . Die Differenz  $M - N_t$  stellt somit das noch nicht ausgeschöpfte Marktpotential dar, das mit zunehmender Adoption im Zeitverlauf abnimmt. Gleichung 4.1 beschreibt das Grundmodell der Diffusion, durch das die Anzahl an neuen Adoptoren  $n_t$  pro Zeiteinheit berechnet wird. Hierbei handelt es sich um die erste Ableitung der kumulierten Anzahl an Adoptoren  $N_t$  nach der Zeit. Die Zunahme an Adoptoren pro Zeiteinheit hängt also von dem noch unausgeschöpften Marktpotential  $M - N_t$  ab sowie von der Adoptionswahrscheinlichkeit  $g_t$  (MAHAJAN und PETERSON 1985, S. 13ff.; FANTAPIÉ ALTOBELLI 1991, S. 36).

$$n_t = \frac{dN_t}{dt} = g_t * (M - N_t) \quad (4.1)$$

$n_t$ : Anzahl der erwarteten Adoptoren pro Zeiteinheit zum Zeitpunkt  $t$  (Diffusionsrate)

$M$ : Marktpotential, d.h. maximale Anzahl potentieller Adoptoren (Sättigungsgrenze)

$N_t$ : kumulierte Anzahl an Adoptoren zum Zeitpunkt  $t$

$g_t$ : Adoptionswahrscheinlichkeit zum Zeitpunkt  $t$  (Diffusionskoeffizient)

Durch Umformung der Gleichung 4.1 ergibt sich der Diffusionskoeffizient  $g_t$ , der Ausdruck für die Diffusionsgeschwindigkeit ist und den Verlauf der Diffusionskurve wesentlich beeinflusst.

$$g_t = \frac{n_t}{(M - N_t)} \quad (4.2)$$

Je nach Ausformulierung von  $g_t$  ergeben sich unterschiedliche Diffusionsmodelle. Im Grundmodell wird davon ausgegangen, dass die Funktion  $g_t$  durch folgende Parameter bestimmt wird:

$$g_t = a + b * N_t \quad (4.3)$$

- a*: Koeffizient der Innovatorennachfrage bzw. für den von außen auf das soziale System wirkenden Einfluss
- b*: Koeffizient der Imitatorennachfrage bzw. für den von innen auf das soziale System wirkenden Einfluss

Die Diffusionsgeschwindigkeit hängt somit von der Höhe der Innovatorennachfrage *a* und der Höhe der Imitatorennachfrage *b* ab. Generell wird davon ausgegangen, dass Innovatoren ausschließlich durch externe Kommunikationsquellen (wie Massenmedien) beeinflusst werden und Imitatoren allein durch persönliche Kommunikation. Setzt man Gleichung 4.3 in 4.1 ein, so ergeben sich je nach Wahl der Parameter drei unterschiedliche Diffusionsmodelle: das exponentielle, das logistische und das semilogistische Diffusionsmodell (s. Tab. 1), die in den folgenden Kapiteln vorgestellt werden.

Tab. 1: Grundmodelle der klassischen Diffusionstheorie

|                             | Exponentielles Diffusionsmodell   | Logistisches Diffusionsmodell                              | Semilogistisches Diffusionsmodell   |
|-----------------------------|-----------------------------------|--|---|
| Diffusionskoeffizient $g_t$ | $b = 0$<br>$g_t = a$              | $a = 0$<br>$g_t = b * N_t$                                 | $a > 0; b > 0$<br>$g_t = a + b * N_t$   |
| Differentialgleichung $n_t$ | $\frac{dN_t}{dt} = a * (M - N_t)$ | $\frac{dN_t}{dt} = b * N_t * (M - N_t)$                    | $\frac{dN_t}{dt} = (a + b * N_t)(M - N_t)$  |
| Funktionsgleichung $N_t$    | $N_t = M * (1 - e^{-at})$         | $N_t = \frac{M}{1 + \frac{M - N_0}{N_0} * e^{-bM(t-t_0)}}$ | $N_t = \frac{M - \frac{a * (M - N_0)}{a + bN_0} * e^{-(a+bM)*(t-t_0)}}{1 + \frac{b * (M - N_0)}{a + bN_0} * e^{-(a+bM)*(t-t_0)}}$ |

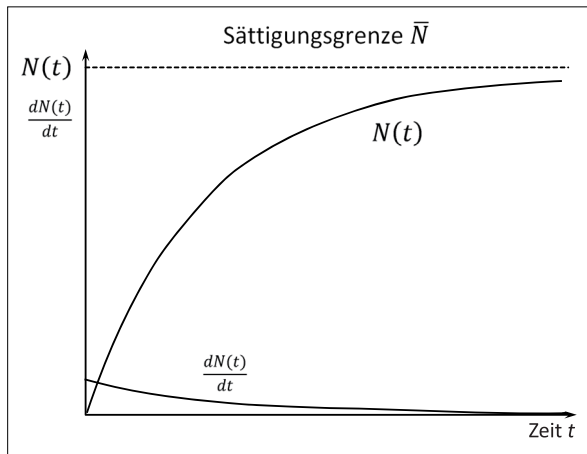
Quelle: MAHAJAN UND PETERSON (1985), S. 13ff. und HÜSER (2005), S. 43

## 4.2 Das exponentielle Diffusionsmodell

Das exponentielle Diffusionsmodell wird auch als „external influence model“ bezeichnet, da hier davon ausgegangen wird, dass die potentiellen Adoptoren ausschließlich von externen Kommunikationsquellen beeinflusst werden. Die interpersonelle Kommunikation spielt in diesem Modell für die Diffusion keine Rolle ( $b=0$ ) (MAHAJAN und PETERSON 1985, S. 15ff.).

Die Geschwindigkeit der Diffusion hängt also allein vom Innovationskoeffizienten *a* ab, der – unter der Annahme einer homogenen Käufergruppe – als für alle potentiellen Adoptoren gleich groß unterstellt wird. Je höher *a*, d.h. je größer der Einfluss der Massenkommunikation, desto schneller nähert sich die Diffusionskurve der Sättigungsgrenze an. Die Diffusionskurve verläuft degressiv steigend, da mit zunehmender Anzahl an Adoptoren die Zuwachsraten abnehmen (s. Abb. 10).

Abb. 10: Die exponentielle Diffusionskurve und ihre Ableitung



Quelle: MAHAJAN (1985), S. 16 und FANTAPIÉ ALTOBELLI (1991), S. 38

Das Modell wurde von FORT AND WOODLOCK (1960) entwickelt und eignet sich dazu, die Diffusion von Innovationen im Lebensmittelbereich zu beschreiben (FORT und WOODLOCK 1960). MAHAJAN (1985) schlägt vor, das Modell zu verwenden, wenn es sich um Güter handelt, die über Massenmedien verbreitet werden und die keine zusätzlichen Informationen für den Gebrauch voraussetzen. Das Modell trifft nur zu, wenn die Adoptoren räumlich isoliert voneinander sind und keine persönliche Kommunikation stattfindet (MAHAJAN und PETERSON 1985, S. 17). Ein exponentieller Diffusionsverlauf tritt auch ein, wenn in der Einführungsphase von Innovationen mit geringen Widerständen gerechnet werden kann (LEWANDOWSKI 1974, S. 264).

SCHMALEN (1993) stellt jedoch fest, dass das Modell der externen Kommunikation in der Forschung weitgehend widerlegt ist (SCHMALEN et al. 1993, S. 514), da eine völlige Isolation der Adoptoren in den wenigsten Diffusionsprozessen vorliegt. Des Weiteren wird bemängelt, dass in der Realität keine kontinuierlich sendende Kommunikationsquelle existiert, die alle Individuen erreicht. Schließlich geht das Modell von einer homogenen Bevölkerung aus und unterscheidet somit nicht zwischen individuellen oder segmentspezifischen Verhaltensweisen (KAAS 1973, S. 117; CORSTEN et al. 2005, S. 22).

### 4.3 Das logistische Diffusionsmodell

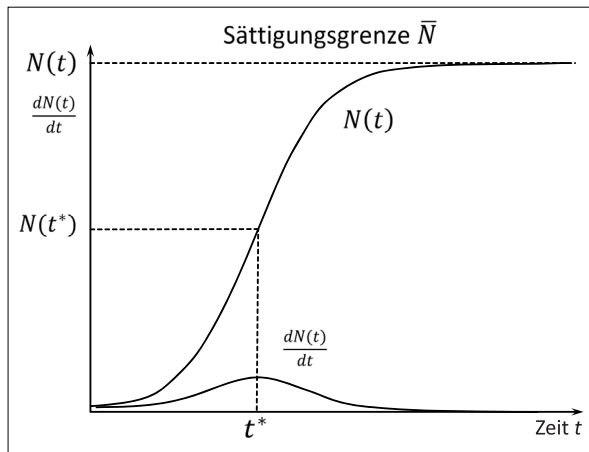
Im Gegensatz zum exponentiellen Diffusionsmodell beruht das logistische Diffusionsmodell auf der Annahme, dass die Diffusion allein durch die persönliche Kommunikation innerhalb des sozialen Systems vorangetrieben wird, so dass auch von einem „internal influence model“ gesprochen wird (MAHAJAN und PETERSON 1985,

S. 17ff.). In Anlehnung an das Kontakt- oder Ansteckungsmodell aus der Epidemiologie wird die Imitation in Form einer logistischen Kurve dargestellt.

Die Differentialgleichung in Tab. 1 zeigt, dass der Zuwachs an Adoptoren pro Zeiteinheit sowohl proportional zur Anzahl der Käufer der Vorperiode ( $N_t$ ) ist, als auch zu den verbleibenden potentiellen Käufern ( $M - N_t$ ). Die Geschwindigkeit der Diffusion wird durch den Imitationskoeffizient  $b$  bestimmt. Auch dieses Modell geht von einer homogenen Adopterpopulation aus, so dass die Wahrscheinlichkeit, dass ein Adopter mit einem potentiellen Adopter Kontakt aufnimmt, für jeden potentiellen Adopter im Zeitablauf gleich hoch ist. Alternativ kann der Imitationskoeffizient  $b$  auch als durchschnittliche Zahl effizienter Treffen interpretiert werden, in dem ein Adopter einen potentiellen Adopter zur Adoption veranlasst (HESSE 1987, S. 15). Damit die Diffusion beginnen kann, ist ein Anfangsbestand  $N_0$  von mindestens einem Adopter nötig.

Die Diffusionskurve verläuft S-förmig, da sie bis zu einem Wendepunkt mit zunehmenden dann mit abnehmenden Zuwachsraten monoton steigt, bis sie sich asymptotisch der Sättigungsgrenze  $\bar{N}$  annähert. Das Marktpotential wird im Wendepunkt genau zur Hälfte ausgeschöpft (s. Abb. 11).

Abb. 11: Die logistische Diffusionskurve und ihre Ableitung



Quelle: MAHAJAN (1985), S. 19 und FANTAPIÉ ALTABELLI (1991), S. 40

Der logistische Ansatz geht in den Wirtschaftswissenschaften auf MANSFIELD (1961) zurück, der die Ausbreitung von Verfahrensinnovationen in der amerikanischen Industrie anhand von zwölf empirischen Beispielen mit Hilfe der logistischen Diffusionskurve darstellen konnte (MANSFIELD 1961). Nach MAHAJAN (1985) eignet sich das logistische Modell, wenn die Innovation sozial auffällig und komplex ist und damit ein hoher Bedarf an zuverlässigen Informationen besteht, den die Massenmedien nicht liefern können. Zudem sollte das Marktpotential relativ klein und homogen sein (MAHAJAN und PETERSON 1985, S. 18f.).

Kritiker wenden ein, dass für die Imitation eines Verhaltens nicht zwingend ein direkter Kontakt nötig ist, sondern dass oft auch die reine Beobachtung ausreicht (KAAS 1973, S. 37). Genauso wie im exponentiellen Modell wird auch hier eine homogene Adopterpopulation unterstellt und ein im Zeitverlauf gleichbleibendes Marktpotential. Durch technische Verbesserungen oder eine Veränderung des Preis-Leistungsverhältnisses kann es jedoch zur Erschließung neuer Marktsegmente kommen. Da die Diffusion allein auf Imitation basiert, werden der Einfluss von Umweltfaktoren oder externer Quellen ausgeschlossen. Schließlich fließen in das Modell auch keine rationalen Einflussfaktoren wie z.B. der Preis mit ein (ROTH 1993, S. 155; HENSEL und WIRSAM 2008, S. 55).

## 4.4 Das semilogistische Diffusionsmodell

Das semilogistische Diffusionsmodell setzt sich aus dem exponentiellen und dem logistischen Diffusionsmodell zusammen und wird oft auch als Bass-Modell bezeichnet, da es von F. BASS, einem amerikanischen Professor der Universität Dallas, Texas, aus dem Bereich Marketing, entscheidend geprägt wurde. BASS entwickelte das Modell zur Beschreibung und Prognose des Diffusionsverlaufs von neuartigen, langlebigen Konsumgütern und testete es erfolgreich an elf Produkten, wie Kühlschränken, Fernsehern oder Klimaanlage. In den Folgejahren kam es besonders für Marketinganalysen in Industrie und Handel zur Anwendung und erreichte damit so große Anerkennung, dass es als Standardmodell der Diffusionsforschung bezeichnet wird (MAHAJAN et al. 1986, S. 5; LÜTHJE 2008, S. 1045).

BASS unterscheidet in seinem Modell der gemischten Kommunikation („mixed influence model“) nach MAHAJAN UND PETERSON (1985, S. 21) zwischen zwei Käufertypen, den Innovatoren und den Imitatoren. Innovatoren kaufen ein neues Produkt, weil sie besonders an Neuheiten interessiert sind und gründen ihre Kaufentscheidung auf Werbebotschaften der Massenmedien. Imitatoren orientieren sich dagegen an den anderen Mitgliedern des sozialen Systems. Je größer die Verbreitung eines Produkts, desto stärker wird der soziale Druck auf die übrigen potentiellen Adoptoren.

Die mathematische Grundlage für das Diffusionsmodell bildet die Hazard-Funktion  $h_t$  (s. Gleichung 4.4), die die Wahrscheinlichkeit der Adoption zu einem Zeitpunkt  $t$  bestimmt (MAHAJAN et al. 1990, S. 3f.).

$$h_t = a + \frac{b}{M} * N_t \quad (4.4)$$

$$n_t = \frac{dN_t}{dt} = h_t * (M - N_t)$$

$$n_t = \frac{dN_t}{dt} = \left( a + \frac{b}{M} * N_t \right) * (M - N_t)$$



$$n_t = \frac{dN_t}{dt} = a(M - N_t) + \frac{b}{M} * N_t * (M - N_t) \quad (4.5)$$

$n_t$ : Anzahl der erwarteten Adoptoren pro Zeiteinheit zum Zeitpunkt  $t$ , bzw. Nachfrage zum Zeitpunkt  $t$  (Diffusionsrate)

$M$ : Marktpotential, d.h. maximale Anzahl potentieller Adoptoren (Sättigungsgrenze)

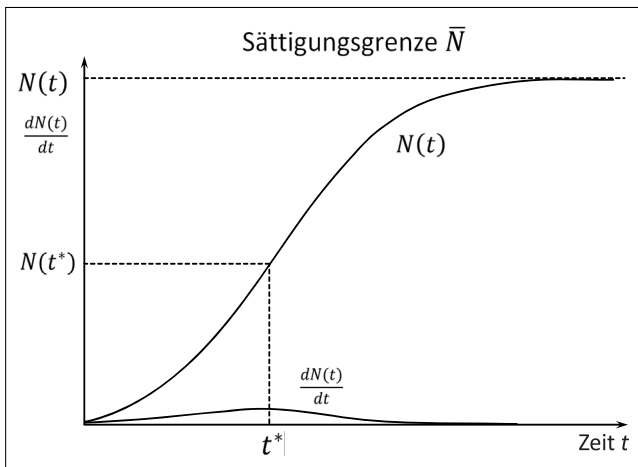
$N_t$ : Anzahl der bis zum Zeitpunkt  $t$  kumulierten Adoptoren, bzw. kumulierte Nachfrage zum Zeitpunkt  $t$

$a$ : Innovationskoeffizient

$b$ : Imitationskoeffizient

Anders als im semilogistischen Modell setzt das Bass-Modell den Imitationskoeffizienten ins Verhältnis zum maximalen Marktpotential  $M$ . Gleichung 4.5 zeigt, dass sich das Modell additiv aus dem exponentiellen und dem logistischen Modell zusammensetzt: mit  $b=0$  entspricht das Bass-Modell dem exponentiellen, mit  $a=0$  dem logistischen Modell. Die Anzahl an Adoptoren in einer Periode ergibt sich also aus der Summe an Innovatoren und Imitatoren. Die Bedeutung der Innovatoren ist zu Beginn des Diffusionsprozesses am größten und nimmt im Laufe der Zeit ab. Die Adoption aufgrund von Imitation steigt mit zunehmender Marktsättigung aufgrund des stärker werdenden sozialen Drucks an. Abb. 5 zeigt die Zusammensetzung der Diffusionskurve nach Adoptertypen. Die kumulative Anzahl an Adoptoren  $N_t$  beschreibt nach dem Bass-Modell auch die typische S-Kurve der Diffusion (MAHAJAN ET AL. 1990, S. 4) (s. Abb. 12). Die Diffusionsgeschwindigkeit ergibt sich aus der Summe der Koeffizienten ( $a+b$ ), der Quotient der Koeffizienten ( $a/b$ ) bestimmt die Form der Diffusionskurve (LÜTHJE 2008, S. 1046).

Abb. 12: Die semilogistische Diffusionskurve und ihre Ableitung



Quelle: FANTAPIÉ ALTABELLI (1991), S. 43

Für die weiteren Berechnungen wird  $F_t \equiv \frac{N_t}{M}$  gesetzt (BASS 1969, S. 217f.; MAHAJAN und WIND 1986, S. 6f.). Aus der nicht-linearen Differentialgleichung (4.6) wird die Lösung der Funktion bestimmt (4.7):

$$f_t = \frac{dF_t}{dt} = (a + b * F_t)(1 - F_t) \quad (4.6)$$

$$F_t = \frac{1 - e^{-(a+b)t}}{1 + \left(\frac{a}{b}\right) * e^{-(a+b)t}} \quad (4.7)$$

Die kumulierte Anzahl an Adoptoren nach BASS beträgt:

$$N_t = M * F_t = M * \frac{1 - e^{-(a+b)t}}{1 + \left(\frac{a}{b}\right) * e^{-(a+b)t}} \quad (4.8)$$

Der Wendepunkt mit der höchsten Diffusionsrate wird zum Zeitpunkt  $t_w$  erreicht:

$$t_w = -\frac{1}{a + b} \ln\left(\frac{a}{b}\right) \quad (4.9)$$

Der wesentliche Beitrag des Bass-Modells liegt in der gleichzeitigen Berücksichtigung von externen und internen Kommunikationskanälen und in der Formulierung eines mathematischen Modells, das erlaubt, die Anzahl an Adoptoren pro Zeiteinheit zu berechnen. Trotz einiger Schwachpunkte, die im folgenden Kapitel diskutiert werden, liefert das Modell zur aggregierten Beschreibung der Diffusion von technischen Gütern relativ gute Ergebnisse (ROTH 1993, S. 156). Einen Überblick über die Anwendung des Bass-Modells in empirischen Studien geben MAHAJAN et al. (1990) und MEADE und ISLAM (2006).

## 4.5 Kritik am Bass-Modell und Modellerweiterungen

Die in der Realität wirkenden Einflussfaktoren auf den Diffusionsprozess sind derart komplex, dass sie nicht alle in einem Diffusionsmodell berücksichtigt werden können. Auch im Bass-Modell werden deshalb vereinfachende Annahmen getroffen, die zu einigen Nachteilen führen (vgl. MAHAJAN und PETERSON 1985, S. 24f.):

- **Konstantes Marktpotential:** Wie das exponentielle und logistische Diffusionsmodell geht auch das Bass-Modell von einem über den Beobachtungszeitraum konstanten Marktpotential aus. Änderungen der Bevölkerungszahlen, Preisschwankungen und technische Veränderungen können jedoch die Adoptionsent-

scheidung beeinflussen und somit zu einer Zu- oder Abnahme des Marktpotentials im Diffusionsverlauf führen (CORSTEN et al. 2005, S. 34; HÜSER 2005, S. 50f.).

- **Mangelnde Berücksichtigung verhaltenswissenschaftlicher Grundlagen:**
  - *Vollständige paarweise Interaktion:* Das Bass-Modell (sowie das logistische Modell) geht von einer vollständigen Interaktion der Adoptoren und potentiellen Adoptoren aus (wegen  $N_t * (M - N_t)$ ), die in der Realität jedoch kaum gegeben ist. Zudem wird vorausgesetzt, dass alle Adoptoren bereit sind, andere Personen über die Innovation zu informieren. Diese Motivation nimmt jedoch mit der Dauer der Produktkenntnis ab. Auch kann der Einfluss des sozialen Drucks auf potentielle Adoptoren in Frage gestellt werden, da dieser nur wirkt, wenn die Nicht-Adoptoren mit ihrem ablehnenden Verhalten tatsächlich gegen Werte und Normen des sozialen Systems verstoßen (GIERL 1987, S. 36ff.).
  - *Binärer Diffusionsprozess:* Die klassischen Diffusionsmodelle basieren auf einem binären Diffusionsprozess, der nur zwischen Adoptoren und Nicht-Adoptoren unterscheidet. Die einzelnen Entscheidungsschritte des Adoptionsprozesses, wie unter 3.1.2 beschrieben, gehen nicht in das Modell ein.
  - *Konstante Diffusionskoeffizienten:* Auch das Bass-Modell unterstellt, dass Innovations- und Imitationskoeffizient über den Diffusionsverlauf konstant sind. Damit werden jedoch Änderungen des Adoptionsverhaltens und die Heterogenität der Population nicht berücksichtigt.
- **Nichteinbeziehung absatzpolitischer Instrumente:** Als einer der Hauptkritikpunkte am Bass-Modell wird aufgeführt, dass Marketingstrategien nicht im Modell berücksichtigt werden. Für den Einsatz des Modells zur Absatzplanung ist es jedoch entscheidend zu wissen, wie sich Preisänderungen, Werbekampagnen oder bestimmte Verkaufsförderungen auf die Diffusion von Produkten auswirken (SCHMALEN et al. 1993, S. 518).
- **Wechselbeziehungen mit anderen Technologien:** Die Innovation wird im Bass-Modell als isoliert von anderen Technologien betrachtet. In der Realität liegen jedoch oft Wechselbeziehungen zu anderen Technologien vor: komplementäre Güter fördern die Diffusion der Innovation, substitutive hemmen die Ausbreitung (PETERSON und MAHAJAN 1978).
- **Angebotsrestriktionen:** Durch Kapazitätsengpässe bei der Produktion oder Probleme im Vertrieb kann es zu Angebotsmängeln kommen, die den Diffusionsprozess hemmen (BROWN 1981).
- **Keine Berücksichtigung der räumlichen Diffusion:** Das Bass-Modell geht davon aus, dass die Diffusion in einem geschlossenen räumlichen System stattfindet. Die räumliche Dimension der Diffusion d.h. der Einfluss der Distanz zwischen den Adoptoren auf den Diffusionsprozess, wird im Modell nicht berücksichtigt (s. Abschnitt 4.6).
- **Mangelnde Prognosetauglichkeit:** Eine zuverlässige Schätzung der Diffusionskurve ist nur möglich, wenn ausreichend Datenpunkte vorhanden sind, innerhalb derer auch der Wendepunkt liegt. Ist der Höhepunkt der Diffusion bereits überschritten, stellt sich jedoch die Frage nach dem Nutzen einer Prognose durch das Bass-Modell (FELTEN 2001, S. 12f.).

- **Problematik von Analogieschlüssen und Expertenschätzungen:** Vorsicht ist zudem geboten bei der Übertragung der Werte von Modellparametern ähnlicher Innovationen, bei denen der Diffusionsprozess bereits abgeschlossen ist, da die Zusammenhänge zwischen den Innovationen nie vollständig bekannt sind. Auch kann der Nutzen von Expertenschätzungen in Frage gestellt werden: Wenn Experten in der Lage sind, die Modellparameter für die Diffusion zu schätzen, ist fraglich, ob sie ein Diffusionsmodell zur Entscheidungsunterstützung benötigen (FELTEN 2001, S. 14f.).

Die aufgezeigten Mängel am Bass-Modell führten im Laufe der Zeit zu Weiterentwicklungen. Da es jedoch schwierig ist, alle Einflussfaktoren gleichzeitig in einem Modell zu berücksichtigen, stellen auch die Erweiterungen nur Partialmodelle dar. Zudem ist zu beachten, dass eine höhere Flexibilität eines Modells immer die Schätzung zusätzlicher Parameter erfordert (MAHAJAN und PETERSON 1985, S. 35).

Die Erweiterungsmodelle können unterschieden werden in Modelle, die exogene oder endogene Einflussgrößen berücksichtigen. Eine tabellarische Übersicht bieten HESSE (1987, S. 25) und ROTH (1993, S. 157); eine ausführlichere Diskussion der Modelle findet sich bei MAHAJAN UND PETERSON (1985, S. 35ff.) und KLOPHAUS (1995, S. 15ff.). Eine Zusammenstellung aktueller Studien zu Diffusionsmodellen findet sich bei MAHAJAN et al. (2000).

Alternativ zum Bass-Modell wird oft auch das Gompertz-Modell verwendet, das auf der logistischen Diffusion aufbaut. Der wesentliche Unterschied liegt darin, dass die Diffusionskurve nicht symmetrisch ist und die höchste Adoptionsrate bereits eintritt, wenn 37% der potentiellen Adoptoren die Innovation übernommen haben (GOMPERTZ 1825).

Bei den vorgestellten Modellen handelt es sich um makroökonomische Ansätze. Liegt der Fokus der Untersuchung stärker auf dem Adoptionsprozess und verhaltenstheoretischen Aspekten, werden mikroökonomische Modelle bevorzugt (FELTEN 2001). Diese ermöglichen es, eine größere Anzahl unternehmens-, adopter- und umweltspezifische Determinanten in das Diffusionsmodell mit einzubeziehen. Der größte Kritikpunkt am mikroökonomischen Ansatz ist jedoch die mangelnde Prozessorientierung, da es sich meist um statische Modelle handelt, in denen die Zeit nicht ausreichend berücksichtigt wird (ROTH 1993, S. 170f.).

Abschließend kann festgehalten werden, dass die oben genannten Modellerweiterungen häufig in der theoretischen Diskussion bleiben (GIERL 1987, S. 98). Das Bass-Modell ermöglicht aufgrund seiner einfachen Struktur dagegen eine praktische Anwendung. Trotz der aufgezeigten Mängel liefert es meist gute Approximationen, die zu einem Erkenntnisgewinn führen können (SCHMALEN et al. 1993).

## 4.6 Modellierung der räumlichen Diffusion

Unter den Kritikpunkten am Bass-Modell wurde bereits erwähnt, dass die räumlichen Unterschiede in der Diffusion in diesem Modell nicht berücksichtigt werden. Tatsächlich erfassen die meisten mathematischen Modelle zur Diffusion nur die

zeitliche Dynamik, die räumliche Perspektive wird hingegen außer Acht gelassen (LAL et al. 1998, S.233).

EASINGWOOD et al. (1981) stellte zwar einen Ansatz auf, in dem er den Imitationsparameter als endogene Größe darstellt, die sich für jede Raumeinheit unterscheidet. Der Diffusionsprozess findet in jedem Gebiet jedoch unabhängig statt. Das erste Modell, in dem Nachbarschaftseffekte berücksichtigt werden, wurde von HAYNES et al. (1977) entwickelt, blieb aber zunächst ohne empirische Überprüfung.

MAHAJAN und PETERSON (1979) schlugen daraufhin eine Erweiterung des Bass-Modells vor, mit dem Ziel, die räumlichen Unterschiede in der Diffusion zu erfassen (MAHAJAN und PETERSON 1979). Das Modell basiert ebenfalls auf der Annahme einer S-förmigen Diffusionskurve, integriert jedoch gleichzeitig auch einen Nachbarschaftseffekt: Je kürzer die Entfernung zur Ursprungsregion, desto höher ist die Adoptionsrate in einem Gebiet. Zur Vereinfachung wird davon ausgegangen, dass die Innovation nur in einer einzigen Region eingeführt wird. Die Anzahl der Adoptionen in einem Gebiet werden in Abhängigkeit der Distanz  $x$  zur innovativen Region bestimmt. Das maximale Marktpotential der einzelnen Regionen hängt auch von der Distanz zur innovativen Region ab. Die Anzahl der Adoptionen pro Zeiteinheit werden durch folgende Gleichung (4.10) beschrieben (MAHAJAN und PETERSON 1985, S. 42f.):

$$n_{x,t} = \frac{dN_{x,t}}{dt} = (a_x + b_x * N_{x,t})(\bar{N}_x - N_{x,t}) \quad (4.10)$$

$n_{x,t}$ : Anzahl der erwarteten Adoptoren pro Zeiteinheit zum Zeitpunkt  $t$  in Abhängigkeit von der Entfernung  $x$

$N_{x,t}$ : kumulierte Anzahl an Adoptoren zum Zeitpunkt  $t$  in Abhängigkeit von der Entfernung  $x$

$\bar{N}_x$ : Marktpotential in Abhängigkeit von der Entfernung  $x$

$a_x$ : Innovationskoeffizient in Abhängigkeit von der Entfernung  $x$

$b_x$ : Imitationskoeffizient in Abhängigkeit von der Entfernung  $x$

$x$ : Räumliche Entfernung zum Ursprungsgebiet der Innovation

Die Diffusionskurve ergibt sich aus Gleichung 4.11:

$$N_{x,t} = \frac{\bar{N}_x - \frac{a_x(\bar{N}_x - N_{x,0})}{a_x + b_x N_{x,0}} * e^{-(a_x + b_x \bar{N}_x)(t-t_0)}}{1 + \frac{b_x(\bar{N}_x - N_{x,0})}{a_x + b_x N_{x,0}} * e^{-(a_x + b_x \bar{N}_x)(t-t_0)}} \quad (4.11)$$

Zur Illustration des mathematischen Modells analysierten MAHAJAN und PETERSON (1979) die Diffusion von Traktoren in 25 US-Staaten. Der Vergleich der Simulationsergebnisse des Modells mit den realen Daten lieferte sehr hohe Korrelationen.

Mit dem Modell sind jedoch auch einige Nachteile verbunden, da die räumlichen Abhängigkeiten zu einseitig erfasst werden. So ist die Annahme, dass die Innovation nur in einer Region eingeführt wird, besonders in der heutigen Zeit, nicht realistisch. Die schnelle Informationsverbreitung führt eher dazu, dass mehrere Innovationszentren entstehen. Zudem werden Interaktionen zwischen den einzelnen Regionen nicht berücksichtigt, da immer nur der Bezug zur Ursprungsregion besteht. Schließlich stellt sich die Frage, ob die alleinige Abhängigkeit der Innovations- und Imitationsparameter von der Distanz nicht eine zu starke Modellvereinfachung darstellt.

MAHAJAN und PETERSON stellten zwar eine räumliche Form des Bass-Modells auf, die Kritikpunkte zeigen jedoch, dass das Modell aufgrund der vereinfachenden Annahmen zur Informationsverbreitung und des Nachbarschaftseffekts nicht praktikabel ist. Aktuelle Studien zur Modellierung der räumlichen Diffusion zeigen, dass heute keine Entwicklung von mathematischen Modellen per se stattfindet, sondern dass – aufbauend auf die in diesem Kapitel dargestellten Modelle – meist mathematische Ansätze speziell für den jeweiligen Anwendungsfall entworfen werden (s. Abschnitt 5.2).

## 5 Stand der Forschung zur Diffusion von Innovationen

Die vorliegende Arbeit widmet sich der Analyse der räumlichen Diffusion der PV. Um die Relevanz dieses Themas und den Forschungsbedarf beurteilen zu können, werden in diesem Abschnitt aktuelle Forschungsarbeiten aus diesem Themenkomplex vorgestellt. Im ersten Teil werden Forschungsansätze zur Analyse der Diffusion von EE-Technologien diskutiert, die keine räumlich differenzierte Betrachtung vornehmen. Im zweiten Teil werden Studien aufgeführt, in denen die Diffusion von Innovationen mit Fokus auf die räumliche Verbreitung untersucht wird.

### 5.1 Studien zur Diffusion Erneuerbarer-Energie-Technologien

Die Diffusion innovativer Energietechnologien kann in vier Forschungsbereiche untergliedert werden. Dabei kann unterschieden werden zwischen Studien, die die *Perspektive des sozialen Verhaltens* in den Vordergrund stellen und solchen, welche die *Systemperspektive* einnehmen und den *Lernkurvenansatz* verwenden. Ein weiterer Forschungsbereich befasst sich mit dem *Einfluss politischer Instrumente* auf die Diffusion. Darüber hinaus finden sich Forschungsarbeiten, bei denen die *Modellierung der Diffusion* im Fokus steht. Im Folgenden werden relevante Studien der einzelnen Forschungsbereiche vorgestellt und in Bezug auf die eigene Fragestellung diskutiert. Am Ende des Abschnitts 5.1 in Tab. 2 werden die analysierten Studien nach den vier Themenkomplexen sortiert aufgelistet.

#### 5.1.1 Perspektive des sozialen Verhaltens

Wird die Diffusion von Innovationen aus der Verhaltensperspektive untersucht, so stehen Fragen im Vordergrund, die die individuelle Adoptionsentscheidung betreffen: Welche Faktoren beeinflussen die individuelle Kaufbereitschaft? Was sind Motivation und Barrieren für die Anschaffung einer EE -Technologie? Bei dieser Art von Forschungsarbeit bilden meist private Haushalte die Untersuchungseinheit. Mit Hilfe von standardisierten Befragungen oder Interviews wird untersucht, welche Ursachen hinter der Adoptionsentscheidung liegen, um somit den Diffusionsprozess zu verstehen und Einflussfaktoren auf die Diffusionsgeschwindigkeit zu identifizieren.

Die meisten Studien aus diesem Bereich stammen aus Großbritannien. Sie beschäftigen sich zuvorderst mit der Frage, welche Faktoren sich positiv bzw. negativ auf die Zahlungsbereitschaft für Strom aus Erneuerbaren Energien auswirken (BATLEY et al. 2000) oder die Anschaffung eines Mikrokraftwerks („microgeneration technology“).

gies“) erklären können (SAUTER und WATSON 2007; CAIRD und ROY 2010; SCARPA und WILLIS 2010). FAIERS und NEAME (2006) untersuchen speziell die Einstellungen privater Haushalte gegenüber Solarthermie und PV-Anlagen in England. SIDIRAS und KOUKIOS (2004) widmen sich den Ursachen für die erfolgreiche Diffusion von Solarthermieanlagen in Griechenland.

Einen Analyserahmen sowie Erklärungshilfe für viele Adoptions- und Diffusionsstudien bietet die klassische Theorie der Diffusion (vgl. Abschnitt 3.1). So werden oft die Produkteigenschaften von ROGERS (2003) (vgl. Abschnitt 3.1.2) zur Begründung der (Nicht-)Adoption von EE-Technologien herangezogen (TAPANINEN et al. 2009; CLAUDY et al. 2011). JAGER (2006) untersucht aus der Verhaltensperspektive – ebenfalls angelehnt an die ROGER’schen Produkteigenschaften – wie die schleppende Diffusion von PV-Anlagen in den Niederlanden erklärt werden kann. Die Theorie der Diffusion wird zudem verwendet, um die unterschiedlichen Adoptertypen abhängig von der Zeit zu beschreiben, wie dies am Beispiel von Solarthermieanlagen von LABAY und KINNEAR (1981), KRUSCHE und JOERGES (1982) und WOERSDORFER und KAUS (2011) analysiert wurde.

Um die Gruppe der Adoptoren von EE-Technologien zu charakterisieren – auch im Hinblick auf die Ausgestaltung konkreter Marketingmaßnahmen für die Förderung der Diffusion der Technologien – werden die Adoptoren häufig anhand ihrer sozioökonomischen Eigenschaften, Einstellungen und Werte beschrieben (ZARNIKAU 2003; FISCHER 2004; EK 2005; SCHELLY 2010; SOPHA et al. 2011). JAGER (2006), KEIRSTEAD (2007) und CLAUDY et al. (2011) beschreiben speziell die sozioökonomischen Eigenschaften von Haushalten, die eine PV-Anlage besitzen.

Ein weiterer Forschungszweig bedient sich ökonomischer Modelle, um die Einflussfaktoren auf die Adoption einer EE-Technologie zu beschreiben. DURHAM et al. (1988), ZAHRAN et al. (2008) und SCHELLY (2010) stellen Regressionsmodelle auf, um die bestehende Verbreitung von Solarthermie-Anlagen in den USA zu untersuchen. Ziel der Analyse von DURHAM et al. ist, den Einfluss von steuerlichen Vergünstigungen, Energiepreisen und sozioökonomischen Parametern auf die Nutzung von Solarenergie zu quantifizieren (DURHAM et al. 1988). ZAHRAN et al. und SCHELLY legen dagegen den Fokus auf die Erklärung der räumlichen Unterschiede der Solarenergienutzung auf County-Ebene, indem sie ökologische, sozioökonomische und sozialpolitische Einflussfaktoren in ihre Modelle aufnehmen (ZAHRAN et al. 2008; SCHELLY 2010).

Die Ursachen für die (Nicht-)Adoption von EE-Technologien sowie die Einstellungen, Werte und Eigenschaften der Adopter-Haushalte wurden bereits in einigen Studien thematisiert. Es gibt jedoch keine Studie für Deutschland, die sich speziell mit der PV-Diffusion in privaten Haushalten auseinandersetzt. Auch dem Einfluss der visuellen Wahrnehmung von EE-Anlagen im eigenen sozialen und räumlichen Umfeld wurde bisher wenig Aufmerksamkeit geschenkt. Zwar wird u.a. von WOERSDORFER und KAUS (2011) dargestellt, inwiefern die Kommunikation mit Anlagenbesitzern die eigene Investitionsentscheidung beeinflusst, es wird allerdings nicht analysiert, welche Rolle die räumliche Nachbarschaft zu anderen EE-Anlagenbesitzern spielt. Die Theorie der Diffusion von Innovationen, wie sie in den oben genannten Studien dargestellt wird, erweist sich als hilfreich, um auch die PV-Diffusion in Deutschland angelehnt an diesen Rahmen zu untersuchen.



## 5.1.2 Systemperspektive und Lernkurvenansatz

Der Adoptionsforschung auf Mikroebene steht die Analyse der Diffusion auf Makroebene gegenüber. Die Autoren gehen davon aus, dass die Diffusion von EE-Technologien einen Wandel des gesamten Energiesystems hervorruft. Nach JACOBSSON und JOHNSON (2000) sowie TSOUTSOS und STAMBOULIS (2005) ist demnach die Analyse des gesamten Innovationssystems nötig, um den Diffusionsprozess zu verstehen. Das Innovationssystem wird in diesem Zusammenhang definiert als das „Technologische System“ bestehend aus *Akteuren* und deren Einfluss auf technologische oder politische Veränderungen, sowie aus *Netzwerken* zwischen Unternehmen oder Nutzern einer Technologie zur Identifizierung neuer Probleme und zur Entwicklung neuer technischer Lösungen und schließlich aus *Institutionen* (Gesetzgebung, Kapitalmarkt, Bildungssystem etc.), in deren Rahmen die Akteure eingebettet sind (JACOBSSON und JOHNSON 2000).

Im Rahmen des „Technological Innovation System“- (TIS-) Ansatzes untersuchen JACOBSSON et al. (2004, 2006), wie sich der PV-Markt in Deutschland entwickelte. Das Innovationssystem in Deutschland wird dabei als Ganzes betrachtet, ohne auf räumliche Unterschiede einzugehen (JACOBSSON et al. 2004; JACOBSSON und LAUBER 2006). DEWALD und TRUFFER (2012) versuchen regionale Wachstumsunterschiede des deutschen PV-Marktes mit Hilfe des TIS-Ansatzes zu analysieren, indem sie die Anwenderseite stärker betonen und auf die lokale Verankerung von Akteuren hinweisen. Sie argumentieren, dass räumliche Unterschiede in der PV-Nutzung durch räumliche Unterschiede im Vorhandensein von Akteuren, Netzwerken und Institutionen erklärt werden können, wobei sie die Bedeutung von Solarinitiativen für die PV-Diffusion in den Vordergrund stellen (DEWALD und TRUFFER 2012). Die Bedeutung von Solarinitiativen für die Herausbildung regionaler Unterschiede in der Verbreitung von PV-Anlagen in Deutschland wurde auch von MAUTZ et al. (2008) betont. Zudem weisen die Autoren darauf hin, dass die Unterschiede zwischen städtischen und ländlichen Regionen vermutlich auf dem stärkeren Geflecht an Sozialbeziehungen in Dorfgemeinschaften beruhen. Engere soziale Netzwerke führen in ländlichen Gemeinden zu einem häufigeren Austausch über die Technologie, was die Investition in PV-Anlagen fördert. Demgegenüber steht das anonymere und sozial heterogenere Umfeld in Städten, in denen meist weniger enge Nachbarschaftsbeziehungen bestehen (MAUTZ et al. 2008). Auch KRUIJSEN (1999) legt bei der Analyse der Diffusion von PV-Anlagen den Fokus auf die Akteure des Innovationssystems und kategorisiert diese nach ihren Funktionen im Diffusionssystem. Sie zeigt, dass in den Niederlanden und Kalifornien unterschiedlich stark ausgeprägte Netzwerkinteraktionen existieren, was sich auf die Nutzung von PV-Anlagen auswirkt.

Zur Analyse der Diffusion von EE-Technologien innerhalb eines Landes oder Innovationssystems wird oft der Lernkurvenansatz verwendet. Dieser geht davon aus, dass die Kosten einer Technologie durch Lern- und Skaleneffekte in der Produktion im Laufe der Zeit sinken und die Diffusionsgeschwindigkeit daraufhin zunimmt (NEIJ 1997). Geographische und technologische Nähe erleichtern den Lernprozess und Wissenstransfer und damit die Diffusion von EE-Technologien (BAPTISTA 2000; VERDOLINI und GALEOTTI 2010). Speziell in Bezug auf die PV-Technologie untersucht

NEMET (2006), welche Faktoren die Kosten von PV-Systemen senken. MENANTEAU (2000) beschreibt, wie sich aufgrund von Lerneffekten die kristalline PV-Technologie durchsetzte. Der Lernkurvenansatz wurde auch verwendet, um zu berechnen, ab welchem Zeitpunkt die PV-Technologie wettbewerbsfähig und die Kostenlücke zu konventionellen Energietechnologien geschlossen sein wird (POPONI 2003; VAN DER ZWAAN und RABL 2004).

Die Betrachtung des gesamten Innovationssystems zur Analyse der PV-Diffusion stellt einen wichtigen Beitrag dar, um die heutige Situation des PV-Marktes zu verstehen und zukünftige Entwicklungen abzuschätzen. Dieser globale Forschungsansatz lässt jedoch die Untersuchung kleinräumiger Diffusionsunterschiede außer Acht. DEWALD und TRUFFER (2012) versuchen zwar die räumlichen Unterschiede in der PV-Marktentwicklung mit Hilfe des TIS-Ansatzes zu erklären, kommen aber nur zu qualitativen Abschätzungen auf Bundesländer-Ebene. Durch die Analyse lokaler Akteursstrukturen, sowie lokal vorhandener Institutionen und Netzwerke, die die PV-Diffusion in einer Region direkt stimulieren, können zwar Ursachen für die räumlichen Unterschiede in der PV-Nutzung aufgedeckt werden. Der TIS-Ansatz ermöglicht jedoch nicht, die Einflussfaktoren auf die PV-Diffusion zu quantifizieren und gibt keine Anhaltspunkte zur Untersuchung des Nachbarschaftseffekts der Diffusion.

### **5.1.3 Einfluss politischer Instrumente auf die Diffusion Erneuerbarer-Energie-Technologien**

Die Diffusion innovativer EE-Technologien wird in vielen Ländern bewusst politisch gefördert, um die Energiewende herbeizuführen. Ziel zahlreicher Forschungsarbeiten ist deshalb herauszufinden, welche politischen Förderinstrumente den größten Einfluss auf die Diffusion haben und wie diese Instrumente gestaltet werden müssen, um die Diffusionsgeschwindigkeit zu erhöhen. (STONEMAN und DIEDEREN 1994; JAFFE und STAVINS 1995; DINICA 2006; MADLENER 2006). Es zeigt sich, dass der gezielte Einsatz politischer Förderung innovativer Technologien entscheidend ist, um die Entstehung eines Nischenmarktes zu ermöglichen und Lernprozesse anzustoßen (MENANTEAU und LEFEBVRE 2000).

Zudem hilft das Studium positiver Fallbeispiele, den Diffusionsprozess zu verstehen und bietet die Möglichkeit, Instrumente, die sich als nützlich erweisen, auf andere Länder zu übertragen. Dabei wird oft die deutsche Erfolgsgeschichte analysiert, um herauszufinden, unter welchen politischen Rahmenbedingungen der enorme Zuwachs an EE-Anlagen stattgefunden hat und welchen Beitrag hierzu spezielle Förderinstrumente wie das EEG leisten (JACOBSSON et al. 2002; WÜSTENHAGEN und BILHARZ 2006). Fallstudien zu erfolgreichen Projekten im Bereich Bioenergie wurden von MADLENER (2007) in der österreichischen Region Vorarlberg und in Basel in der Schweiz durchgeführt (MADLENER und VÖGTLI 2008). Betont werden auch hier die Rolle der politischen Förderung und das erfolgreiche Zusammenspiel lokaler und politischer Akteure für die Diffusion einer EE-Technologie.

In Bezug auf die PV-Technologie vergleicht BERGER (2001) den Einfluss verschiedener Förderprogramme auf die Diffusion von PV-Anlagen in Deutschland und

der Schweiz. BEISE (2004) versucht die Unterschiede in der Diffusion von PV in 13 verschiedenen Ländern zu erklären und stellt fest, dass die Marktstimulierung durch politische Instrumente, wie sie in Deutschland oder Japan stattfindet, den größten Einfluss auf den Zuwachs an PV-Anlagen hat. ZHANG et al. (2011) befassen sich mit der Diffusion von PV-Anlagen in Japan auf regionaler Ebene und zeigen, dass regionale Förderprogramme neben regionalen Unterschieden in der Anzahl an Neubauten und im Umweltbewusstsein einen signifikanten Einfluss auf den Grad der Diffusion haben.

Dieser Überblick macht deutlich, dass der Großteil der Forschung lediglich den Einfluss von Politik und Förderinstrumenten auf Länderebene diskutiert, wie auch BEISE (2004) am Beispiel der PV-Technologie. ZHANG et al. (2011) zeigen nun, dass regionale Unterschiede in der Förderpolitik auch regionale Unterschiede in der PV-Diffusion hervorrufen. Die Fallstudien von MADLENER et al. (2007; 2008) zu Bioenergie-Projekten machen deutlich, dass lokale Initiativen und politische Förderungen vor Ort die Diffusion entscheidend beeinflussen. Finanzielle Förderung und das lokale politische Klima beeinflussen also die Diffusion von EE-Technologien und könnten demnach auch für die räumlichen Unterschiede in der Verbreitung von PV-Anlagen verantwortlich sein.

#### **5.1.4 Modellierung der Diffusion Erneuerbarer-Energie-Technologien**

Ein weiterer Forschungsbereich umfasst die Modellierung der Diffusion von EE-Technologien. Diffusionsmodelle werden verwendet, um den Diffusionsverlauf der Technologien zu beschreiben und dabei zu bestimmen, welches Diffusionsstadium bereits erreicht ist, zu welchem Zeitpunkt die Marktsättigung eintreten wird und wie hoch das gesamte Marktpotential der jeweiligen EE-Technologie ist. So zeigt LUND (2006) mit Hilfe eines logistischen Diffusionsmodells die Unterschiede in den Diffusionskurven elf verschiedener Energie-Technologien in ausgewählten Ländern.

Durch die Integration erklärender Variablen in das Diffusionsmodell, wie Energiekosten oder die Höhe der finanziellen Förderung, kann zusätzlich der Einfluss dieser Variablen auf den Diffusionsverlauf analysiert werden. MADLENER und SCHMID (2003) verwenden beispielsweise ein parametrisches Modell, das aufbauend auf die Hazard-Funktion die Diffusion von Blockheizkraftwerken in Deutschland untersucht. MADDALENA und PADALINO (2008) modellieren die Diffusion von PV-Anlagen in Italien, wobei als erklärende Variablen die Attraktivität von PV und staatliche Förderprogramme berücksichtigt werden.

In einigen Studien zur Diffusion von EE-Technologien kommt auch das Bass-Modell zum Einsatz (vgl. Kap. 4.4). DALLA VALLE und FURLAN (2011) verwenden zur Analyse der Diffusion von Windkraft in vier Ländern die generalisierte Form des Bass Modells, da dieses erlaubt, den Einfluss von Förderprogrammen auf die Diffusion zu testen. GUIDOLIN und MORTARINO (2010) untersuchen ebenfalls mit Hilfe des generalisierten Bass-Modells die Diffusion von PV-Installationen in elf ausgewählten Ländern und projizieren deren zukünftige Entwicklung. Für Deutschland wurde der Höhepunkt der PV-Diffusion, und damit der Wendepunkt der Diffusionskurve, bereits für die Jahre 2006 bis 2008 bestimmt. Dies entspricht jedoch nicht der Rea-

lität, da in den vergangenen Jahren die Diffusionsraten weiterhin anstiegen (vgl. Abschnitt 2.2). Neben der linearen Diffusionsmodellierung existieren auch Studien zur Diffusion innovativer Energietechnologien, die das Bass-Modell in Form eines System-Dynamics-Ansatzes verwenden, um Rückkoppelungseffekte zu integrieren (MILLER und STERMAN 2007; BEN MAALA und KUNSCH 2008).

Die Agenten-basierte Modellierung (ABM) erlaubt dagegen die Simulation der Diffusion auf Haushaltsebene und die Untersuchung des Einflusses verschiedener Akteure auf die Diffusion einer Technologie (ROLOFF et al. 2007; FABER et al. 2010).

Wie die Ausführungen zeigen, existieren bisher nur wenige Untersuchungen der Diffusion von EE-Technologien mittels Diffusionsmodellen. RAO und KISHORE (2010) kommentieren, dass die Diffusionsmodelle bisher fast nur im Bereich kommerzieller Produkte angewandt wurden und dass die Herausforderung darin besteht, die Diffusionsmodelle auf den Bereich der EE-Technologien zu übertragen. BARRETO und KEMP (2008) bemängeln zudem, dass die Modelle der Technologie-Diffusion noch nicht ausreichend in Energiesystemmodelle integriert wurden.

Die aufgeführten Studien zeigen, dass sich das Bass-Modell auch zur Analyse der Diffusion von EE-Technologien eignet. Die vorgestellten Studien modellieren allerdings immer die Diffusion innerhalb eines ganzen Landes oder einer Region, ohne eine räumliche Differenzierung vorzunehmen. Im folgenden Kapitel wird nun explizit auf Studien eingegangen, die die räumliche Diffusion von Innovationen mit Hilfe von mathematischen Modellen untersuchen.

Tab. 2: Studien zur Diffusion Erneuerbarer-Energie-Technologien

| Kategorie   | Technologie           | Land           | Methode                     | Quelle                                |                          |
|-------------|-----------------------|----------------|-----------------------------|---------------------------------------|--------------------------|
| Adoption EE | EE zur Stromgewinnung | Großbritannien | Haushaltsbefragung          | BATLEY et al. (2000)                  |                          |
|             |                       | USA            | Haushaltsbefragung          | ZARNIKAU (2003)                       |                          |
|             |                       | Schweden       | Haushaltsbefragung          | EK (2005)                             |                          |
|             | Mikrokraftwerke       | verschiedene   |                             | Auswertung Daten anderer Studien      | SAUTER & WATSON (2007)   |
|             |                       | Großbritannien |                             | "stated preference"-Experimente       | SCARPA & WILLIS (2010)   |
|             |                       | Deutschland    |                             | Gruppendiskussion, Haushaltsbefragung | FISCHER (2004)           |
|             |                       | Irland         |                             | Haushaltsbefragung                    | CLAUDY et al. (2011)     |
|             | Wärmetechnologien     | Großbritannien |                             | Haushaltsbefragung                    | CAIRD & ROY (2010)       |
|             |                       | Finnland       |                             | Haushaltsbefragung                    | TAPANINEN et al. (2009)  |
|             |                       | Norwegen       |                             | Haushaltsbefragung                    | SOPHA et al. (2011)      |
|             |                       | Griechenland   |                             | Haushaltsbefragung                    | SIDIRAS & KOUKIOS (2004) |
|             |                       | USA            |                             | Haushaltsbefragung                    | LABAY & KINNEAR (1981)   |
|             | USA                   |                | Regression auf County-Ebene | DURHAM et al. (1988)                  |                          |

|                   |                                   |                          |   |  |
|-------------------|-----------------------------------|--------------------------|---|--|
| Adoption EE       | Solarthermie                      | USA                      | Regression auf County-Ebene                   | ZAHNAN et al. (2008)                               |
|                   |                                   | USA                      | Regression auf County-Ebene                   | SCHELLY (2010)                                     |
|                   |                                   | Deutschland              | Haushaltsbefragung                            | KRUSCHE & JOERGES (1982)                           |
|                   |                                   | Deutschland              | Haushaltsbefragung, Interviews                | WOERSDORFER & KAUS (2011)                          |
|                   | Photovoltaik & Solarthermie       | Großbritannien           | Haushaltsbefragung, Interviews                | FAIERS & NEAME (2006)                              |
|                   | Photovoltaik                      | Großbritannien           | Interviews                                    | KEIRSTEAD (2007)                                   |
| Niederlande       |                                   | Haushaltsbefragung       | JAGER (2006)                                  |  |
| Systemperspektive | EE-Technologien                   | -----                    | TIS-Ansatz                                    | JACOBSSON & JOHNSON (2000)                         |
|                   |                                   | -----                    | TIS-Ansatz                                    | TSOUTSOS & STAMBOULIS (2005)                       |
|                   | Energie-Effizienz-Technologien    | weltweit                 | Modellierung                                  | VERDOLINI & GALEOTTI (2010)                        |
|                   | Mikroprozessoren                  | Großbritannien           | Modellierung                                  | BAPTISTA (2000)                                    |
|                   | Photovoltaik, Windturbinen        | weltweit                 | Lernkurvenansatz, Modellierung                | NEIJ (1997)  |
|                   |                                   | weltweit                 | Modellierung                                  | NEMET (2006)                                       |
|                   | Photovoltaik                      | weltweit                 | Historische Analyse                           | MENANTEAU (2000)                                   |
|                   |                                   | weltweit                 | Lernkurvenansatz, Modellierung                | POPONI (2003)                                      |
|                   |                                   | weltweit                 | Lernkurvenansatz, Modellierung                | VAN DER ZWAAN & RABL (2004)                        |
|                   |                                   | Niederlande, Kalifornien | Netzwerkansatz                                | KRUIJSEN (1999)                                    |
|                   |                                   | Deutschland              | TIS-Ansatz                                    | JACOBSSON et al. (2004), JACOBSSON & LAUBER (2006) |
|                   |                                   | Deutschland              | TIS-Ansatz, Interviews                        | DEWALD & TRUFFER (2012)                            |
| Deutschland       | Interviews                        | MAUTZ et al. (2008)      |   |  |
| Politik           | Technologien allgemein            | -----                    | politische Analyse                            | STONEMAN & DIEDEREN (1994)                         |
|                   |                                   | -----                    | Analyse von Politikinstrumenten, Modellierung | JAFFE & STAVINS (1995)                             |
|                   | EE-Technologien Wärmotechnologien | -----                    | Analyse von Politikinstrumenten               | DINICA (2006)                                      |
|                   |                                   | Schweiz                  | Analyse von Politikinstrumenten               | MADLENER (2006)                                    |
|                   |                                   | Deutschland              | Historische Analyse                           | WÜSTENHAGEN & BILHARZ (2006)                       |

|                         |                                      |  |  |                             |
|-------------------------|--------------------------------------|--|--|-----------------------------|
| Politik                 | Wärmetechnologien                    | Österreich                                   | Fallstudie                                 | MADLENER (2007)             |
|                         |                                      | Schweiz                                      | Fallstudie                                 | MADLENER & VÖGTLI (2008)    |
|                         | Energiesparlampen                    | weltweit                                     | Historische Analyse                        | MENANTEAU & LEFEBVRE (2000) |
|                         | Photovoltaik                         | Deutschland                                  | Historische Analyse                        | JACOBSSON et al. (2002)     |
|                         |                                      | Deutschland, Schweiz                         | Historische Analyse                        | BERGER (2001)               |
| Deutschland, Japan u.a. |                                      | Panel-Regression                             | BEISE (2004)                               |                             |
|                         | Japan                                | Panel-Regression                             | ZHANG et al. (2011)                        |                             |
| Modellierung            | EE- & Energie-Effizienz-Technologien | Deutschland, Finnland, u.a.                  | logistisches Diffusionsmodell              | LUND (2006)                 |
|                         | EE-Technologien                      | _____  | System Dynamics Modellierung (Bass Modell) | MILLER & STERMAN (2007)     |
|                         |                                      | _____  | Literaturdiskussion                        | RAO & KISHORE (2010)        |
|                         |                                      | _____  | Literaturdiskussion                        | BARRETO & KEMP (2008)       |
|                         | Mikro-KWK                            | _____  | System Dynamics Modellierung (Bass Modell) | BEN MAALA & KUNSCH (2008)   |
|                         |                                      | Niederlande                                  | Agenten basierte Modellierung              | FABER et al. (2010)         |
|                         | Wärmetechnologie                     | Deutschland                                  | Hazard-rate-Modell                         | MADLENER & SCHMID (2003)    |
|                         | Windkraftanlagen                     | Deutschland, Spanien, Dänemark, Italien, USA | Bass-Modell                                | DALLA VALLE & FURLAN (2011) |
|                         | Photovoltaik                         | Italien                                      | Semilogistisches Diffusionsmodell          | MADDALENA & PADALINO (2008) |
|                         |                                      | Deutschland (+ 10 weitere Länder)            | Bass-Modell                                | GUIDOLIN & MORTARINO (2010) |
| Deutschland             |                                      | Agenten-basierte Modellierung                | ROLOFF et al. (2007)                       |                             |

Quelle: Eigene Erhebung

## 5.2 Studien zur räumlichen Diffusion von Innovationen

Die räumliche Diffusion von Innovationen wird häufig im Rahmen der Wirtschaftsgeographie analysiert, da die wirtschaftliche Entwicklung einer Region in Zusammenhang mit deren Innovationsfähigkeit steht (DAVELAAR und NIJAKAMP 1997, S. 17). Unterschiede in der Innovationstätigkeit, d.h. in der Produktion und Diffusion von Innovationen führen zu regionalen Disparitäten (FRENKEL und SHEFER 1997; FRATESI 2007). Zentrale Fragestellungen in der geographischen Innovationsforschung sind daher, welche räumlichen Voraussetzungen gegeben sein müssen, damit Innovatio-

nen entstehen und sich in einem räumlichen System ausbreiten. In den 1990er Jahren entwickelte sich daraus der Forschungsansatz der Regionalen Innovationssysteme, der davon ausgeht, dass die Entwicklung von Innovationen ein kollektiver Lernprozess innerhalb, aber auch zwischen Unternehmen ist, der durch räumliche Nähe erleichtert wird (COOKE et al. 1997). Unternehmen, die sich innerhalb einer Region ansiedeln, profitieren von einem gemeinsamen institutionellen Rahmen, gleichen Regeln, kulturellen Werten und Normen, die den Wissensaustausch fördern und zum Aufbau einer gemeinsamen Wissensbasis („tacit knowledge“) führen (BAPTISTA 2000, S. 517). Die Entstehung und Diffusion von Innovationen wird zusätzlich erleichtert durch die räumliche Clusterung von Unternehmen, Universitäten, Forschungsinstituten, lokalen Banken und Einrichtungen zur Innovationsförderung (DOLOREUX und PARTO 2005, S. 135).

Die Diffusion von Innovationen wird in diesem Zusammenhang also aus der Systemperspektive untersucht und bezieht sich meist auf die Produktion und Diffusion von Innovationen in Unternehmen. In dieser Arbeit interessiert jedoch, wie sich innovative Konsumgüter innerhalb einer Gesellschaft ausbreiten, bzw. die räumliche Diffusion einer innovativen Energietechnologie in privaten Haushalten. Bisher existieren jedoch kaum Studien, die dies quantitativ innerhalb einer Region untersuchen. Eine Ausnahme bilden MADLENER und SCHMID (2008), die die räumliche Diffusion von Biogasanlagen in der Schweiz mit Hilfe einer Agenten-basierten Modellierung auf Gemeinde-Ebene analysieren sowie SCHWARZ und ERNST (2009), die ebenfalls gestützt auf einem Agenten-basierten Ansatz, die räumliche Diffusion von Wasserspar-Technologien in privaten Haushalten modellieren (MADLENER und SCHMID 2009; SCHWARZ und ERNST 2009).

Im folgenden Abschnitt werden Studien vorgestellt, die mathematische Ansätze zur Modellierung der räumlichen Diffusion innovativer Produkte oder Ideen verwenden und die Ausgangspunkt für die eigene Forschungsarbeit sind.

### **5.2.1 Modellierung der räumlichen Diffusion von Innovationen auf Basis aggregierter Daten**

In einer aktuellen Forschungsarbeit von DING et al. (2010) wird die räumliche Diffusion von Mobiltelefonen von 1990 bis 2005 in China auf Ebene der Regionen modelliert. Ziel ist es, den Einfluss exogener Variablen auf den Zeitpunkt der Innovationseinführung, die Diffusionsgeschwindigkeit und auf das Marktpotential zu untersuchen. Die Autoren gehen dabei in einem Zwei-Schritt-Verfahren vor. So wird zunächst mit Panel-Daten über die Anzahl an Mobiltelefonbesitzer in den einzelnen Regionen von 1990 bis 2005 der Einfluss exogener Faktoren (wie Bruttoinlandsprodukt, ausländischen Direktinvestitionen und Anzahl an Festnetzanschlüssen) auf die Diffusionsparameter mittels einer Ordinary-Least-Square-(OLS-)Regression – basierend auf dem Bass-Modell – geschätzt. Aufgrund der räumlichen Autokorrelation der Diffusionsparameter wird im folgenden Schritt schließlich eine räumliche Regression berechnet, um den Einfluss der Nachbarschaft zwischen den Regionen auf die Diffusion zu kontrollieren (DING et al. 2010). Die Studie analysiert damit nicht den

raum-zeitlichen Diffusionsprozess, sondern nur den Einfluss wirtschaftlicher Faktoren auf die Diffusionsparameter. Die räumliche Abhängigkeit der Regionen wird in der räumlichen Regression nur statisch erfasst.

HAMAOKA (2009) analysiert die räumliche Diffusion elektronischer Mautgebührenabrechner in den 47 Präfekturen in Japan von 2001 bis 2009. Um die räumliche und zeitliche Komponente der Diffusion zu erfassen, wird die Berechnung eines „spatial panel models“ vorgeschlagen. Schließlich wird jedoch nur eine räumliche Regression in Form des „spatial lag models“ berechnet, wobei neben der Berücksichtigung der räumlichen Dimension über eine räumliche Gewichtungsmatrix auch weitere erklärende Variablen (Marketingvariablen, regionsspezifische Variablen) hinzugenommen werden. Aufgrund des signifikanten „spatial lags“ wird die Schlussfolgerung gezogen, dass ein räumlicher Nachbarschaftseffekt bei der Diffusion existiert (HAMAOKA 2009). Die Berechnung eines „spatial panel models“ zur Erfassung des raum-zeitlichen Prozesses bleibt jedoch aus.

SHINOARA et al. (2010) stellen ein Modell auf, um die räumliche Diffusion von Hybridfahrzeugen nachzubilden. Das Modell basiert auf der Finiten-Elemente-Methode und auf dem Diffusionsmodell von HAYNES (1977). Zur Erfassung des Nachbarschaftseffekts wird jedoch zur Vereinfachung angenommen, dass die größten 10 Städte die Ursprungsorte der Innovation sind (SHINOHARA und OKUDA 2010). Die Interaktion zwischen den Regionen bleibt damit unberücksichtigt (vgl. Abschnitt 4.6).

Die Diffusion von PV-Anlagen wird in einer Studie von RAMIREZ-ROSADO et al. (2011) untersucht. Ziel der Analyse ist die Vorhersage der räumlichen Ausbreitung drei verschiedener PV-Systeme in der Rioja-Region in Spanien unter Verwendung eines logistischen Diffusionsmodells. Die Parameter-Anpassung erfolgt mit Hilfe von Expertenaussagen. Die Vorhersage basiert jedoch lediglich auf Daten zur Bevölkerungsentwicklung und zu Raumtypen (ländlich/urban), aus denen die Art und die Höhe der Nutzung des verwendeten PV-Systems (mit oder ohne Netzanschluss) bestimmt wird (RAMIREZ-ROSADO et al. 2011).

## **5.2.2 Modellierung der räumlichen Diffusion von Innovationen unter Berücksichtigung des Nachbarschaftseffekts**

In einer Studie von ALLAWAY et al. (2003) wird die räumliche Diffusion einer Payback Card für einen Einzelhandelskonzern in einer US-amerikanischen Stadt untersucht. Ziel ist, die räumlichen Diffusionsmuster und die Einflussfaktoren auf den Diffusionsprozess mathematisch zu erfassen. Die Autoren verfügten über einen Adress-Datensatz von ca. 18.000 Kunden mit dem genauen Zeitpunkt der Adoption, so dass die Adoptoren eindeutig in die verschiedenen Adoptergruppen nach ROGERS eingeteilt werden konnten (s. Abschnitt 3.1.3). Zur Erfassung des Diffusionsprozesses wurde ein Cox Hazard-Modell mit exogenen Variablen aufgestellt, um den Einfluss der Entfernung zum Supermarkt, den Einfluss der Anzahl an Informationstafeln sowie der Anzahl an frühen Adoptoren und Innovatoren im räumlichen Umfeld (0,6 Meilen) eines jeden Adopters zu untersuchen. Es zeigt sich, dass die Innovatoren einen hohen Einfluss auf die Adoptionsentscheidung anderer Kunden haben, da die Wahrschein-



lichkeit für die Adoption um 12,5% steigt, wenn ein Innovator sich im räumlichen Umfeld einer Person befindet (ALLAWAY et al. 2003). Durch den zeitlich und räumlich hoch aufgelösten Datensatz ist es den Autoren also möglich, den Nachbarschaftseffekt in einem Diffusionsmodell zu erfassen und auch den Einfluss zusätzlicher Parameter auf die Diffusion zu quantifizieren.

NYBLOM et al. (2003) untersuchen, ob ein Nachbarschaftseffekt bei der Diffusion des Biologischen Anbaus unter Landwirten von 1990 bis 1999 in der Region North Karelia in Finnland vorliegt. Der Datensatz umfasst die genauen Adressen der landwirtschaftlichen Betriebe, so dass die Distanzen zwischen den Betrieben bestimmt werden können. Im ersten Schritt wird die räumliche Autokorrelation der Bio-Landwirte analysiert. Es zeigt sich, dass eine signifikante Clusterung der Bio-Landwirte vorliegt, d.h. Bio-Landwirte befinden sich häufiger in Nachbarschaft zueinander als durch eine Zufallsverteilung zu erwarten gewesen wäre. Mit Hilfe einer logistischen Regression wird im nächsten Schritt untersucht, ob die räumliche Autokorrelation auf die Art der hergestellten Produkte oder auf die Anzahl an umliegenden Betrieben insgesamt zurückzuführen ist. Die räumliche Autokorrelation kann durch diese Faktoren jedoch nicht vollständig erklärt werden. Somit wird schließlich ein raumzeitliches Diffusionsmodell aufgestellt, um den Einfluss von Adoptoren aus dem Vorjahr auf benachbarte Landwirte zu überprüfen. Es zeigt sich, dass ein sozialer Kommunikationsprozess vorliegt, da neue Bio-Betriebe häufig in Nachbarschaft zu bereits existierenden Bio-Betrieben entstehen. Der Nachbarschaftseffekt nimmt jedoch mit der Zeit ab, wenn die Idee des Bioanbaus insgesamt bekannter geworden ist (NYBLOM et al. 2003). Die Studie stellt ein gutes Beispiel dar, wie der Nachbarschaftseffekt überprüft werden kann, indem zunächst auf räumliche Autokorrelation getestet wird, anschließend versucht wird, die Einflussfaktoren auf die Clusterung zu identifizieren und schließlich mit Hilfe eines räumlichen Diffusionsmodells den Einfluss benachbarter Landwirte zu erfassen.

ROTHFIELD (2010) stellt ein Regressionsmodell auf, um die Einflussfaktoren auf die Diffusion von PV-Anlagen in den Zip-Code Gebieten (entspricht ca. PLZ-Gebieten) in Kalifornien von 1998 bis 2008 zu untersuchen. Der Nachbarschaftseffekt wird als erklärende Variable in Form der kumulierten Anzahl an PV-Anlagen aus den Vorjahren im Modell berücksichtigt. Die Autorin kommt u.a. zu dem Ergebnis, dass ein Nachbarschaftseffekt vorhanden ist; dieser bezieht sich jedoch nur auf die PV-Anlagen im jeweiligen Zip-Code-Gebiet, ohne Nachbarschaftsbeziehungen auf angrenzende Gebiete zu überprüfen (ROTHFIELD 2010).

Ausgangspunkt für die Analyse von BOLLINGER et al. (2010) ist die Beobachtung einer räumlichen Clusterung der PV-Anlagen in Kalifornien. Anhand von monatlichen Adress-Daten von PV-Anlagen für den Zeitraum von 2001 bis 2009 werden die Einflussfaktoren auf die Unterschiede in der räumlichen Verteilung von PV-Anlagen untersucht. Die Daten werden zunächst auf Ebene der Zip-Codes aggregiert. Mit Hilfe des Hazard-Modells wird überprüft, inwiefern die Anzahl an bestehenden PV-Anlagen die Installation neuer Anlagen im gleichen Zip-Codes-Gebiet bestimmt, wobei für den Einfluss exogener Variablen kontrolliert wird. Die Ergebnisse der Regression machen deutlich, dass ein Nachbarschaftseffekt vorliegt, da zu einem früheren Zeitpunkt installierte Anlagen einen statistisch signifikanten Effekt auf

Neuinstallationen in einem Gebiet haben. Zudem zeigt sich, dass die Haushaltsgröße und der Besitz eines Hybridautos die Diffusionsgeschwindigkeit erhöhen. Umweltbewusste Haushalte (im Besitz eines Hybridautos) lassen sich jedoch weniger stark von ihren Nachbarn beeinflussen (BOLLINGER und GILLINGHAM 2010). Im zweiten Schritt wird eine straßengenaue Analyse mit Daten von 2001 bis 2006 durchgeführt, wobei jede Beobachtung einem sog. Straßen-Monat entspricht. Aus der Analyse geht hervor, dass 15% der Anlagen in Straßen installiert werden, in denen es bereits schon PV-Anlagen gab. Die Ergebnisse der Regressionen zeigen zudem, dass eine vorherige PV-Installation die Wahrscheinlichkeit für eine weitere Installation um 4% erhöht.

Die Studie zeigt damit, dass statistisch signifikante Nachbarschaftseffekte bei der PV-Diffusion sowohl auf Ebene der Zip-Codes als auch auf Ebene der Straßenabschnitte nachgewiesen werden können. Die Erfassung der räumlichen Abhängigkeiten beschränkt sich allerdings immer jeweils nur auf die beobachtete Einheit und nicht auf die Anlagen in den umliegenden Zip-Code-Gebieten oder Straßenabschnitten. Aus der Studie geht dennoch hervor, dass die räumliche Nähe zu anderen Anlagen, aufgrund eines sozialen Kommunikations- oder Beobachtungseffekts, die Diffusion vorantreibt.

In ihrem bisher unveröffentlichten Diskussionspapier untersuchen RODE und WEBER (2012) die Rolle des Imitationseffekts bei der Diffusion von PV-Anlagen in Deutschland. Ausgangspunkt der Analyse ist das Diffusionsmodell nach GEROSKI (2000), dessen mathematischer Aufbau dem Bass-Modell entspricht. RODE und WEBER erweitern das Modell, indem sie den Imitationseffekt räumlich explizit formulieren: die Anzahl an PV-Anlagen innerhalb eines bestimmten Radius (1 km, 4 km, 10 km, 20 km) wird aufsummiert und der Einfluss der Distanz der Anlagen zum Ausgangspunkt auf die Diffusion gemessen. Die Analysen basieren auf den geocodierten PV-Anlagendaten von 1992 bis 2009. Zusätzlich werden die Kontrollvariablen Globalstrahlung, Anteil an Ein- und Zweifamilienhäusern (EZFH), Bevölkerungsdichte, Haushaltseinkommen und Landnutzung im Modell berücksichtigt. Es zeigt sich, dass sich die Modellgüte erhöht, wenn das Diffusionsmodell um die räumliche Komponente erweitert wird und dass der Imitationseffekt über die Distanz abnimmt. Der Einfluss der Kontrollvariablen stellt sich als gering heraus, wobei der Anteil an EZFH und die Variable, die die landwirtschaftlich geprägten Gebiete beschreibt, gar keinen Einfluss haben (RODE und WEBER 2012). Dieses Ergebnis stellt jedoch keine belastbare Aussage dar, da diese Variablen nur auf NUTS 3-Ebene gemessen wurden<sup>2</sup>. Durch die hohe Datenaggregation ist es möglich, dass die Zusammenhänge falsch dargestellt bzw. unterschätzt werden. Abschließend kann festgehalten werden, dass die Studie einen interessanten Ansatz vorstellt, den Nachbarschaftseffekt bei der Diffusion von PV-Anlagen quantitativ zu erfassen. Der Einfluss sozioökonomischer Variablen wird jedoch nicht ausreichend berücksichtigt, so dass die regionalen Unterschiede in der Diffusion von PV-Anlagen in Deutschland nicht erklärt werden können.

---

<sup>2</sup> Die NUTS-Klassifikation (Systematik der Gebietseinheiten für die Statistik) ist ein hierarchisches System zur Untergliederung des EU-Wirtschaftsraums, wobei die NUTS 3-Ebene ungefähr der Größe von Landkreisen entspricht (EU-KOMMISSION 2012).

Neben den vorgestellten Fallstudien wird die Modellierung der räumlichen Diffusion auch im Bereich der „spatial econometrics“ diskutiert. Bisher wurden standardisierte Verfahren jedoch nur zur Untersuchung von räumlichen *oder* zeitlichen Datenreihen entwickelt. Mit dem „space-time recursive model“ existiert zwar ein theoretischer Ansatz zur Modellierung der Diffusion, eine Umsetzung in empirischen Arbeiten liegt jedoch noch nicht vor. Ursache hierfür könnte der Datenmangel und die Komplexität des zweidimensionalen Ansatzes sein (ANSELIN et al. 2008, S. 657).

In Tab. 3 werden die Studien zur räumlichen Diffusion nach der Art der Innovation, Datentyp, Methode und Land zusammenfassend dargestellt. Aufbauend auf den Erkenntnissen der Theorie der Diffusion von Innovationen und den Ergebnissen aus vorausgegangenen Forschungsarbeiten werden im Folgenden nun die Forschungsziele für diese Arbeit erläutert.

Tab. 3: Studien zur räumlichen Diffusion von Innovationen

| Innovation          | Datentyp   | Methode   | Land        | Quelle                        |
|---------------------|--|---|-------------|-------------------------------|
| Mobiltelefone       | Aggregierte Daten für Regionen                             | Bass-Modell, Räumliche Regression   | China       | Ding et al. (2010)            |
| Mautgebührenrechner | Aggregierte Daten für Provinzen                            | Räumliche Regression  | Japan       | Hamaoka (2009)                |
| Hybridfahrzeuge     | Aggregierte Daten  | Finite Elemente Methode, Haynes Modell  | Japan       | Shinohara & Okuda (2010)      |
| Prepaid Card        | Adressdaten  | Cox Hazard Modell   | USA         | Allaway et al. (2003)         |
| Biologischer Anbau  | Adressdaten  | Räumliche Autokorrelation, Logistische Regression, Raum-Zeit-Diffusionsmodell | Finnland    | Nyblom et al. (2003)          |
| PV-Anlagen          | Rasterdaten  | Logistische Regression  | USA         | Ramirez-Rosado et al. (2011)  |
|                     | Aggregierte Daten für Zip-Code-Gebiete                     | Probit Modell und Negative Binominal Regression                               | USA         | Rothfield (2010)              |
|                     | Aggregierte Daten für Zip-Code-Gebiete, Adressdaten        | Hazard Modell, Regression   | USA         | Bollinger & Gillingham (2010) |
|                     | Geocodierte PV-Anlagen, aggregierte Daten auf NUTS 3-Ebene | Diffusionsmodell, Pooled panel model  | Deutschland | Rode & Weber (2012)           |

Quelle: Eigene Erhebung

## 5.3 Fazit und Vorgehen der empirischen Untersuchung

In Kapitel 5.1 wurde gezeigt, dass in den Studien zur Diffusion von EE-Technologien die Analyse der Ursachen für eine erfolgreiche oder ausbleibende Diffusion im Vordergrund steht, sowie die Analyse des Einflusses von Politikinstrumenten auf die Diffusion *oder* die Beschreibung und Modellierung der Diffusion innerhalb eines Landes. Forschungsarbeiten, die sich mit der Diffusion von EE-Technologien in Deutschland auseinandersetzen, betrachten immer das Innovationssystem als Ganzes ohne auf die räumlichen Unterschiede einzugehen (JACOBSSON et al. 2002; WÜSTENHAGEN und BILHARZ 2006). DEWALD und TRUFFER (2012) versuchen die räumlichen Unterschiede in der PV-Diffusion in Deutschland allein durch Unterschiede im Engagement von

Solarinitiativen zu erklären. Hierbei kommen sie jedoch nur zu qualitativen Abschätzungen auf Ebene der Bundesländer. MAUTZ et al. (2008) beschreiben ebenfalls die Bedeutung von Solarinitiativen für die Diffusion von PV und führen die Unterschiede in der PV-Nutzung zwischen städtischen und ländlichen Regionen auf die Unterschiede im Kommunikationsverhalten zurück. Die Ergebnisse werden jedoch nicht empirisch belegt.

Zudem liegen bisher nur wenige Forschungsarbeiten vor, die sich mit der Modellierung der räumlichen Diffusion von Innovationen befassen. So wurde durch Kapitel 4.6 deutlich, dass es an standardisierten mathematischen Modellen mangelt, um die räumliche Diffusion von Innovationen zu untersuchen. Meist werden aufbauend auf bestehenden Modellen eigene mathematische Ansätze entwickelt (vgl. Abschnitt 5.2). Des Weiteren beschäftigen sich nur wenige Arbeiten mit dem Einfluss des Nachbarschaftseffekts auf die räumliche Diffusion (ALLAWAY et al. 2003; NYBLOM et al. 2003; BOLLINGER und GILLINGHAM 2010; RODE und WEBER 2012). RODE und WEBER (2012) stellen zwar ein Diffusionsmodell auf, mit dem sie den Einfluss des Nachbarschaftseffekts der PV-Diffusion in Deutschland quantitativ untersuchen, berücksichtigen jedoch nur unzureichend den Einfluss sozioökonomischer Faktoren auf die räumlichen Unterschiede in der PV-Diffusion.

In dieser Arbeit wird daher erstens untersucht, was die Ursachen für die räumlichen Unterschiede in der Diffusion von PV-Anlagen in privaten Haushalten in BW sind, einem Bundesland, das nach Bayern heute die größte Anzahl an PV-Anlagen pro Einwohner aufweist (vgl. Abschnitt 2.2). Zweitens wird in dieser Arbeit untersucht, ob die Theorie der räumlichen Diffusion nach Hägerstrand und im Speziellen der Nachbarschaftseffekt auf die räumliche Diffusion von PV-Anlagen in den Gemeinden BWs zutrifft.

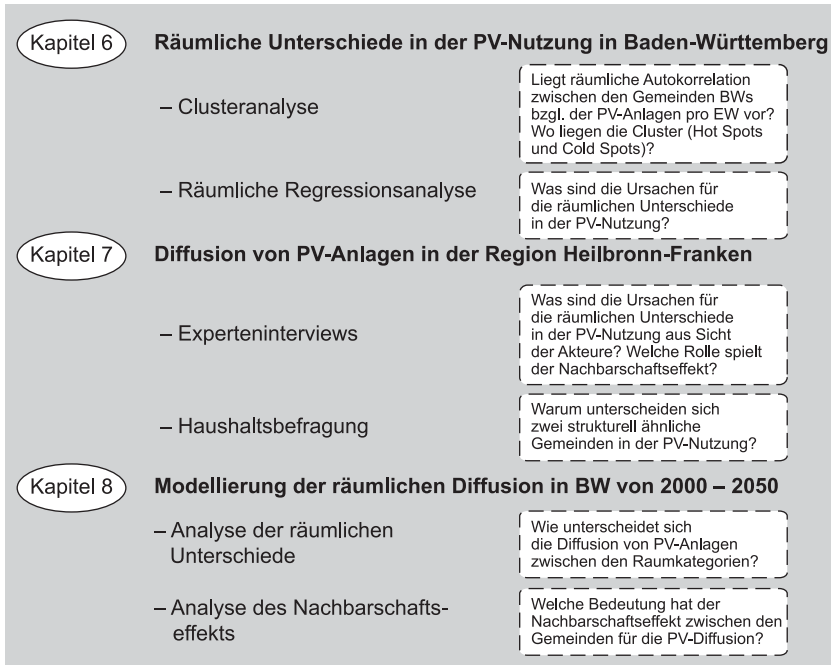
Es wird davon ausgegangen, dass ein Nachbarschaftseffekt sowohl nach dem Modell der persönlichen als auch der unpersönlichen Kommunikation existiert (vgl. Abschnitt 3.1.3.1). Einerseits ermöglichen PV-Anlagen in der Nachbarschaft sich mit Besitzern der Anlagen über technische Details, Finanzierungsmöglichkeiten, Installateure vor Ort und die Zufriedenheit mit der PV-Anlage auszutauschen und somit von den Erfahrungen der Nachbarn direkt zu profitieren (vgl. Abschnitt 3.1.2.1). Andererseits führt allein die Beobachtung einer Vielzahl von Anlagen in der eigenen Nachbarschaft dazu, dass die Technologie stärker ins Bewusstsein gerät und als etwas Normales empfunden wird: Je mehr Anlagen in räumlicher Nähe zu einer Person installiert sind, desto eher entsteht der Eindruck, dass sich die Investition lohnt, wodurch sich die Wahrscheinlichkeit zur Installation einer eigenen Anlage erhöht (vgl. Abschnitt 3.1.3.1). Der Nachbarschaftseffekt könnte also neben anderen lokalen Faktoren die Diffusion von PV-Anlagen beeinflussen.

Aus den oben genannten Zielen der Arbeit ergeben sich folgende Forschungsfragen, die den Aufbau der Arbeit widerspiegeln (s. Abb. 13):

- Wie haben sich PV-Anlagen in privaten Haushalten (PV-Anlagen  $\leq 30$  kWp) von 2000 bis 2009 über Raum und Zeit in BW verbreitet? (Abschnitt 6.2)
- Liegen signifikante Unterschiede in der PV-Nutzung zwischen den Gemeinden in BW vor? (Abschnitt 6.3)

- Was sind die Ursachen für die räumlichen Unterschiede in der Diffusion von PV-Anlagen? (Abschnitt 6.4 und Kapitel 7)
- Wie unterscheidet sich die zeitliche Dynamik der Diffusion in den einzelnen Gemeinden? Lassen sich die Gemeinden bzgl. ihres Diffusionsverlaufs klassifizieren? (Abschnitt 8.2)
- Welche Rolle spielen räumliche Nachbarschaftseffekte für die Diffusion von PV-Anlagen in privaten Haushalten? (Abschnitt 6.4, Kapitel 7 und Abschnitt 8.3)

Abb. 13: Ablauf der empirischen Untersuchung



Quelle: Eigene Darstellung

## 6 Räumliche Unterschiede in der PV-Nutzung in Baden-Württemberg

PV-Anlagen waren im Bereich der privaten Nutzung Anfang der 1990er Jahre eine Innovation, die sich durch die finanzielle Förderung des EEG seit 2000 rapide verbreitet hat. Auch in BW setzte eine Diffusion der Technologie ein, jedoch mit räumlichen Unterschieden. Daten über die PV-Nutzung in den Gemeinden aus dem Jahr 2009 zeigen, dass sog. „Hot Spot“- und „Cold Spot“-Regionen in BW entstanden sind, in denen Gemeinden über- bzw. unterdurchschnittlich viele PV-Anlagen pro Einwohner aufweisen.

Nach einer kurzen Vorstellung der Datengrundlage (Abschnitt 6.1) wird dargestellt, wie sich die PV-Anlagen von 2000 bis 2009 in den Gemeinden BWs verbreitet haben (6.2). Daran anschließend wird anhand der Daten von 2009 aufgezeigt, dass eine räumliche Clusterung von PV-Anlagen in den Gemeinden vorliegt und wo sich die Hot Spots und Cold Spots der PV-Nutzung befinden (6.3). Im letzten Abschnitt des Kapitels werden schließlich mögliche Ursachen für die räumlichen Nutzungsunterschiede aufgedeckt (6.4).

### 6.1 Datengrundlage

In diesem Kapitel werden zum einen die PV-Daten vorgestellt, die Grundlage für die Analysen der gesamten Arbeit sind (6.1.1). Zum anderen werden die sozioökonomischen Daten und die Daten zur Globalstrahlung beschrieben, die in die Regressionsanalyse am Ende des Abschnitts eingehen (6.1.2).

#### 6.1.1 PV-Anlagen in Baden-Württemberg

Die Daten zu den PV-Anlagen konnten von den Internetseiten der Übertragungsnetzbetreiber in BW heruntergeladen werden, da die Netzbetreiber gemäß § 52 Abs. 1 EEG verpflichtet sind, die EEG-Anlagendaten auf ihren Internetseiten zu veröffentlichen. BW fällt zum größten Teil in die Regelzone der EnBW Transportnetze AG; das Netzgebiet Ludwigsburg wird von der Süwag Energie AG (Verteilnetzbetreiber) versorgt und fällt in die Regelzone der Amprion GmbH. Die verwendeten Daten stammen somit von den Internetseiten der EnBW und Amprion und wurden zusätzlich mit den Daten der „Energy Map“<sup>3</sup> abgeglichen und ergänzt (Amprion GmbH 2011; EnBW Transportnetze AG 2011; Energy Map 2011).

---

3 „Energy Map“ ist eine Initiative der Deutschen Gesellschaft für Sonnenenergie e.V., die die EEG-Anlagendaten aufbereitet und auf ihrer Internetseite zur Verfügung stellt.

Die Datensätze umfassen Informationen zu

- Standort (PLZ und Gemeinde)
- Netzbetreiber
- Spannungsebene
- Nennleistung in kWp
- Inbetriebnahmejahr
- Einspeisung in kWh pro Jahr
- Vergütung in EUR

Je nach Aufzeichnung der Verteilnetzbetreiber sind die Angaben zum Standort auch als Adressdaten mit Straße und Hausnummer verfügbar.

### **Datenaufbereitung**

Die PV-Daten wurden für den Zeitraum von 1990 bis Ende 2009 aufbereitet<sup>4</sup>. Bis zum 31.12.2009 waren in BW 128.675 PV-Anlagen bis zu einer Leistung von 30 kWp installiert. In BW lag der Anteil der bis 2009 installierten PV-Anlagen bis 30 kWp bei 81,4%. (BUNDESNETZAGENTUR 2011, S. 22).

Für die räumlichen Analysen auf Gemeindeebene wurde der PV-Datensatz mit geographischen Informationen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie und Einwohner-Daten des statistischen Landesamtes BWs ergänzt (BKG 2007; StaLa BW 2010). Alle PV-Anlagen bekamen damit den amtlichen Gemeindeschlüssel zugewiesen und wurden auf Gemeindeebene aggregiert. PV-Daten existieren für 1104 Gemeinden in BW. Für die Diffusionsanalysen wurden zudem für die Jahre von 2000 bis 2009 einzelne Datensätze generiert, um die Zunahme an PV-Anlagen pro Jahr abbilden zu können. Diese Datensätze enthalten die aggregierte Anzahl an PV-Anlagen auf Gemeindeebene, die bis zum jeweiligen Jahr installiert wurden.

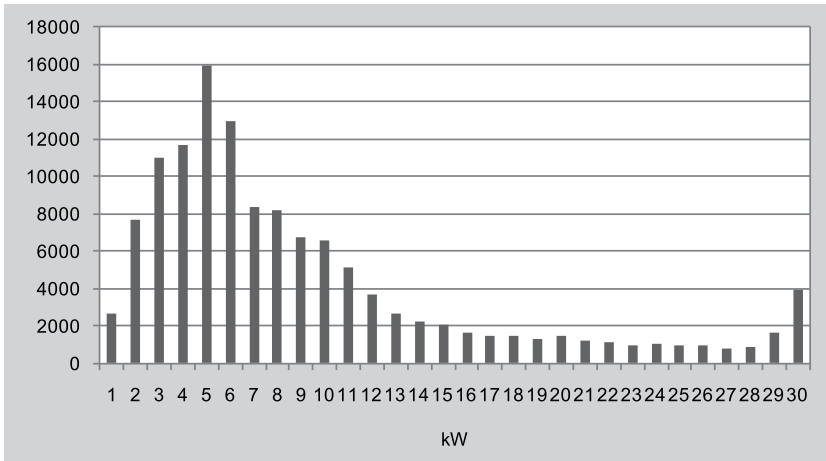
### **Deskriptive Statistik**

In Abb. 14 ist die Häufigkeitsverteilung der installierten PV-Anlagen über die Leistungsklassen von 1 – 30 kWp dargestellt. Knapp 85% der PV-Anlagen liegen im Leistungsbereich zwischen 1 – 15 kWp, wobei der Großteil (15.942 Anlagen bzw. 12% aller Anlagen) eine installierte Leistung von 5 kWp aufweist. Bei Betrachtung der PV-Entwicklung von 1990 bis 2009 wird deutlich, welche Wirkung das EEG auf die Installation von PV-Anlagen hatte (s. Abb. 15): Bis 1999 waren 586 PV-Anlagen in BW installiert; 2001 erfolgte plötzlich ein sprunghafter Anstieg mit 1.684 Neuinstallationen in einem Jahr. Bis 2009 nahm die Anzahl an neuen Anlagen fast jedes Jahr zu; im Jahr 2009 wurden schließlich allein 29.468 PV-Anlagen installiert.

---

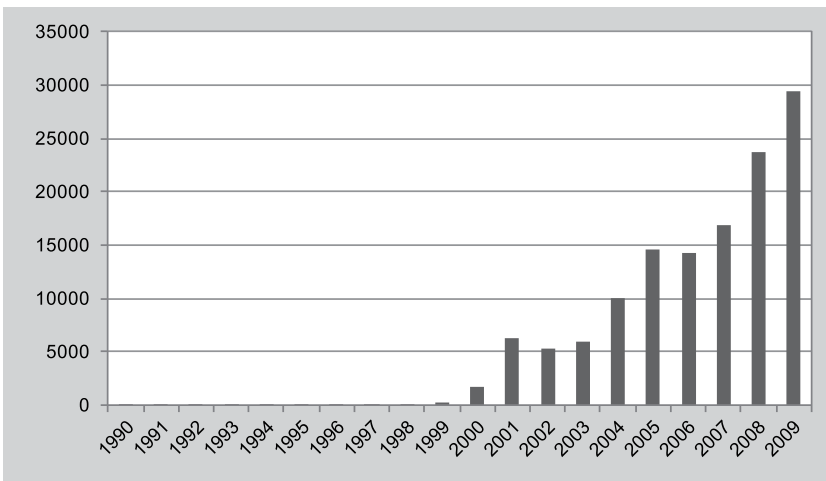
<sup>4</sup> Die Daten vor 2000 sind möglicherweise nicht vollständig, da erst seit dem EEG 2000 Veröffentlichungspflicht besteht.

Abb. 14: Anzahl installierter PV-Anlagen in BW im Jahr 2009 bis zu einer Leistung von 30 kWp



Quelle: EnBW Transportnetze AG (2010), Amprion GmbH (2010)

Abb. 15: Anzahl an neuen PV-Anlagen pro Jahr in BW von 1990 bis 2009



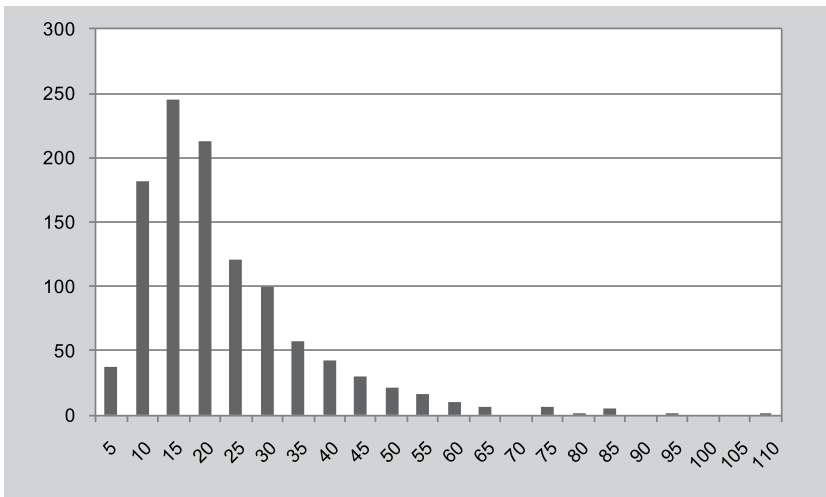
Quelle: EnBW Transportnetze AG (2010), Amprion GmbH (2010)

Für die Analysen in den folgenden Kapiteln wird der Wert „PV-Anlagen pro Einwohner“ (PV/EW) für die Gemeinden verwendet, um für den Effekt unterschiedlicher Gemeindegrößen bei der Anzahl an installierten PV-Anlagen zu korrigieren. Das Histogramm der Variable PV/EW zeigt eine rechtsschiefe Verteilung (s. Abb. 16). Wie der Kolmogorov-Smirnov- und der Shapiro-Wilk-Test bestätigen, liegt keine Normalverteilung der Variable PV/EW vor (s. ANHANG 1, Tab. 9). Im Jahr 2009



hatten die Gemeinden im Durchschnitt 20,5 PV-Anlagen pro 1000 Einwohner (Median: 16,7). Über 80% der Gemeinden weisen nicht mehr als 30 PV-Anlagen pro 1000 EW auf (s. Abb. 16).

Abb. 16: Histogramm der PV-Anlagen pro 1000 Einwohner im Jahr 2009



Quelle: EnBW Transportnetze AG (2010), Amprion GmbH (2010)

Die Extremwerte lassen sich mit Hilfe eines Boxplots<sup>5</sup> darstellen. Demnach haben 13 Gemeinden eine extrem hohe Anzahl an PV/EW. Die höchste Anzahl an PV-Anlagen weist Tiefenbach (Lkr Biberach) auf mit 107 Anlagen pro 1000 EW, gefolgt von Emeringen (Alb-Donau-Kreis) mit 93 Anlagen pro 1000 EW (vgl. ANHANG 1, Boxplot in Abb. 41 und Extremwerte in Tab. 10). Extremwerte für Gemeinden mit besonders wenigen Anlagen pro EW existieren nicht. Dies könnte darauf hinweisen, dass es einige „Vorreiter“-Gemeinden gibt, in denen bereits viele PV-Anlagen installiert sind und die sich bereits am Ende des Diffusionsprozesses befinden. Die meisten Gemeinden weisen jedoch noch relativ wenige Anlagen pro EW auf und befinden sich deshalb womöglich noch in einem früheren Diffusions-Stadium.

## 6.1.2 Daten auf Gemeindeebene

### 6.1.2.1 Sozioökonomische Daten

Für die Analysen auf Gemeindeebene wurden Daten vom Statistischen Landesamt BW mit dem Gebietsstand von 2009 bezogen (STALA BW 2010). Die Daten umfassen

<sup>5</sup> Der Kasten des Boxplots umfasst die Werte vom ersten bis zum dritten Quartil (25. bzw. 75. Perzentil). Werte, die um mehr als drei Kastenlängen außerhalb liegen, stellen Extremwerte dar und sind mit einem Stern gekennzeichnet (BORTZ und SCHUSTER 2010, S. 44).

Informationen zu Alter, Bildungsabschlüssen, Einkommen, Gebäudebestand und Landwirtschaft. Daten über Familienstruktur, Gebäudetypen und Baujahresklassen wurden von der infas GEOdaten GmbH bezogen (INFAS 2010).

Die Daten werden zur Berechnung der Regression in Abschnitt 6.4.2 verwendet, um die Einflussfaktoren auf die räumlichen Unterschiede in der PV-Nutzung zu quantifizieren. In Abschnitt 7.2.1 wird mit Hilfe dieser Daten die Einteilung der Gemeinden in Heilbronn-Franken in Cluster vorgenommen, um strukturell ähnliche Gemeinden für die Haushaltsbefragung zu identifizieren.

### 6.1.2.2 Globalstrahlungsdaten

Neben den sozioökonomischen Daten wurden für die Arbeit die Globalstrahlungsdaten vom Deutschen Wetterdienst (DWD) aufbereitet (DWD 2010). Die Daten stellen die langjährige (1981-2000) mittlere Jahressumme der Globalstrahlung in kWh/m<sup>2</sup> in einer räumlichen Auflösung von 1x1 km dar. Aus den Rasterdaten wurden die Durchschnittswerte für jede Gemeinde berechnet, die in der Regressionsanalyse in Abschnitt 6.4.2 verwendet werden.

### 6.1.2.3 Daten zu den Raumkategorien

Zur Analyse der PV-Entwicklung nach siedlungsstrukturellen Gesichtspunkten wird die Einteilung der Gemeinden BWs nach Raumkategorien (RK) verwendet, die durch den Landesentwicklungsplan (LEP) festgeschrieben ist.

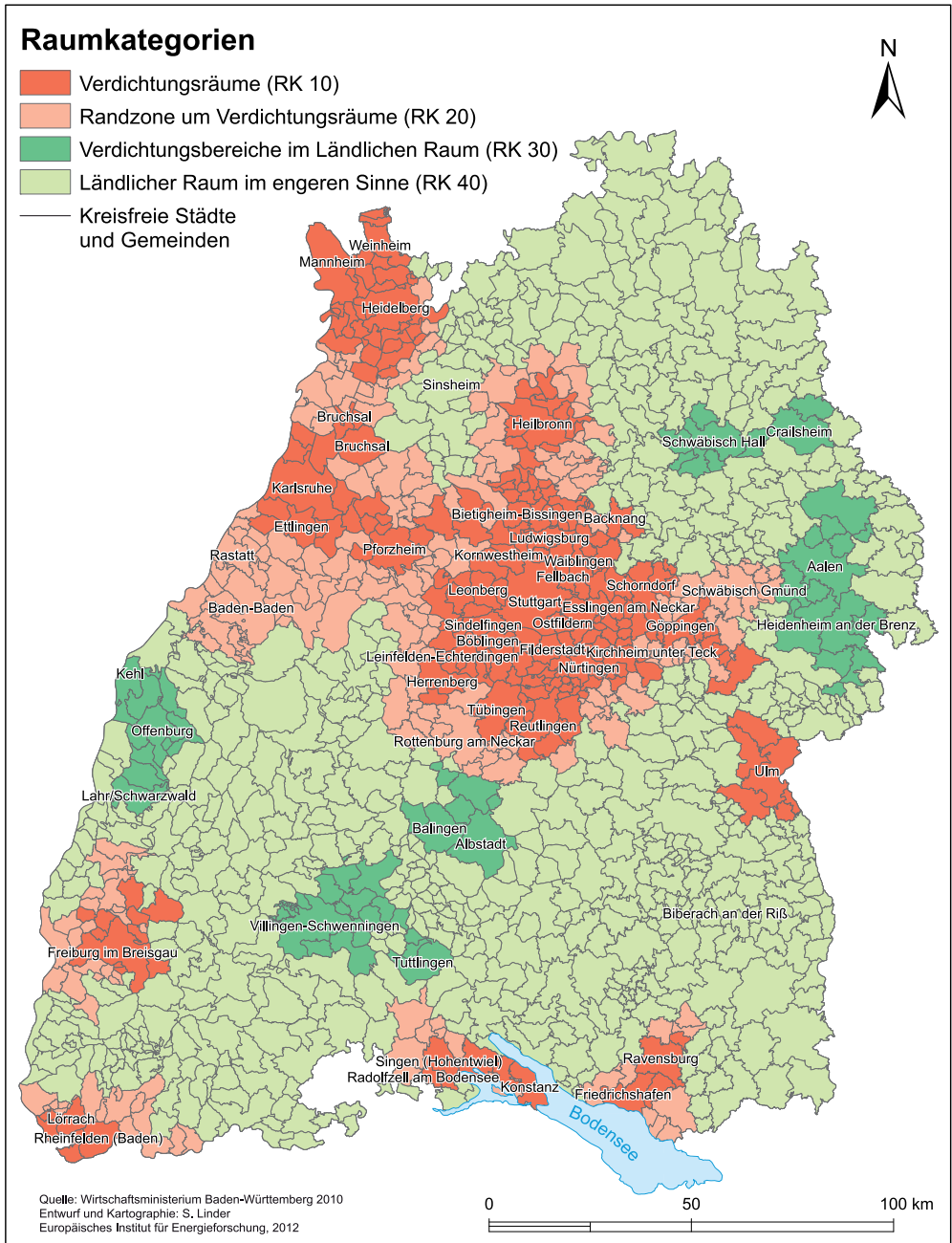
„Der LEP ist das rahmensetzende, integrierende Gesamtkonzept für die räumliche Ordnung und Entwicklung des Landes. [...] An ihm sind alle räumlichen Planungen, insbesondere die Regionalplanung, die kommunale Bauleitplanung und die fachlichen Einzelplanungen sowie raumbezogene Förderprogramme zu orientieren“ (MVI BW 2012). Ziel ist, durch den LEP „...in allen Teilen des Landes gleichwertige Lebensverhältnisse, günstige wirtschaftliche Entwicklungsperspektiven und gesunde Umweltbedingungen zu gewährleisten“ (MVI BW 2012). Derzeit gilt der LEP 2002.

Die Einteilung der Gemeinden nach RK dient der räumlichen Planung und ermöglicht städtische und ländliche Regionen voneinander abzugrenzen. Die Grobabgrenzung erfolgt anhand objektiver Merkmale, wie siedlungsstruktureller Gegebenheiten und funktionsräumlicher Zusammenhänge in Stadt-Umland-Bereiche. Gleichzeitig werden aber auch planerische Aspekte herangezogen, die raumordnerisch bedeutsame Gebietszusammenhänge berücksichtigen, um „Flickenteppiche“ zu vermeiden (MVI BW 2012a).

Die Gemeinden BWs werden im LEP 2002 in vier RK unterteilt (WiMi BW 2002):

- *Verdichtungsräume* als großflächige Gebiete mit stark überdurchschnittlicher Siedlungsverdichtung und intensiver innerer Verflechtung (RK 10)
- *Randzonen um die Verdichtungsräume* als an Verdichtungsräume angrenzende Gebiete mit erheblicher Siedlungsverdichtung (RK 20)
- *Verdichtungsbereiche im ländlichen Raum* als Stadt-Umland-Bereiche mit engen Verflechtungen und erheblicher Siedlungsverdichtung (RK 30)

Karte 1: Raumkategorien in Baden-Württemberg nach dem LEP 2002



- *Ländlicher Raum im engeren Sinne* als großflächige Gebiete mit zumeist deutlich unterdurchschnittlicher Siedlungsverdichtung und hohem Freiraumanteil (RK 40)

Karte 1 zeigt die Verteilung der RKs in BW. Verdichtungsräume sowie deren Randzonen stellen die größeren Städte und ihr Umland dar. Zu ihnen gehören der Großraum Stuttgart, Mannheim, Heidelberg, Karlsruhe, Pforzheim, Heilbronn, Ulm, Freiburg, Lörrach, Konstanz sowie der Raum Friedrichshafen am Bodensee. Verdichtungsbereiche im ländlichen Raum finden sich in und um Offenburg, Villingen-Schwenningen/Rottweil/Tuttlingen, Balingen, Schwäbisch-Hall und Aalen/Heidenheim. Die restlichen Gemeinden BWs werden der RK „Ländlicher Raum im engeren Sinne“ zugeordnet.

Die Daten zu den RK werden in Abschnitt 6.2 zum Vergleich der Siedlungsstruktur mit der Verteilung der PV-Anlagen verwendet, sowie zur Modellierung der PV-Diffusion in Abschnitt 8.2.

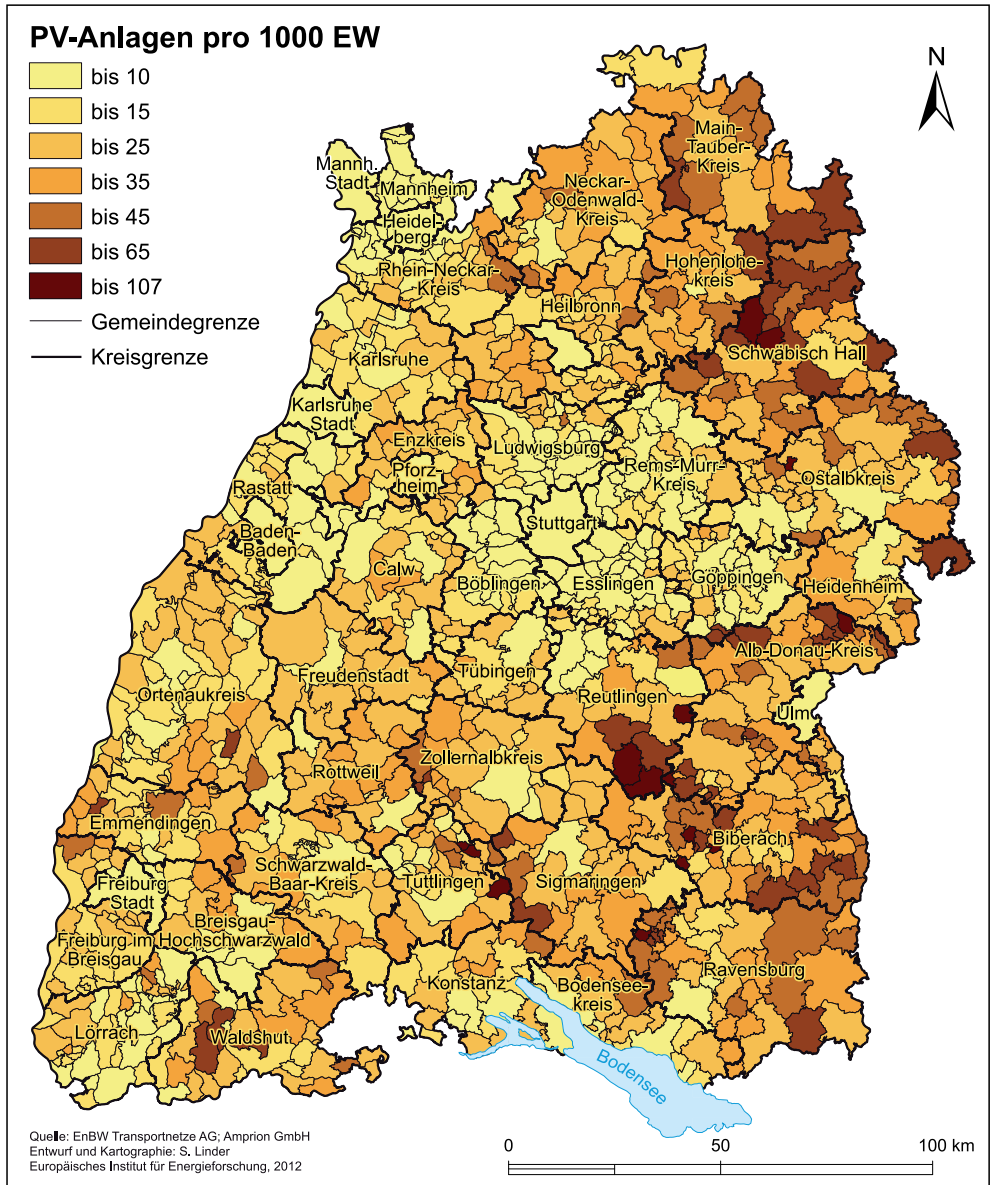
## 6.2 Entwicklung und räumliche Verteilung der PV-Nutzung

Mit der Einführung des EEG im Jahr 2000 nahm die Anzahl an PV-Anlagen schlagartig zu. Trotz gleicher finanzieller Vergütung des eingespeisten Stroms durch das EEG zeichnen sich räumliche Unterschiede in der Anzahl an PV-Anlagen pro Einwohner (EW) in den einzelnen Gemeinden in BW ab.

In Karte 2 ist die Anzahl an PV-Anlagen (bis 30 kWp) pro 1000 EW für das Jahr 2009 dargestellt. Auffällig ist, dass es Regionen gibt, in denen die Anzahl an PV-Anlagen/EW sehr gering ist, wie um die Städte Stuttgart, Mannheim, Heidelberg, Karlsruhe und Baden-Baden. In den jeweiligen Gemeinden und deren Umland liegt die Verbreitung von PV-Dachanlagen bis 30 kWp meist nicht über fünf PV-Anlagen pro 1000 EW. Demgegenüber treten andere Regionen durch eine besonders hohe PV-Nutzung hervor. Diese sind v.a. im Osten von BW zu finden. Hierzu gehören sowohl die Gemeinden in den Landkreisen Main-Tauber, Schwäbisch Hall und Hohenlohekreis im Norden BWs, als auch die Landkreise Alb-Donau, Biberach, Reutlingen, Sigmaringen und Waldshut. Hier liegt die PV-Nutzung häufig bei über 50 PV-Anlagen pro 1000 EW.

Die räumliche Struktur der Verteilung der PV-Anlagen legt die Vermutung nahe, dass ein Zusammenhang zwischen den Siedlungstypen und der PV-Nutzung besteht. Nach dem Landesentwicklungsplan (LEP) von 2002 können die Gemeinden BWs vier verschiedenen Raumkategorien (RK) zugeordnet werden, die die Siedlungsstruktur widerspiegeln: Verdichtungsräume (10), Randzonen um Verdichtungsräume (20), Verdichtungsbereiche im ländlichen Raum (30) und ländlicher Raum im engeren Sinne (40) (WiMi BW 2002, S. 9ff.). Eine Korrelationsanalyse zeigt, dass eine signifikante Korrelation ( $0,608, p = 0,01$ ) zwischen den Raumkategorien und dem Wert PV/EW von 2009 besteht: in den Verdichtungsräumen sind relativ weniger PV-Anlagen installiert als in den ländlichen Räumen (vgl. ANHANG 1, Tab. 11 und Stein (2011)).

Karte 2: Installierte PV-Anlagen (bis 30 kWp) pro 1000 Einwohner in BW im Jahr 2009



Eine lockere Siedlungsstruktur und die damit einhergehende Art der Bebauung mit Ein- und Zweifamilienhäusern und das Vorhandensein landwirtschaftlicher Betriebe mit großen Dachflächen fördert also vermutlich die Installation von PV-Anlagen.

Die Entwicklung der PV-Nutzung von 2000 bis 2009 ist in Karte 3 dargestellt. Nach dem Phasenmodell von HÄGERSTRAND (vgl. Abschnitt 3.2.2.3) befand sich die Ausbreitung der Innovation PV im Jahr 2000 bereits im Diffusionsstadium, da die Innovation jedes Jahr in mehr Gemeinden adoptiert wird. Ab ca. 2002 setzte dann das Verdichtungsstadium ein, in dem die Anzahl von PV-Anlagen in den Gemeinden weiter zunahm.

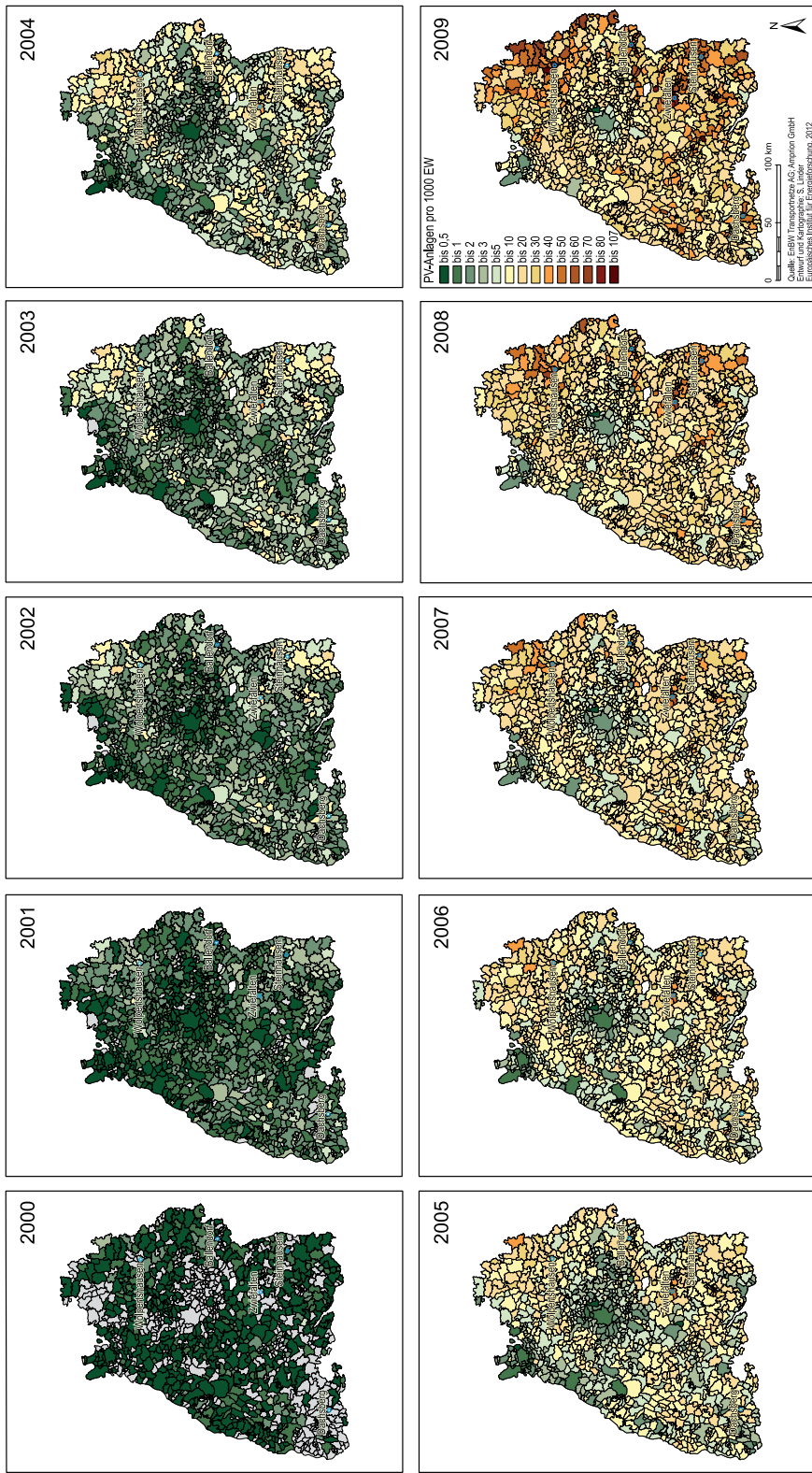
Bei Betrachtung der Karten wird auch deutlich, dass in einigen Gemeinden die Anzahl an PV-Anlagen überdurchschnittlich stark ansteigt und sich Cluster von sog. „Vorreiter-Gemeinden“ bilden. In Karte 3 wurden fünf Gemeinden markiert, die im Jahr 2009 durch eine besonders hohe Anzahl an PV-Anlagen/EW auffallen und sich im Zentrum eines PV-Clusters befinden. Anhand dieser fünf Gemeinden wird mit Hilfe der Karten veranschaulicht, wie sich die Anzahl an PV-Installationen in der jeweiligen Gemeinde und den angrenzenden Nachbargemeinden im Zeitraum von 2000 bis 2009 entwickelte.

In Wolpertshausen, einer Gemeinde im Nordosten BWs, waren bereits im Jahr 2000 überdurchschnittlich viele PV-Anlagen installiert. In den Folgejahren stieg die Anzahl an PV-Anlagen/EW in dieser Gemeinde kontinuierlich an, wobei sukzessive auch die Anzahl an PV-Anlagen/EW in den Nachbargemeinden zunahm, so dass sich bereits ab dem Jahr 2002 ein Cluster von Gemeinden abzeichnete, das relativ mehr PV-Anlagen/EW aufweist als das Umfeld. Die Tatsache, dass es ausgehend von einer Gemeinde, wie hier im Beispiel Wolpertshausen, in den Folgejahren auch in den Nachbargemeinden zu einer Zunahme an PV-Anlagen kommt, könnte auf einen Diffusionsprozess hindeuten, der durch Nachbarschaftsbeziehungen beeinflusst wird. Neben unterschiedlichen lokalen Faktoren, die den Kauf von PV-Anlagen beeinflussen, könnte sich also auch die Anzahl an PV-Anlagen, die sich in der eigenen Gemeinde und in den Nachbargemeinden befinden, positiv auf die Verbreitung der Technologie auswirken.

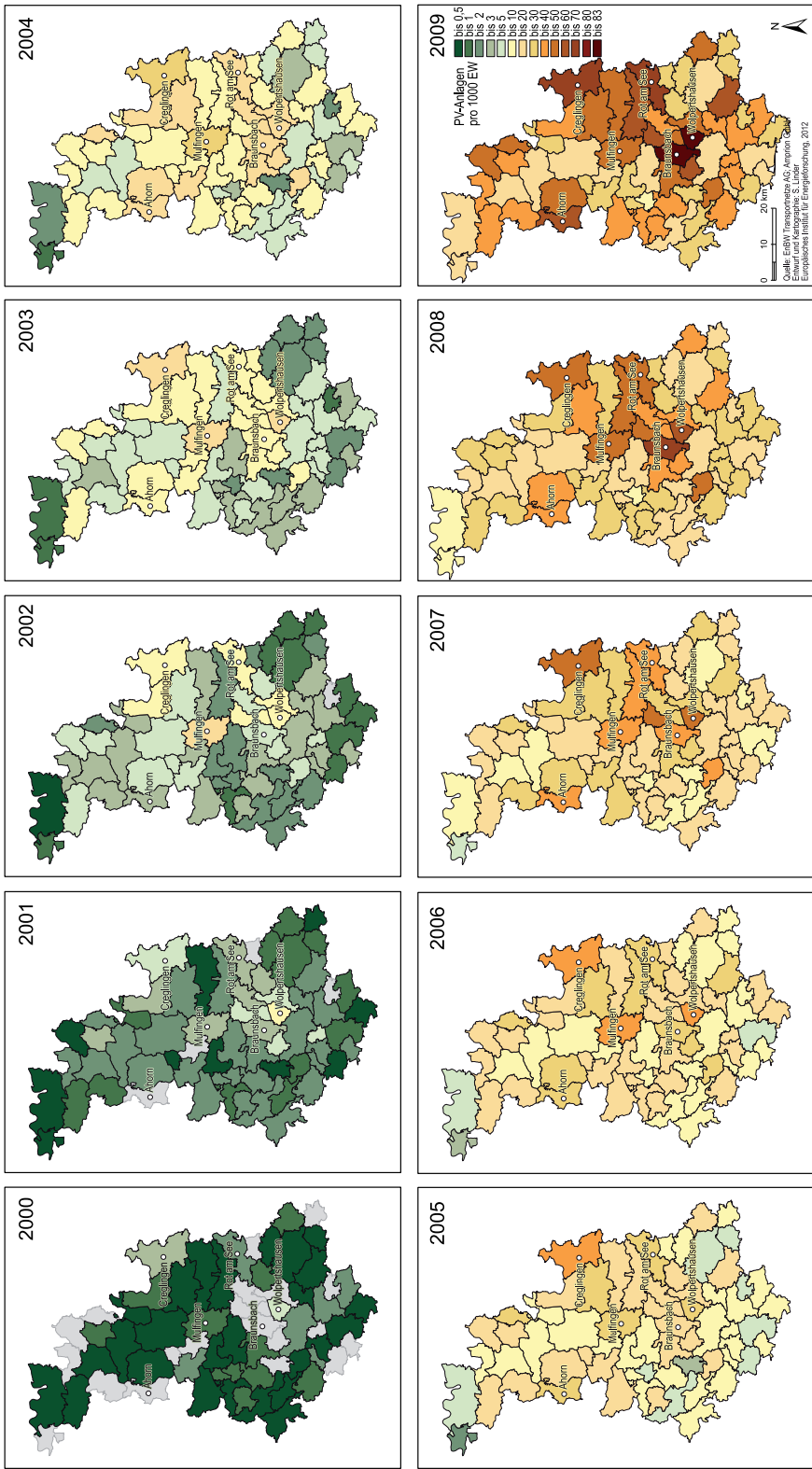
In den übrigen hervorgehobenen Gemeinden waren außer in Steinhausen im Jahr 2000 noch keine PV-Anlagen installiert. In den folgenden Jahren nahm die Anzahl an PV-Anlagen/EW in diesen Gemeinden jedoch überdurchschnittlich stark zu, wie auch in den jeweiligen Nachbargemeinden, wenn auch in unterschiedlichem Ausmaß. Es ist jedoch ebenfalls zu erkennen, dass am Rande der Cluster oft sog. „Bremsen-Gemeinden“ auftreten, d.h. Gemeinden, die trotz der Nachbarschaft zu Gemeinden, in denen viele PV-Anlagen/EW installiert sind, keine wesentlichen Veränderungen in der Anzahl der PV-Installationen aufweisen. Dies wird bspw. in der südlich an Zwiefalten angrenzenden Gemeinde deutlich.

Im Jahr 2009 lag das größte zusammenhängende Cluster von Vorreiter-Gemeinden im Nordosten BWs in den drei Landkreisen Main-Tauber, Hohenlohe und Schwäbisch Hall. Um die räumliche Ausbreitung der Technologie visuell besser erfassen zu können, wird die Entwicklung in diesem Cluster im Detail dargestellt. Wie in Karte 4 zu sehen ist, nimmt Wolpertshausen innerhalb der Region eine Sonderstellung ein, da es in den Anfangsjahren 2000/2001 die meisten Anlagen/EW aufweist und in den Folgejahren besonders im Umkreis dieser Gemeinde eine Zunahme von

Karte 3: Installierte PV-Anlagen (bis 30 kWp) pro 1000 Einwohner von 2000 bis 2009 in BW



Karte 4: Installierte PV-Anlagen (bis 30 kWp) pro 1000 Einwohner von 2000 bis 2009 in Franken (BW) (Main-Tauber-Kreis, Hohenlohekreis, Schwäbisch Hall)





PV-Anlagen zu beobachten ist. Im Jahr 2002 hebt sich auch die Gemeinde Mulfingen durch eine relativ hohe Anzahl an Anlagen/EW von den übrigen Gemeinden ab. In der Karte des Jahres 2004 werden die Vorreiter-Gemeinden sichtbar, d.h. Gemeinden, in denen bis 2004 überdurchschnittlich viele PV-Anlagen/EW installiert sind und die inmitten eines PV-Clusters liegen. Dies sind v.a. die Gemeinden Creglingen, Rot am See, Wolpertshausen, Ahorn und Mulfingen. In den Jahren 2005 bis 2008 nimmt die Anzahl an PV-Anlagen/EW in diesen Gemeinden weiter zu. Nördlich angrenzend an Wolpertshausen tritt ab 2008 auch Braunsbach als PV-Gemeinde deutlich hervor. Im Jahr 2009 setzt schließlich eine Verdichtung zwischen den markanten Gemeinden ein, so dass sich ein großes Cluster von PV-Gemeinden abzeichnet.

Die rein visuelle Interpretation zeigt, dass räumliche Abhängigkeiten zwischen den Gemeinden bzgl. der Anzahl an installierten PV-Anlagen/EW zu vermuten sind. Nun stellt sich die Frage, ob diese Abhängigkeiten bestimmten Regelmäßigkeiten folgen und statistisch signifikant sind (vgl. Abschnitt 6.3). Des Weiteren ist zu klären, durch welche lokalen Faktoren die Zunahme an PV-Anlagen/EW beeinflusst wird und inwiefern die Anzahl an Anlagen in der jeweiligen Gemeinde sowie die Nachbarschaft zu Gemeinden mit einer hohen Anzahl an PV-Anlagen/EW zur Ausbreitung von PV-Anlagen beitragen (vgl. Abschnitt 6.4).

## **6.3 Räumliche Clusterung von PV-Anlagen in Baden-Württemberg**

Durch die Choroplethen-Karte der PV-Anlagen pro EW wurde bereits deutlich, dass eine ungleichmäßige räumliche Verteilung von PV-Anlagen in BW besteht (vgl. Abschnitt 6.2). Es existieren Regionen, in denen überdurchschnittlich viele PV-Anlagen pro Einwohner vorhanden sind und andere Regionen, in denen nur wenige PV-Anlagen installiert sind.

Mit Hilfe von räumlichen Autokorrelationsanalysen ist es möglich, zu überprüfen, ob die Clusterung von PV-Anlagen auch statistisch signifikant ist. Wenn ausgeschlossen werden kann, dass die Clusterung kein zufälliges Phänomen ist, können im nächsten Schritt die Einflussfaktoren auf die räumliche Clusterung von PV-Anlagen untersucht werden.

Der folgende Abschnitt widmet sich zunächst der Darstellung der Methode der räumlichen Autokorrelationsanalyse, um die Grundlagen für die eigenen Analysen zu erklären (6.3.1). In Abschnitt 6.3.2 werden darauf aufbauend die eigene Vorgehensweise zur Aufdeckung von PV-Clustern beschrieben und schließlich als Ergebnis die PV-Cluster in BW aufgezeigt.

### **6.3.1 Analyse der räumlichen Autokorrelation**

Die Analyse der räumlichen Autokorrelation geht auf die Erkenntnis zurück, dass Dinge, die in räumlicher Nähe zueinander liegen, meist ähnlichere Eigenschaften

aufweisen als Dinge, die weiter voneinander entfernt sind. So besagt das erste Gesetz der Geographie: „Everything is related to everything else, but near things are more related than distant things“ (TOBLER 1970, S. 236). Räumliche Autokorrelation beschreibt, wie stark der Zusammenhang zwischen dem Wert einer Variablen an einem Ort und dem Wert dieser Variable an benachbarten bzw. nahegelegenen Orten ist. CLIFF und ORD (1973) definieren räumliche Autokorrelation wie folgt: „If the presence of some quality in a county of a country makes its presence in neighboring counties more or less likely, we say that the phenomenon exhibits spatial autocorrelation“ (CLIFF und ORD 1973, S. 1).

Das Konzept der räumlichen Autokorrelation wurde 1969 von CLIFF und ORD entwickelt, da sie feststellten, dass Modelle, die auf räumlichen Daten basieren, meist zu Schätzfehlern führen. Liegt räumliche Autokorrelation zwischen den Daten vor, so ist die Unabhängigkeit der Daten, die von den meisten statistischen Tests vorausgesetzt wird, nicht gegeben. Aufbauend auf den Arbeiten von MORAN (1948), KRISHNER-IYER (1949) und GEARY (1954) entwickelten CLIFF und ORD (1973) eine mathematische Formulierung des Konzepts (CLIFF und ORD 1973, S. 29ff.). Mit Hilfe dieser Koeffizienten ist es möglich, die Stärke des räumlichen Einflusses auf eine Variable zu untersuchen. Neben der Identifizierung von Schätzfehlern eines Modells kann die Analyse der räumlichen Autokorrelation aufzeigen, auf welcher Maßstabsebene räumliche Muster, sogenannte Cluster, auftreten und damit einen Hinweis auf dahinterliegende Einflussfaktoren geben (GETIS 2007, S. 493f.; GRIFFITH 2009, S. 1). Liegt bspw. eine räumliche Autokorrelation der PV-Anlagen auf Gemeindeebene vor, so könnten die Ursachen für die Clusterung auf eine ähnliche Siedlungsstruktur der benachbarten Gemeinden oder eine ähnliche Ausprägung der sozioökonomischen Parameter zurückzuführen sein.

Mit Hilfe von globalen Koeffizienten kann untersucht werden, ob räumliche Autokorrelation in der gesamten Untersuchungsregion vorliegt. Lokale Koeffizienten geben darüber Aufschluss, wo lokale Cluster auftreten. Damit können innerhalb der Untersuchungsregion Cluster von hohen Werten (sog. Hot Spots) und Cluster von niedrigen Werten (sog. Cold Spots) identifiziert werden (ALDSTADT 2010, S. 279).

### **6.3.1.1 Globale räumliche Autokorrelation**

Bei der Analyse von Datensätzen, die große Raumeinheiten umfassen, liegt meist keine räumliche Stationarität vor, d.h. die Daten sind meist nicht zufällig im Raum verteilt (FOTHERINGHAM et al. 1996, S. 605ff.). Mit Hilfe von globalen Statistiken kann nun untersucht werden, ob eine statistisch signifikante räumliche Autokorrelation innerhalb der gesamten Untersuchungsregion vorliegt. Die Clusterung von ähnlichen Werten (positive oder negative) wird auch als positive räumliche Autokorrelation bezeichnet; sind die Werte gleichmäßig im Raum verteilt („dispersed“) spricht man auch von negativer räumlicher Autokorrelation. Die verschiedenen Maße zur Überprüfung der räumlichen Autokorrelation werden ausführlich dargestellt bei CLIFF und ORD (1973), GOODCHILD (1986) und GRIFFITH (1987).

## Koeffizienten zur Überprüfung globaler räumlicher Autokorrelation

Am häufigsten kommt der globale Moran-Koeffizient („Global Moran’s I“) zur Anwendung, der wie der Pearson Korrelationskoeffizient die Kovarianzen von Wertepaaren vergleicht. Global Moran’s I ist in Gleichung 6.1 dargestellt.

$$I = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (6.1)$$

Die Ähnlichkeit zweier  $x$ -Werte an den Orten  $i$  und  $j$  wird durch das Produkt der Abweichungen der Werte vom Mittelwert gemessen. Dieses Produkt wird mit Hilfe einer Nachbarschaftsmatrix  $W_{ij}$  ( $W$ -Matrix) gewichtet, die Auskunft über die Distanz der Orte  $i$  und  $j$  zueinander bzw. über ihre Nachbarschaft gibt (ALDSTADT 2010, S. 283). Jedes Element  $w_{ij}$  der  $W$ -Matrix entspricht einem Wertepaar von zwei Orten  $i$  und  $j$ . Im Fall einer binären Matrix wird die Nachbarschaft zwischen zwei Orten durch  $w_{ij} = 1$  ausgedrückt; bei  $w_{ij} = 0$  liegt keine Nachbarschaft vor (ANSELIN 1988, S. 19f.). Um eine gleichmäßige Gewichtung der Anzahl an Nachbarschaften zu erreichen, werden die Werte  $w_{ij}$  meist durch die Division mit der Zeilensumme standardisiert (ANSELIN 1992, S. 263). Je nach Nachbarschaftsdefinition ergeben sich unterschiedliche Formen der  $W$ -Matrix. Am häufigsten kommen die Nachbarschaftsdefinitionen zur Anwendung, bei denen direkt angrenzende Polygone als benachbart gelten („Rook“-Nachbarschaft bei angrenzenden Kanten, „Queen“-Nachbarschaft bei angrenzenden Kanten und Ecken), oder ein bestimmter Radius um einen Ort vorgegeben wird, innerhalb dessen Polygone als benachbart bewertet werden. Für weitere Informationen zu  $W$ -Matrizen und Nachbarschaftsdefinitionen siehe GETIS (2007; 2009). Zu berücksichtigen ist, dass die  $W$ -Matrix immer Ausdruck der Form der räumlichen Abhängigkeiten zwischen den Daten ist, d.h. ob beispielsweise Nachbarschaftsbeziehungen über angrenzende Polygone oder eher innerhalb einer bestimmten Distanz zum Tragen kommen. Die  $W$ -Matrix sollte somit die Annahmen über die dahinterliegenden räumlichen Prozesse widerspiegeln (ANSELIN 1988, S. 21).

Global Moran’s I liegt im Wertebereich zwischen -1 und +1. Je höher der absolute Wert, desto höher ist die räumliche Autokorrelation. Ein positiver Moran’s I ist Ausdruck einer Clusterung von Werten, ein negativer Moran’s I deutet auf eine gleichmäßige Streuung der Werte hin. Liegt keine räumliche Autokorrelation vor, nimmt der Koeffizient den Wert 0 an, d.h. die beobachteten Werte sind zufällig im Raum verteilt (CLIFF und ORD 1981, S. 266ff.). Die Signifikanz des Ergebnisses kann durch den Vergleich mit dem Erwartungswert überprüft werden, wobei  $E(I) = n/(n - 1)$ . Die Teststatistik wird unter der Annahme der Zufallsverteilung oder der Normalverteilung berechnet (BOOTS 2002, S. 170; FORTIN und DALE 2007, S. 126).

Die Global Moran’s I-Statistik hat jedoch den Nachteil, dass sie nur Auskunft darüber gibt, ob räumliche Autokorrelation vorliegt, nicht aber, welcher Art die Cluster sind. GETIS und ORD (1992) entwickelten zu diesem Zweck die General G-Statistik, die eine Unterscheidung zwischen Clustern von hohen und niedrigen Werten ermöglicht (GETIS und ORD 1992). Die General G-Statistik ist in Gleichung 6.2 dargestellt, der zugehörige Erwartungswert in Gleichung 6.3.

$$G(d) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}(d) x_i x_j}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_i x_j} \quad (6.2)$$

$$E[G(d)] = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}(d)}{n(n-1)} \quad (6.3)$$

Die Signifikanz der Cluster wird mit Hilfe der Z-Statistik überprüft. Positive  $Z(G)$ -Werte kennzeichnen Cluster von hohen Werten, negative  $Z(G)$ -Werte kennzeichnen dagegen Cluster, die aus niedrigen Werten bestehen. Liegt der  $Z(G)$ -Wert nahe bei Null, kann nicht eindeutig auf eine Zufallsverteilung geschlossen werden. Denn in der Untersuchungsregion können auch Cluster hoher *und* niedriger Werte auftreten, die sich in der globalen Statistik gegenseitig aufheben. Zur Überprüfung der räumlichen Autokorrelation empfehlen GETIS und ORD (2010), aufgrund der unterschiedlichen mathematischen Formulierung der Koeffizienten, sowohl Global Moran's I als auch die General G-Statistik zu berechnen (GETIS und ORD 2010, S. 134).

Die Reichweite der räumlichen Cluster kann mit Hilfe des Korrelogramms untersucht werden. Hier wird der Koeffizient (z.B. Moran's I) in einem Diagramm graphisch über die Distanz angetragen. Die Distanzen entsprechen den gewählten Distanzmaßen, die bei der Berechnung der W-Matrix berücksichtigt wurden. Da die Intensität der Clusterung über die Distanz dargestellt ist, eignet sich das Korrelogramm besonders gut dazu, räumliche Muster aufzuzeigen (CHOU 1995, S. 374). Die Distanz, bei der keine räumliche Autokorrelation mehr vorliegt, wird auch als „spatial range“, „zone of influence“ oder „patch size“ bezeichnet (FORTIN und DALE 2007, S. 131).

### 6.3.1.2 Lokale räumliche Autokorrelation

Globale räumliche Autokorrelationskoeffizienten, wie sie im vorangegangenen Kapitel beschrieben wurden, liefern einen einzigen Wert, der das Ausmaß der Clusterung in der gesamten Untersuchungsregion beschreibt. Bei großen Untersuchungsregionen ist es jedoch wahrscheinlich, dass die Annahme der räumlichen Stationarität verletzt ist, d.h. dass räumliche Prozesse nicht unabhängig von ihrer absoluten Lage im Raum stattfinden (BAILEY und GATRELL 1995, S. 7f.). Eine globale Statistik wird somit der Variationsbreite der Werte nicht gerecht und verdeckt unter Umständen das Vorhandensein von Clustern, die dem globalen Trend entgegen gerichtet sind (ANSELIN 1995, S. 94). Liegt eine globale räumliche Autokorrelation vor, so stellt sich im nächsten Schritt die Frage, wo die einzelnen Cluster liegen und wie groß die Reichweite dieser Cluster ist. Mit Hilfe von lokalen Autokorrelationskoeffizienten können diese Cluster identifiziert und durch deren Lage und Größe Rückschlüsse auf die dahinterliegenden Einflussfaktoren gezogen werden (GETIS und ORD 1996, S. 273).

### Koeffizienten zur Überprüfung lokaler räumlicher Autokorrelation

Die LISA-Statistik (Local Indicators for Spatial Association) wurde von ANSELIN entwickelt (ANSELIN 1988). LISA-Statistiken zeichnen sich durch folgende Merkmale aus:

1. Die LISA einer Beobachtung gibt Auskunft über das Ausmaß der räumlichen Clusterung von Werten im Umkreis dieser Beobachtung.
2. Die Summe der LISAs ist proportional zum globalen Indikator der räumlichen Autokorrelation.

Die am häufigsten verwendete LISA-Statistik ist der lokale Moran's I (siehe Gleichung 6.4), der die Kovarianz der  $x$ -Werte in einer Region  $i$  zu den benachbarten Regionen  $j$  misst.

$$I_i = \frac{\sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2} \quad (6.4)$$

Positive  $I_i$ -Werte sind Anzeichen für Cluster von hohen oder niedrigen Werten, negative  $I_i$ -Werte deuten auf eine gleichmäßige Streuung der Werte hin (vgl. Global Moran's I in Kap. 6.3.1.1). Die Signifikanz der Clusterung kann durch die Annahme einer Normalverteilung oder durch die Generierung einer Zufallsverteilung (Monte-Carlo-Simulation) überprüft werden. Bei der Monte-Carlo-Simulation werden die beobachteten Werte zufällig über alle Gemeinden verteilt. Aus den somit generierten Erwartungswerten wird die LISA-Statistik neu berechnet. Je höher die Anzahl der Permutationsläufe, desto höher das Signifikanzniveau. Wird Normalverteilung angenommen, so kann mit Hilfe des Erwartungswertes und der Varianz die zugehörige Z-Statistik berechnet werden (ALDSTADT 2010, S. 291). Zu berücksichtigen ist jedoch, dass die Ergebnisse für die einzelnen lokalen Statistiken korreliert sind, da jede räumliche Einheit – abhängig von der Nachbarschaftsdefinition – mehrfach in die Analyse eingeht. Somit wird die Signifikanz der Werte oft überbewertet. GETIS und ORD (1995) schlagen deshalb vor, eine Bonferroni-Korrektur anzuwenden, durch die das Signifikanzniveau erhöht wird:  $\alpha^* = \frac{\alpha}{k}$ , wobei  $\alpha$  die Irrtumswahrscheinlichkeit darstellt und  $k$  die Anzahl der Paarvergleiche (ORD und GETIS 1995, S. 297). Eine modifizierte Form setzt  $\alpha = n$ , wobei  $n$  der Anzahl der räumlichen Einheiten entspricht.

Die LISA-Statistik kann nicht zwischen Clustern von hohen (sog. Hot Spots) und niedrigen Werten (sog. Cold Spots) unterscheiden. ANSELIN (1995) entwickelte zu diesem Zweck den Moran Scatterplot, in dem die Werte der einzelnen Raumeinheiten gegenüber ihrem „spatial lag“ graphisch dargestellt werden können. So werden die  $x_i$ -Werte auf der horizontalen Achse gegen den „spatial lag“ auf der vertikalen Achse angetragen, wobei das Achsenkreuz den jeweiligen Durchschnittswerten entspricht. Der „spatial lag“ ist gegeben durch Gleichung 6.5 und stellt den räumlich gewichteten Durchschnittswert der benachbarten Regionen dar.

$$lag_i = \frac{\sum_{j=1}^n W_{ij} x_j}{\sum_{j=1}^n W_{ij}} \quad (6.5)$$

Die Wertepaare  $(x_i, lag_i)$ , die weiter als zwei Standardabweichungen vom Ursprung entfernt liegen, werden als Ausreißer bezeichnet. Werte, die in den zweiten Quadranten (HH) fallen, stellen Cluster von hohen Werten dar, Werte, die in den vierten Quadranten (LL) fallen, sind Cluster von niedrigen Werten. Die Regressionsgerade durch den Moran Scatterplot entspricht dem Global Moran's I. Der Moran Scatterplot zeigt somit auf, ob Werte positive oder negative Abweichungen vom Mittelwert darstellen und inwiefern diese Werte den globalen Koeffizienten beeinflussen (ANSELIN 1995, S. 105; ALDSTADT 2010, S. 290f.).

Eine weitere Möglichkeit, lokale räumliche Autokorrelation zu untersuchen, bietet die von GETIS und ORD (1992) entwickelte Statistik (GETIS und ORD 1992). Im Gegensatz zur LISA-Statistik lässt sich aus den Getis-Ord- $G_i$ - und  $G_i^*$ -Koeffizienten direkt ablesen, ob es sich um Cluster hoher Werte (Hot Spots) oder Cluster niedriger Werte (Cold Spots) handelt. Die  $G_i^*$ -Statistik wird in Gleichung 6.6 dargestellt.

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} x_j}{\sum_{j=1}^n x_j} \quad (6.6)$$

$G_i^*$  eignet sich besser zur Analyse von Clustern als  $G_i$ , da in die Berechnung auch der  $x$ -Wert am Ort  $i$  eingeht, im Gegensatz zu  $G_i$ , wo  $i \neq j$  gilt. Die  $G_i^*$ -Statistik vergleicht also den Zusammenhang von  $x_i$  und den gewichteten Nachbarwerten  $x_j$  mit dem globalen Durchschnitt. Die Signifikanz wird auch hier mit der Z-Statistik überprüft, wobei  $E(G_i^*)$  der Erwartungswert und  $VarG_i^*$  die Varianz ist (siehe Gleichung 6.7) (GETIS und ORD 2010, S. 131).

$$Z(G_i^*) = \frac{G_i^* - E(G_i^*)}{\sqrt{VarG_i^*}} \quad (6.7)$$

Die Nullhypothese der räumlichen Zufallsverteilung kann verworfen werden, wenn der Z-Wert das gewählte Signifikanzniveau übersteigt. Positive signifikante Z-Werte kennzeichnen Hot Spots, negative Cold Spots. Liegt der Statistik eine schiefe Verteilung der zu untersuchenden Wertereihe zugrunde, kann nur bei einer hohen Anzahl von Nachbarn  $j$  von einer Normalverteilung der  $G_i^*$ -Statistik ausgegangen werden (konservative Annahme:  $j \geq 30$ , bzw. bei kleiner Anzahl an räumlichen Einheiten  $n$ , ist auch  $j \geq 8$  ausreichend) (GETIS und ORD 1996, S. 264f.).

ANSELIN (1995) betont, dass das Vorhandensein globaler Autokorrelation Auswirkungen auf das Ergebnis der lokalen G-Statistik hat. Die Z-Statistik wird unter der Annahme berechnet, dass jeder Wert an jedem Ort die gleiche Auftretswahrscheinlichkeit hat. Liegt globale räumliche Autokorrelation vor, beeinflusst dies jedoch Erwartungswert und Varianz der Statistik. Eine Ausweichmöglichkeit, die Signifikanz der Cluster zu überprüfen, bietet in diesem Fall die Generierung einer Zufallsverteilung mittels Monte-Carlo-Simulation (ANSELIN 1995, S. 107ff.; ORD und GETIS 2001).

### 6.3.1.3 Anwendungsbereiche

Die Überprüfung räumlicher Daten auf globale Autokorrelation wird meist im Vorfeld der Analyse der lokalen Autokorrelation bzw. der Clusteranalyse durchgeführt. Im Folgenden werden Forschungsgebiete vorgestellt, in denen die Analyse der räumlichen Autokorrelation zur Identifikation von räumlichen Mustern von Interesse ist. In diesen Studien wird jeweils zuerst überprüft, ob eine globale Autokorrelation in der gesamten Untersuchungsregion vorliegt. Ist dies der Fall, wird im nächsten Schritt die Größe, Art und räumliche Lage der einzelnen Cluster analysiert. Angelehnt an die Methodik dieser Studien wird in Kapitel 6.3.2.1 die Vorgehensweise zur Untersuchung der räumlichen Autokorrelation von PV-Anlagen in BW beschrieben.

Die Analyse der räumlichen Autokorrelation findet vor allem in der Epidemiologie breite Anwendung, da sie ermöglicht, räumliche Muster von Krankheiten aufzudecken. Somit können Gebiete mit hohem Krankheitsrisiko identifiziert und bei einer raum-zeitlichen Betrachtung der Cluster auch der Prozess der Ausbreitung von Krankheiten untersucht werden. CHAIKAEW et al. (2009) untersuchen, in welchen Regionen im Norden von Thailand Cluster von Diarrhö auftreten und NAKHAPAKORN (2006) analysiert die raum-zeitliche Ausbreitung von Dengue-Fieber ebenfalls für Nord-Thailand (NAKHAPAKORN und JIRAKAJHONKOOL 2006; CHAIKAEW et al. 2009). OSEI (2008) zeigt mit Hilfe räumlicher Autokorrelationsanalysen Regionen auf, in denen hohes Cholera-Risiko besteht, YESHIWONDIM et al. (2009) beschreiben die Ausbreitung von Malaria in Äthiopien und ROSENBERG et al. (1999) die räumliche Autokorrelation von Krebsfällen in Westeuropa (OSEI und DUKER 2008; YESHIWONDIM et al. 2009).

Neben natürlichen Clusterprozessen, wie die Ausbreitung von Krankheiten, bei denen räumliche Nähe die Ansteckung begünstigt, treten auch bestimmte soziale Phänomene geclustert auf. POULIOU et al. (2009) zeigen, dass statistisch signifikante Unterschiede von Übergewicht und Fettleibigkeit zwischen Regionen in Kanada auftreten, und HANSON (2002) weist nach, dass die Sterblichkeitsraten aufgrund von Alkohol ebenfalls räumlich geclustert sind (HANSON und WIECZOREK 2002; POULIOU und ELLIOTT 2009). MALCZEWSKI (2010) untersucht hingegen die räumliche Autokorrelation der Lebenserwartung in Polen, um über die räumlichen Muster Hinweise auf die dahinterliegenden sozioökonomischen Prozesse zu bekommen (MALCZEWSKI 2010). TAN und HAINING (2009) versuchen unter anderem durch räumliche Autokorrelationsanalysen den Zusammenhang zwischen Verbrechensraten und der Gesundheitsstatistik aufzudecken (TAN und HAINING 2009).

Auch in der Wahlforschung kommen Clusteranalysen zum Einsatz, um herauszufinden, wie sich die Affinität zu einzelnen Parteien über die Jahre räumlich verschiebt (KIM et al. 2003; MÉSZÁROS et al. 2007). Ein weiteres Forschungsfeld stellt die Ökologie dar, in der die Analyse räumlicher Autokorrelationen eine wichtige Rolle zum Verständnis von Landnutzungsänderungen spielt (OVERMARS et al. 2003). Durch das Aufdecken von räumlichen Mustern von Ertragsunterschieden in der Landwirtschaft oder von Unterschieden im Pflanzenwachstum in der Forstwirtschaft, lassen sich auch Rückschlüsse auf dahinterliegende Einflussfaktoren ziehen, wie bspw. Wetterbedingungen oder die Bodengüte (PING et al. 2004; WULDER et al. 2007).

Bisher existieren jedoch weder Studien zu Clusteranalysen von PV-Anlagen noch zu EE-Technologien.

## 6.3.2 Hot Spots und Cold Spots von PV-Anlagen in Baden-Württemberg

In diesem Abschnitt wird anhand des Datensatzes der PV-Anlagen von 2009 untersucht, ob und wo signifikante PV-Cluster in BW auftreten und ob es sich hierbei um Cluster von Gemeinden mit einer über- oder unterdurchschnittlichen Anzahl an PV-Anlagen handelt (Hot Spot vs. Cold Spot). In Abschnitt 6.3.2.1 wird die eigene Vorgehensweise zur Analyse der globalen und lokalen Autokorrelation der PV-Anlagen beschrieben. Darauf folgt die Darstellung der Ergebnisse in Abschnitt 6.3.2.2 und eine Schlussfolgerung für die weiteren Analysen zur Untersuchung der Ursachen der Clusterbildung (6.3.3).

### 6.3.2.1 Analyse der räumlichen Autokorrelation von PV-Anlagen auf Gemeindeebene

Aus der Choroplethenkarte der PV-Anlagen pro Einwohner wurde bereits deutlich, dass räumliche Unterschiede in der Verteilung der PV-Anlagen bestehen (s. Karte 2, Abschnitt 6.2). Nun wird mit Hilfe der oben dargestellten Analysen der räumlichen Autokorrelation untersucht, ob die Verbreitung dieser EE-Technologie auch statistisch signifikante räumliche Muster aufweist. Im ersten Schritt wird die Vorgehensweise der globalen Autokorrelationsanalyse dargestellt, in der untersucht wird, ob eine räumliche Autokorrelation von PV-Anlagen in der gesamten Untersuchungsregion d.h. in ganz BW auf Gemeinde-Ebene vorliegt. Darauf folgt die Erläuterung der Vorgehensweise der lokalen Clusteranalyse (vgl. Abb. 17). Die Analysen wurden in ArcGIS sowie mit GeoDa durchgeführt (ESRI® ArcMap TM 9.3.1 2010; OpenGeoDa 1.0.1 2011).

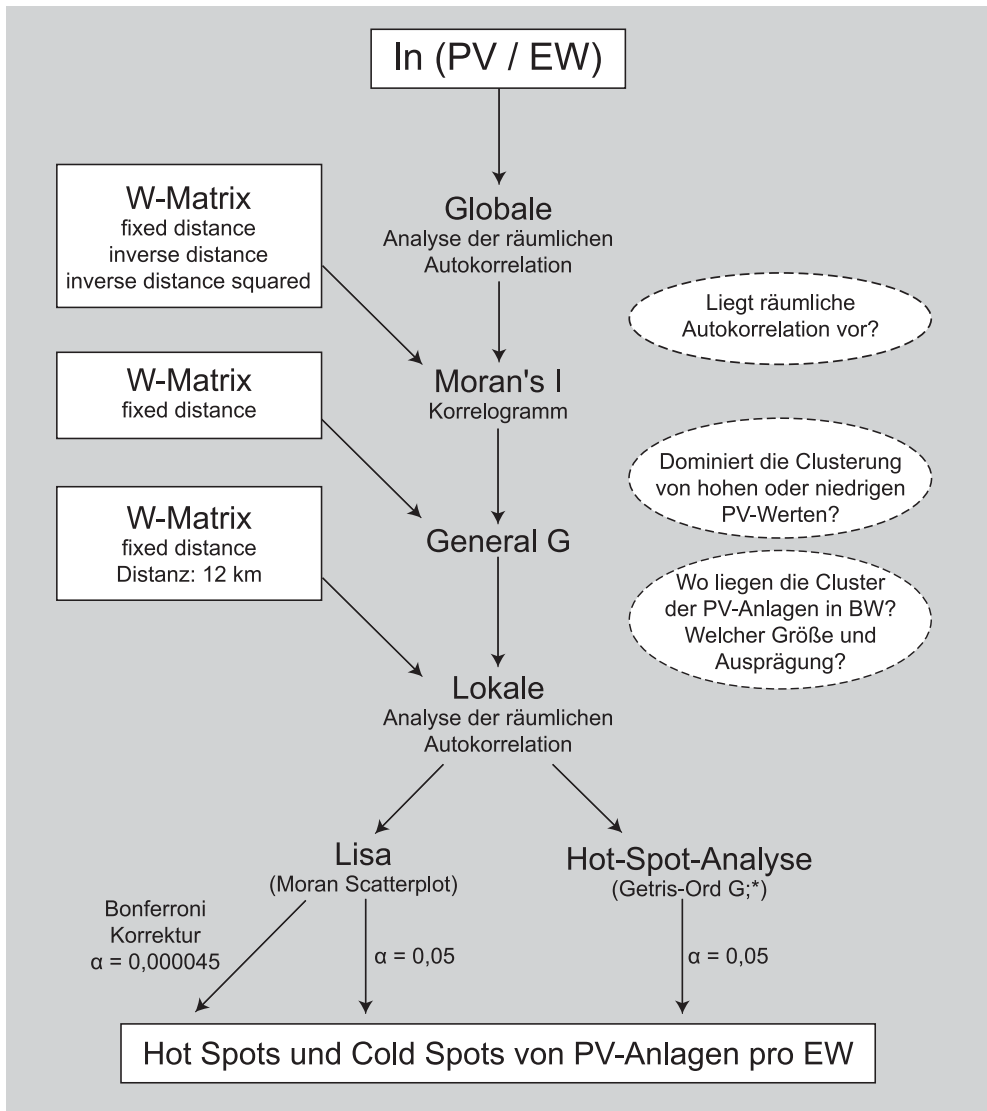
#### Globale räumliche Autokorrelation

Aufgrund der rechtsschiefen Verteilung der PV-Anlagen pro Einwohner wurden die Daten mit Hilfe des natürlichen Logarithmus transformiert, so dass sie nun einer Normalverteilung entsprechen. Die Normalverteilung ist bei der Berechnung der Korrelationskoeffizienten von Vorteil, da somit eine Über- bzw. Unterschätzung der räumlichen Autokorrelation verhindert wird (FORTIN und DALE 2007, S. 125). Zur Bestimmung der Nachbarschaften und zur Berechnung der W-Matrix wurden die Koordinaten der Zentroide der Gemeinden verwendet. Der Abstand zwischen den Punkten entspricht der euklidischen Distanz. Um den Einfluss verschiedener Formen der W-Matrix auf das Ergebnis der räumlichen Autokorrelation zu untersuchen, wurde die W-Matrix für drei verschiedene Distanzmaße berechnet (ESRI® ArcMap TM 9.3.1).

- „fixed distance band“: alle Zentroide im Radius einer vorgegebenen Distanz gelten als benachbart
- „inverse distance“:  $w_{ij} = 1/d_{ij}$  d.h. der Einfluss der Nachbarn nimmt mit zunehmender Entfernung ab, wobei  $d_{ij}$  die Distanz zwischen den Zentroiden darstellt
- „inverse distance squared“:  $w_{ij} = 1/d_{ij}^2$  d.h. der Einfluss der benachbarten Zentroide nimmt mit dem Quadrat der Distanz ab



Abb. 17: Ablauf der Analyse der räumlichen Autokorrelation



Quelle: Eigene Darstellung

Die W-Matrizen wurden in 10 km-Intervallen jeweils für Distanzen bis 150 km erzeugt (12, 20, 30, 40,..., 150 km), um herausfinden zu können, bei welcher Distanz die höchste Autokorrelation auftritt. Die kürzeste gewählte Distanz entspricht einem Radius von 12 km. Innerhalb dieser Distanz hat jede Gemeinde mindestens einen Nachbarn. Gemeinden, die außerhalb dieses Radius liegen, gelten als nicht benachbart, d.h.  $w_{ij}=0$ . Nach der Umfrage zur Mobilität in Deutschland sind über 50%

der täglichen Wege nicht länger als 20 km. Die Distanz von 12 km entspricht dem durchschnittlichen täglichen Mobilitätsradius (VOLLMER et al. 2004). Es wird davon ausgegangen, dass innerhalb dieser Entfernung PV-Anlagen täglich wahrgenommen werden und die Adoptionsentscheidung beeinflussen können.

Schließlich wurde Global Moran's I mit allen W-Matrizen berechnet und die Ergebnisse in Form eines Korrelogramms dargestellt (vgl. Abb. 18). Dies ermöglicht einen Vergleich der Höhe der räumlichen Autokorrelation in Abhängigkeit der gewählten Distanzmaße und Distanzen (vgl. ROSENBERG et al. 1999, S. 17; PING et al. 2004, S. 231). Um herauszufinden, ob die Clusterung von hohen oder niedrigen Werten von PV-Anlagen/EW in den Gemeinden BWs überwiegt, wurde im Anschluss Getis und Ord's General G bestimmt (vgl. MALCZEWSKI 2010, S. 83ff.). Als Distanzmaß diente ausschließlich das „fixed distance band“, da dieses Maß für Polygone unterschiedlicher Größe die stabilsten Ergebnisse liefert (MITCHELL 2005, S. 135ff.). Die Signifikanz wurde in beiden Fällen mit der Z-Statistik überprüft, da eine Normalverteilung der Daten vorliegt.

Aus den Korrelogrammen kann abgelesen werden, bei welcher Distanz die höchste räumliche Autokorrelation vorliegt und somit die stärksten Nachbarschaftsverbindungen bestehen. Die ermittelte Distanz wird im Folgenden der Analyse der lokalen räumlichen Autokorrelation zugrunde gelegt.

### Lokale räumliche Autokorrelation

Nachdem im vorigen Abschnitt die Überprüfung auf globale Autokorrelation der PV-Anlagen pro EW erfolgte, stellt sich die Frage, wo sich Cluster von hohen und niedrigen Werten befinden. Angelehnt an die bereits aufgeführten Studien in Abschnitt 6.3.1.3, wird nun die lokale räumliche Autokorrelation überprüft.

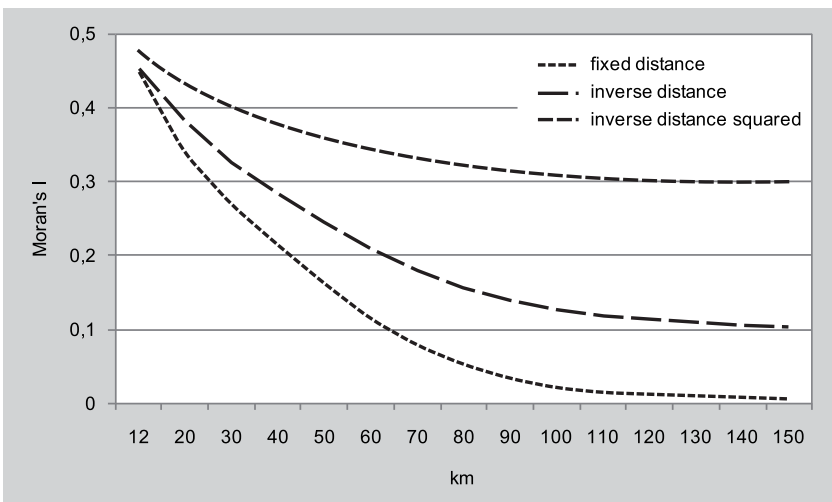
Da die stärkste Clusterung bei der kürzesten Distanz von 12 km auftritt, wurde die lokale Clusteranalyse auch für die Distanz von 12 km und der W-Matrix, basierend auf der „fixed distance band“-Methode, durchgeführt. Die Signifikanz des Local Moran's I wurde durch eine Monte-Carlo-Simulation mit 999 Permutationsläufen überprüft ( $\alpha = 0,001$ ). Der Moran Scatterplot zeigt an, welche Gemeinden sich in Clustern von HH- und LL-Werten befinden. Zudem wurde die Hot Spots-Analyse nach Getis und Ord  $G_i^*$  durchgeführt. Mit Hilfe der Z-Statistik können Hot und Cold Spots von PV-Anlagen pro EW in BW identifiziert werden. Zum Vergleich der Ergebnisse wurden die LISA-Statistik und die Hot Spot-Analyse auf dem Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,05$  berechnet. Um die ausgeprägtesten Cluster zu identifizieren, wurde die LISA-Statistik daraufhin noch einmal für ein erhöhtes Signifikanzniveau basierend auf der Bonferroni-Korrektur ausgewiesen, d.h.  $\alpha^* = \frac{\alpha}{n} = \frac{0,05}{1104}$ . Demnach gelten nur noch Gemeinden als signifikant geclustert, für die  $\alpha^* \leq |0,000045|$  gilt. Die Cluster-Karten (vgl. Karte 5 und Karte 6) ermöglichen eine visuelle Interpretation der Ergebnisse.

#### 6.3.2.2 Ergebnisse der Clusteranalyse

Die Verteilung der PV-Anlagen/EW weist deutliche räumliche Unterschiede zwischen den Gemeinden in BW auf (vgl. Karte 2 Abschnitt 6.2). Mit Hilfe der räumlichen Autokorrelationsanalyse wurde untersucht, ob Gemeinden mit ähnlich hoher Anzahl an Anlagen pro EW in Nachbarschaft zueinander liegen und ob diese Clusterung

statistisch signifikant ist. Das Korrelogramm in Abb. 18 zeigt das Ergebnis der globalen räumlichen Autokorrelationsanalyse. Die Veränderung der Global Moran's I ist über die Distanz für die drei unterschiedlichen W-Matrizen aufgetragen. Alle Moran's I-Werte sind mit  $\alpha = 0,00000$  hoch signifikant. Die höchste räumliche Autokorrelation liegt bei der kürzesten Distanz von 12 km vor (Moran's I = 0,45). Die Moran's I-Werte nehmen mit der Distanz kontinuierlich ab, d.h. je näher die Gemeinden zueinander liegen, desto ähnlicher ist die Anzahl an PV-Anlagen pro EW in den Gemeinden. Auch FORTIN und DALE (2007) und PING et al. (2003) bestätigen, dass die stärksten Interaktionen meist innerhalb der ersten Distanzintervalle auftreten (PING et al. 2004, S. 228; FORTIN und DALE 2007, S. 127). Ab ca. 100 km liegen die Moran's I-Werte bei Verwendung der „fixed distance band“-W-Matrix nahe bei Null, d.h. ab dieser Distanz liegt keine räumliche Autokorrelation mehr vor. Bei den zwei W-Matrizen, die auf inversen Distanzmaßen beruhen, nimmt die Autokorrelation langsamer ab. Anders als beim Distanzmaß „fixed distance band“ werden hier immer die nächsten Gemeinden stärker gewichtet, so dass die bei Erweiterung des Radius hinzukommenden Gemeinden einen nur geringen Einfluss auf das Ergebnis ausüben.

Abb. 18: Korrelogramm des Moran's I (PV-Anlagen/EW) – Vergleich verschiedener Distanzmaße



Quelle: Eigene Berechnung

Die Überprüfung auf Art der Clusterung mit Hilfe der General-G-Statistik ergab für alle Distanzen positive  $Z(G)$ -Werte (mit  $\alpha = 0,00000$ ), d.h. die Clusterung von Gemeinden mit hoher Anzahl an PV-Anlagen pro Einwohner überwiegt in BW.

In Abb. 19 ist der Moran Scatterplot dargestellt. Es zeigt sich, dass sowohl HH- als auch LL-Cluster auftreten. Unter Annahme eines Signifikanzniveaus von  $\alpha = 0,05$  gelten Gemeinden als signifikant geclustert, wenn  $Z(ii)$  bzw.  $Z(Gi^*) > 1,96$  oder  $Z(ii)$  bzw.  $Z(Gi^*) < -1,96$ . In Karte 5 sind die Cluster in Baden-Württemberg verortet, wobei

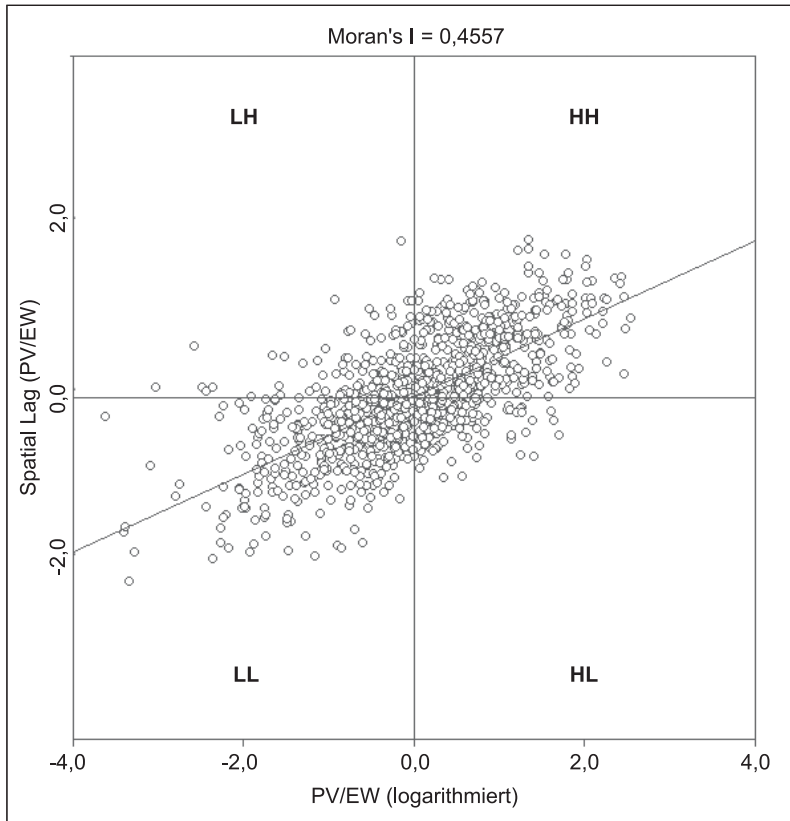
die Ergebnisse der LISA-Statistik und der Hot Spot-Analyse gegenüber gestellt sind. Gemeinden mit überdurchschnittlicher Anzahl an PV/EW d.h. HH- oder Hot Spot-Gemeinden sind in Rot dargestellt. Gemeinden mit unterdurchschnittlicher Anzahl an PV/EW d.h. LL- oder Cold Spot-Gemeinden sind in Blau markiert. Ein Vergleich der Ergebnisse der zwei Methoden ermöglicht eine eindeutigere Identifizierung der Cluster. Die Ergebnisse können dann als stabil bewertet werden, wenn sich Gemeinden in beiden Statistiken in Hot bzw. Cold Spots befinden (MALCZEWSKI 2010, S. 83).

In beiden Karten zeichnet sich ab, dass Cold Spots v.a. in städtischen Regionen, wie im Großraum Stuttgart, Mannheim und Heidelberg, sowie in Karlsruhe, Offenburg und Lörrach bestehen. Ein Vergleich mit der Zuordnung der Gemeinden nach Raumkategorien bestätigt (vgl. Abschnitt 6.2), dass 85 % der LL-Gemeinden in der Raumkategorie „Verdichtungsraum“ liegen und 9 % in der „Randzone um Verdichtungsräume“. Hot Spots liegen dagegen fast ausschließlich in den ländlicheren Regionen im Osten des Landes. Auch hier bestätigt der Vergleich mit den Raumkategorien den ländlichen Charakter der Hot Spot Regionen: Die HH-Gemeinden gehören zu 95 % der Raumkategorie „ländlicher Raum im engeren Sinne“ an.

Im Vergleich zur Hot Spot-Analyse bildet die LISA-Statistik räumlich klarer definierte Cluster aus. So bilden Hot Spots bei der Getis-Ord  $G_i^*$ -Statistik große zusammenhängende Einheiten, die fast den gesamten Osten des Landes bedecken; die Cluster der LISA-Statistik sind dagegen deutlich kleiner. Da das Ergebnis der globalen räumlichen Autokorrelation das Ergebnis der Hot Spot-Analyse verzerren kann (vgl. Abschnitt 6.3.1.2), werden für die detailliertere Darstellung der Clustergemeinden die Ergebnisse der LISA-Statistik (Signifikanztest über Monte-Carlo-Simulation) verwendet. Nach Durchführung der Bonferroni-Korrektur sind nur mehr Gemeinden signifikant geclustert, für die  $\alpha^* \leq |0,000045|$  gilt.

Karte 6 zeigt die Cluster von Gemeinden, die unter der Bonferroni-Korrektur noch signifikant sind, wobei nur mehr fünf Hot Spot-Regionen sichtbar werden. Dies sind Gemeinden im Alb-Donau-Kreis nördlich von Ulm, ein Cluster von Gemeinden in Biberach an der Grenze zu Bayern, eines im Westen von Ravensburg und ein weiteres Cluster, das sich zwischen den Landkreisen Reutlingen, Biberach und Alb-Donau-Kreis befindet. Im Nordosten Baden-Württembergs sticht ein Cluster im Landkreis Schwäbisch-Hall hervor. Ein Vergleich der Einwohnerzahlen dieser Cluster macht deutlich, dass ca. ein Drittel der Hot Spot-Gemeinden weniger als 1000 EW hat und in keiner mehr als 6000 Personen wohnen. Das Gegenteil gilt für Cold Spot-Gemeinden. Der größte Cold Spot umfasst die Stadt Stuttgart und Teile der angrenzenden Landkreise Böblingen, Ludwigsburg, Rems-Murr-Kreis und Esslingen. Hier weist die kleinste Gemeinde knapp 5000 EW auf. Den zweiten großen Cold Spot bilden die Städte Mannheim und Heidelberg mit angrenzenden Gemeinden des Rhein-Neckar-Kreises. Auch die Städte Karlsruhe, Reutlingen und Lörrach weisen signifikante LL-Werte auf (s. Anhang 2, Tab. 12 und Tab. 13).

Abb. 19: Moran Scatterplot der PV-Anlagen/EW (Distanzmaß: „fixed distance“, Distanz: 12 km)



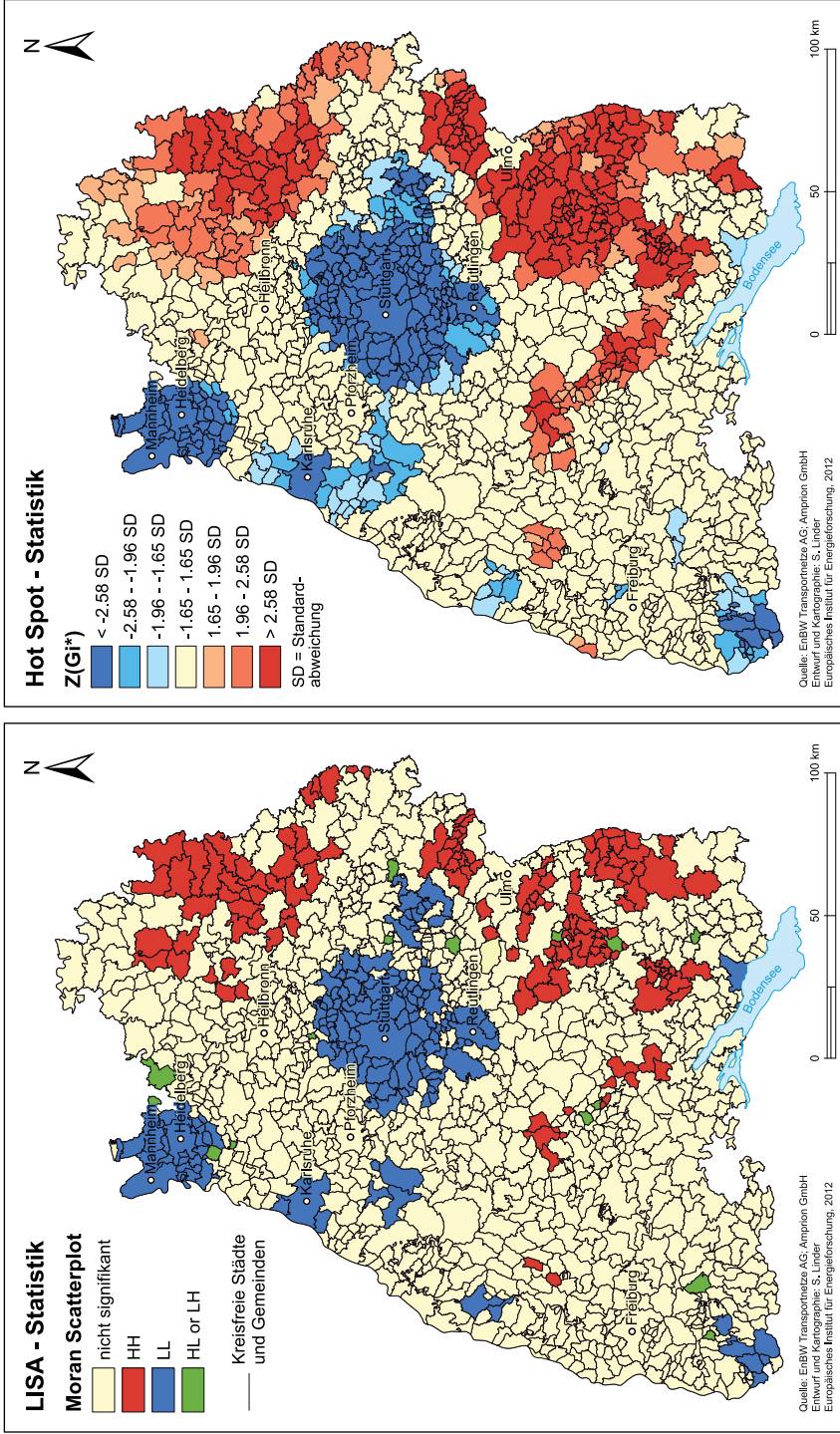
Quelle: Eigene Berechnung

### 6.3.3 Fazit der Clusteranalyse

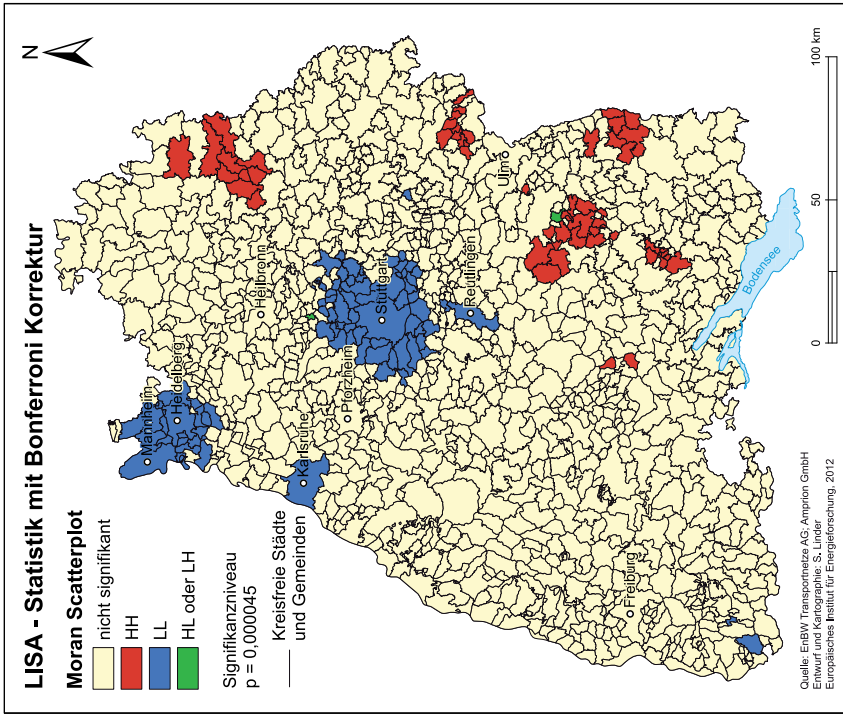
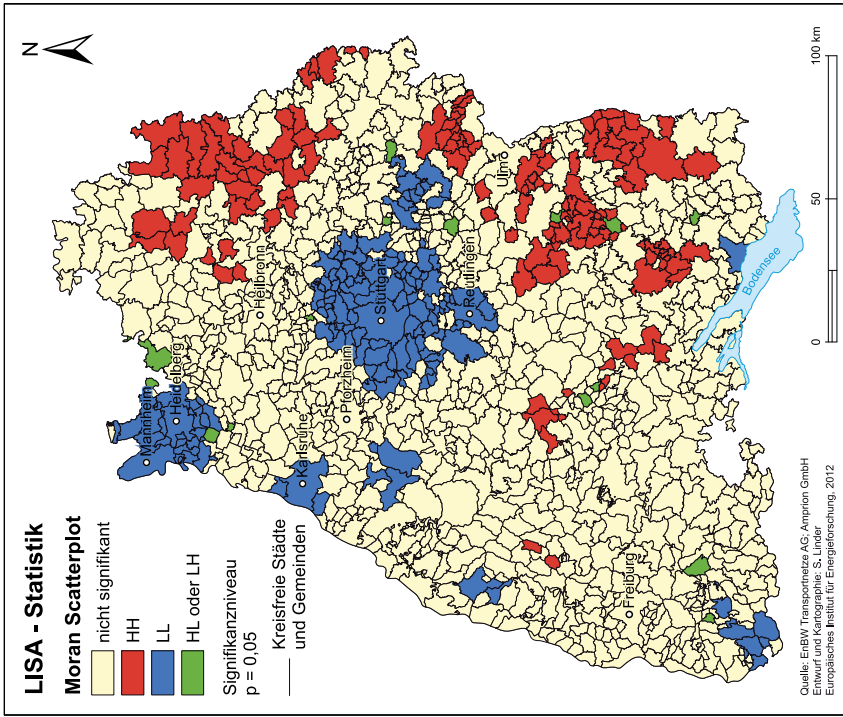
Mit Hilfe der LISA- und Hot Spot-Analyse konnten signifikante Cluster von Gemeinden mit hoher und niedriger Anzahl an PV-Anlagen pro EW identifiziert werden. Hot Spot-Gemeinden gehören v.a. den ländlichen Raumkategorien an (95 % liegen in RK 40), Cold Spot-Gemeinden v.a. den städtischen Raumkategorien (85 % liegen in RK 10).

Durch das Aufdecken von Clustern können jedoch keine eindeutigen Rückschlüsse auf die Ursachen für deren Vorkommen gezogen werden. So kann eine Clustering erfolgen, weil Nachbarschaftsbeziehungen zwischen den einzelnen Gemeinden bzw. den Bewohnern der Gemeinden bestehen. Somit würde das Vorhandensein von PV-Anlagen in einer Gemeinde die Anschaffung von PV-Anlagen in den Nachbargemeinden begünstigen (endogene Ursache). Möglich ist aber auch, dass exogene Faktoren,

Karte 5: PV-Cluster in den Gemeinden BWs 2009 – Vergleich der LISA-Statistik und der Hot Spot-Analyse (Distanzmaß: „fixed distance“, Distanz: 12 km). HH- bzw. Hot Spot-Gemeinden in ROT, LL- bzw. Cold Spot-Gemeinden in BLAU



Karte 6: Vergleich der LISA-Statistik mit und ohne Bonferroni-Korrektur



die ähnliche räumliche Strukturen aufweisen, zur Clusterung von PV-Anlagen führen (OVERMARS et al. 2003, S. 260; FORTIN und DALE 2007, S. 124). Ein Vergleich mit den Raumkategorien lässt erste Vermutungen zu, dass das Vorhandensein von PV-Anlagen mit der Größe der Gemeinde und damit womöglich auch mit der Siedlungs- und Gebäudestruktur zusammenhängt. Um herauszufinden, ob und in welchem Ausmaß exogene Faktoren die Clusterprozesse beeinflussen, wird im nächsten Schritt eine Regressionsanalyse durchgeführt.

## **6.4 Ursachen für die räumlichen Unterschiede in der PV-Nutzung auf Gemeinde-Ebene**

Die Clusterung von PV-Anlagen kann einerseits auf Einflussfaktoren zurückzuführen sein, die selbst im Raum geclustert auftreten und andererseits auch in einem räumlichen Nachbarschaftseffekt begründet liegen. Ziel dieses Abschnitts ist es, ein Regressionsmodell aufzustellen, das die Unterschiede in der PV-Nutzung in den Gemeinden erklärt.

Im ersten Teil dieses Abschnitts werden die methodischen Grundlagen der räumlichen Regressionsanalyse erläutert (6.4.1). Im zweiten Teil wird die Bedeutung sozio-ökonomischer Einflussfaktoren und der Nachbarschaft als Ergebnisse der räumlichen Regressionsmodellierung vorgestellt und diskutiert (6.4.2).

### **6.4.1 Räumliche Regressionsanalyse**

Räumliche Muster sind häufig das Ergebnis sozialer Prozesse, die nicht allein durch die Eigenschaften einzelner Individuen erklärt werden können, sondern vielmehr durch die Interaktionen von Individuen im Raum. So beschreiben WARD und GLEDITSCH (2008): „In many cases, the outcome or incentives for actions of individual actors do not depend solely on the attributes of particular individuals but on the structure of the system, their position within it, and their interactions with other individuals“ (WARD und GLEDITSCH 2008, S. 1). Die Ergebnisse der Interaktionen werden häufig im Raum sichtbar, d.h. es kommt zur räumlichen Clusterung sozialer Phänomene. Die räumliche Regressionsanalyse ermöglicht nun, den räumlichen Einfluss als eigenen erklärenden Faktor in das Modell aufzunehmen.

Liegt räumliche Autokorrelation der Daten vor, wie am Beispiel der PV-Anlagen in BW in Abschnitt 6.3.2 gezeigt wurde, so ist die Verwendung der räumlichen Regression auch aus methodischen Gesichtspunkten sinnvoll: Der Einfluss räumlicher Abhängigkeiten in einem Modell sollte kontrolliert werden, um Modellverstöße und damit fehlerhafte Schätzungen der Parameter zu vermeiden.

In diesem Abschnitt wird zunächst der Umgang mit räumlichen Abhängigkeiten in der Regressionsanalyse vorgestellt (6.4.1.1), mit einigen Anwendungsbeispielen



veranschaulicht (6.4.1.2) und daraufhin das *Spatial Lag Model* erläutert (6.4.1.3), das für die Regressionsanalyse der PV-Daten in Abschnitt 6.4.2 eingesetzt wird.

#### 6.4.1.1 Räumliche Abhängigkeiten als inhärente Struktur

Räumliche Abhängigkeiten („spatial dependence“) stellen funktionale Beziehungen zwischen zwei räumlichen Einheiten dar. Das bedeutet, was an einem Ort geschieht, hat Einfluss auf die Ausprägung dieses Phänomens an einem nahegelegenen Ort. Nach ANSELIN (1988) werden räumliche Abhängigkeiten im Forschungsbereich der räumlichen Statistik („spatial statistic“) meist als Störgröße behandelt, die es zu kontrollieren gilt (CLIFF und ORD 1973; ANSELIN 1988, S. 10ff.). So können räumliche Abhängigkeiten auf Messfehlern beruhen oder häufig auf die Form der Datenaggregation zurückgeführt werden. Die räumliche Ökonometrie („spatial econometrics“) tendiert dagegen eher zu einem theoriegeleiteten Verständnis der räumlichen Abhängigkeiten, in der die Clusterung als inhärente Struktur eines sozialen Phänomens wahrgenommen wird: Die Interaktion von Individuen im Raum führt zu einem „emergent collective behavior“, einem kollektiven Verhalten, das sich in räumlichen Mustern äußert (ANSELIN 2002, S. 248). Als Beispiele nennt ANSELIN (2002) die Ausbildung von gemeinsamen sozialen Normen, sozialem Kapital oder auch eines Nachbarschaftseffekts.

ANSELIN (1988) schlägt zwei Möglichkeiten vor, räumliche Effekte in die Regressionsanalyse zu integrieren: das *Spatial Lag Model* und das *Spatial Error Model*. Das *Spatial Lag Model* wird in der Regel angewandt, wenn davon ausgegangen wird, dass Feedback-Reaktionen zwischen den räumlichen Einheiten bestehen oder Diffusionsprozesse auftreten. Das bedeutet, dass der Wert der Variable  $y$  in einem Ort  $i$  direkt beeinflusst wird von der Höhe der Variable  $y$  im benachbarten Ort  $j$ . Dies ist z.B. bei der Ausbreitung von ansteckenden Krankheiten der Fall: die Anzahl der Krankheitsfälle ist abhängig von der Anzahl der Krankheitsfälle in der Nachbarschaft.

Beim *Spatial Error Model* besteht dagegen die Annahme, dass keine direkte Interaktion zwischen den benachbarten Einheiten besteht. Räumliche Autokorrelation tritt aufgrund eines räumlich geclusterten Merkmals auf, das die Variable  $y$  beeinflusst, jedoch nicht im Modell berücksichtigt wurde. Die räumliche Abhängigkeit wird somit nur über die Residuen im Modell erfasst. Das *Spatial Error Model* ist bspw. bei der Aufdeckung von Kriminalitätsclustern interessant: die Cluster von Raubüberfällen sind häufig auf schlechte sozioökonomische Verhältnisse in den betrachteten Stadtvierteln zurückzuführen und stehen nicht zwangsläufig mit der Anzahl an Raubüberfällen in benachbarten Gebieten in Verbindung. Das primäre Ziel des *Spatial Error Model* ist somit, die einzelnen Parameter im Modell zu schätzen, indem die räumliche Korrelation der Residuen kontrolliert wird. Anders als beim *Spatial Lag Model* wird die räumliche Abhängigkeit als Störgröße und nicht als eigenständiger erklärender Parameter in das Modell aufgenommen (WARD und GLEDITSCH 2008, S. 69f.).

Die Wahl des Regressionsmodells sollte anhand eines theoretischen Konzepts über die Zusammenhänge im Modell erfolgen. Ist dies nicht möglich, so schlägt ANSELIN (2005) vor, den Lagrange Multiplier-(LM-)Test zu verwenden, der auf einer Chi<sup>2</sup>-Verteilung basiert. Ist der LM-Test sowohl für das *Spatial Lag* als auch für das *Spatial Error Model* signifikant, so wird mit Hilfe des robusten LM-Tests entschieden, welches Modell für die Regressionsanalyse angemessen ist (ANSELIN 2005, S. 197ff.).

### 6.4.1.2 Anwendungsbereiche

Räumliche Regressionsmodelle kommen häufig in der Kriminalitätsforschung zur Anwendung, um das Auftreten räumlicher Kriminalitätscluster zu erklären. Neben sozioökonomischen und demographischen Faktoren spielen auch Nachbarschaftseffekte für die Verbreitung von Verbrechen eine Rolle (MESSNER und ANSELIN 2004; CRACOLICI und UBERTI 2009; TAN und HAINING 2009). Räumliche Regressionsmodelle tragen ebenso zur Erklärung von Immobilienpreisen bei, die nicht nur durch ökonomische Faktoren bestimmt werden, sondern auch räumliche Abhängigkeiten aufweisen (WANG und READY 2005; XIAOFENG und HE 2008). Weitere Beispiele für die Modellierung von Nachbarschaftseffekten mit Hilfe eines *Spatial Lag Models* sind die Analyse der Ursachen für das Auftreten von Clustern von Provinzen mit hoher Arbeitslosigkeit (CRACOLICI et al. 2009) oder die Analyse der Einflussfaktoren auf Wahlergebnisse (KIM et al. 2003). Nachbarschaftseffekte bzw. Diffusionsprozesse wurden auch aufgedeckt bei der Clusterung von Landnutzungstypen (OVERMARS et al. 2003), bei der Übertragung von Krankheiten (SEMAAN et al. 2007) sowie bei der Adoption einer neuen Technologie unter Landwirten in Indonesien (CASE 1992).

Im Folgenden wird untersucht, welche Faktoren die Nutzungsunterschiede der PV-Technologie erklären. Es wird angenommen, dass der Verbreitung von PV-Anlagen ein räumlicher Diffusionsprozess zugrunde liegt. Die räumlichen Abhängigkeiten werden deshalb mit Hilfe eines *Spatial Lag Models* erfasst. Der Nachbarschaftseffekt findet vermutlich auf Individualebene zwischen einzelnen Personen statt, führt aber schließlich auch zur Ausbildung von PV-Clustern auf Gemeindeebene, da Interaktionen zwischen Gemeinden über die Sichtbarkeit von PV-Anlagen bestehen.

### 6.4.1.3 Das *Spatial Lag Model*

Liegt räumliche Autokorrelation der abhängigen Variable vor, so liefert die Regressionschätzung mittels Ordinary Least Square-(OLS)-Verfahren eine verzerrte Schätzung der Regressionsparameter. Im *Spatial Lag Model*, von ANSELIN (1988) auch bezeichnet als „mixed regressive – spatial autoregressive model“, wird die räumliche Abhängigkeit nun explizit im Modell berücksichtigt (ANSELIN 1988, S. 35). Die mathematische Formulierung des *Spatial Lag Model* ist in Gleichung 6.8 dargestellt.

$$y = \rho W y + X \beta + \varepsilon \quad (6.8)$$

$X$  bezeichnet die Matrix aus unabhängigen Variablen,  $\beta$  die zugehörigen Regressionskoeffizienten und  $\varepsilon$  den Fehlerterm (unabhängig und identisch verteilt mit  $\mu = 0$ ,  $\sigma^2$ ). Die Standardform der linearen Regression wird nun ergänzt um die räumliche Gewichtungsmatrix ( $W$ -Matrix) (vgl. Kapitel 6.3.1.1).  $\rho$  ist der *Spatial Lag Parameter*, der die Stärke des räumlichen Zusammenhangs zwischen  $y_i$  und den benachbarten Einheiten  $y_j$  wiedergibt. Ist die  $W$ -Matrix über die Reihen standardisiert, so bezeichnet  $\rho W$  den durchschnittlichen Wert von  $y$  aller als benachbart geltenden Einheiten  $j$  (LESAGE und PACE 2009, S. 8f.). Mit  $\rho=0$  entspricht das Modell der Standardform der linearen Regression. Ist  $\rho$  signifikant von Null verschieden, so liegt

eine räumliche Abhängigkeit der  $y$ -Variable vor, die auf einen Diffusionsprozess hindeuten kann (ANSELIN 1988, S. 12). Es ist jedoch auch möglich, dass die gemessene räumliche Abhängigkeit allein Ergebnis der Form der Datenaggregation ist. Das bedeutet, dass das untersuchte Phänomen nicht auf der räumlichen Ebene stattfindet, auf der es modelliert wird.

Gleichung 6.9 beschreibt die inverse Form des Spatial Lag Modells (ANSELIN und BERA 1998, S. 246)

$$y = (I - \rho W)^{-1} X\beta + (I - \rho W)^{-1} \varepsilon \quad (6.9)$$

wobei  $I$  die  $n$ -dimensionale Identitätsmatrix darstellt. Die zwei inversen Ausdrücke werden auch als „spatial multipliers“ bezeichnet. Die inverse Form zeigt, dass die  $W$ -Matrix auch mit dem Fehlerterm verknüpft ist. Die abhängige Variable  $y_i$  wird damit auch durch die Fehlerterme an allen benachbarten Orten  $j$  bestimmt. Durch die multidirektionale Form der  $W$ -Matrix (im Gegensatz zu Zeitreihenanalysen) ist die OLS-Schätzung verzerrt und liefert inkonsistente Ergebnisse. Aus diesem Grund wird für räumliche Regressionsmodelle meistens das Maximum Likelihood Estimation- (MLE-)Verfahren verwendet (ANSELIN 1988, S. 57ff.; LESAGE und PACE 2004, S. 8).

Zur Interpretation der Güte der Schätzung und zum Vergleich der Ergebnisse der Standard-Regression mit der räumlichen Regression dient der Log Likelihood-Wert: Je höher dieser Wert, desto besser das Modell. Zusätzlich werden häufig das Akaike Info Criterion (AIC) und das Schwarz Criterion (SC) zur Interpretation herangezogen: Je niedriger der AIC- und der SC-Wert, desto besser das Modell (ANSELIN 2005, S. 204ff.).

## 6.4.2 Sozioökonomische Einflussfaktoren und die Bedeutung der Nachbarschaft

In diesem Abschnitt wird untersucht, welche Faktoren die Unterschiede in der PV-Nutzung beeinflussen und ob ein räumlicher Nachbarschaftseffekt vorliegt. Im Abschnitt 6.4.2.1 werden Hypothesen über die Zusammenhänge aufgestellt und die Variablen beschrieben, die in die Analyse eingehen. Der zweite Abschnitt widmet sich den Ergebnissen der Regressionsanalyse (6.4.2.2).

### 6.4.2.1 Modellspezifikation

Im ersten Schritt wird ein Modell aufgestellt, das sich auf die Erkenntnisse des Theorieteils dieser Arbeit stützt. Das Regressionsmodell basiert somit auf Variablen, die die PV-Nutzung beeinflussen und die sich bereits in einigen Studien über die Verbreitung der Solarenergienutzung (PV und Solarthermie) als signifikant herausgestellt haben (vgl. Abschnitt 5.1). Es wird also davon ausgegangen, dass die Unterschiede in der PV-Nutzung auf Gemeinde-Ebene durch exogene Faktoren erklärt werden können.

Die räumliche Autokorrelation der PV-Anlagen macht deutlich, dass räumliche Abhängigkeiten in der PV-Nutzung bestehen. Es wird deshalb angenommen, dass

neben exogenen Faktoren auch die Nachbarschaft zu Gemeinden mit vielen PV-Anlagen pro EW die Nutzungsintensität in einer Gemeinde erhöht. Dieser räumliche Effekt wird mit Hilfe des *Spatial Lags* im zweiten Schritt der Analyse in einem *Spatial Lag Model* abgebildet. Ein signifikanter Einfluss des *Spatial Lags* würde die Bedeutung des Nachbarschaftseffekts auf die PV-Nutzung bestätigen und auf einen räumlichen Diffusionsprozess hindeuten.

Die PV ist eine relativ neue Technologie, deren Nutzung in Form von PV-Dachanlagen bis vor der Einführung des EEG im Jahr 2000 noch als Innovation bezeichnet werden konnte (vgl. Abschnitt 2.2.1). Es wird vermutet, dass durch die finanzielle Förderung des EEG die Technologie nun den Massenmarkt erreicht hat und die Gesamtheit der PV-Anlagenbesitzer im Jahr 2009 nicht mehr im Early-Adopter-Stadium zu verorten ist. Unter Bezugnahme auf die Diffusionstheorie (vgl. Abschnitt 3.1.3.2) wird deshalb im letzten Schritt untersucht, ob Gemeinden mit einer hohen Anzahl an PV-Anlagen auch noch die Eigenschaften der Early Adopter widerspiegeln oder ob diese Eigenschaften heute kein Differenzierungsmerkmal für eine hohe PV-Nutzung darstellen.

Im Folgenden werden die Variablen aufgelistet, die in die Regressionsanalyse zur Erklärung der PV-Nutzungsunterschiede auf Gemeinde-Ebene eingehen.

- **Globalstrahlung (GLOST):**

Je höher die Globalstrahlung ( $\text{kW}/\text{m}^2$ ), desto günstiger sind die Voraussetzungen für die Stromerzeugung und desto höher die Rendite der PV-Anlage. DURHAM et al. (1988) und ZAHRAN et al. (2008) zeigen, dass sich die Globalstrahlung zur Erklärung der Nutzungsunterschiede von Solaranlagen eignet. In einer Studie von ZHANG et al. (2011) hat die Globalstrahlung jedoch keinen signifikanten Einfluss auf die PV-Nutzung in Japan. ROTHFIELD (2010) weist darauf hin, dass die Unterschiede in der Globalstrahlung in Kalifornien, das eine größere Nord-Süd-Ausdehnung hat als Deutschland, so gering sind, dass diese Variable nicht als differenzierender Faktor verwendet werden kann. In BW schwanken die Jahresdurchschnittswerte in der Nord-Süd-Ausdehnung von  $1060 \text{ kW}/\text{m}^2$  bis  $1177 \text{ kW}/\text{m}^2$  (DWD 2011). Zur Überprüfung des Einflusses auf die PV-Nutzung wird die Variable dennoch ins Modell aufgenommen.

- **Anteil an Ein- und Zweifamilienhäusern (EZFH):**

Die besten Voraussetzungen für die Installation von PV-Anlagen haben Haushalte, die in einem EZFH wohnen, da sie über eine ausreichend große Dachfläche zur Installation einer PV-Anlage verfügen. Zudem galt nach EEG 2009 für kleine Dachanlagen bis  $30 \text{ kWp}$  die höchste Vergütungsstufe (vgl. § 33 Abs. 1 EEG 2009). Je höher die Anzahl an EZFH ist, desto höher müsste deshalb auch die Anzahl an PV/EW in einer Gemeinde sein.

- **Neubauten von EZFH pro EW (EZFHO1):**

Da das EEG seit 2000 existiert, besteht die Wahrscheinlichkeit, dass bei EZFH, die ab 2001 gebaut wurden, die Installation einer PV-Anlage beim Bau berücksichtigt wurde (vgl. ZHANG et al. 2011). In Gemeinden, in denen die Anzahl an EZFH-

Neubauten (ab Baujahr 2001) pro EW hoch ist, ist vermutlich auch die Anzahl an PV/EW höher.

- **Anzahl an landwirtschaftlichen Betrieben mit Viehhaltung pro EW (VIEH):**  
Landwirtschaftliche Betriebe – und darunter v.a. Betriebe mit Viehhaltung – eignen sich aufgrund der leicht verfügbaren und großen Dachflächen von Viehställen und Scheunen usw. besonders für die Installation von PV-Anlagen. Zudem stellt die Rendite aus PV-Anlagen aufgrund der geringer werdenden Erlöse aus der Landwirtschaft häufig eine willkommene Einkommensquelle dar. Gemeinden mit einer hohen Anzahl an landwirtschaftlichen Viehhaltungsbetrieben pro EW müssten deshalb auch eine höhere Anzahl an PV/EW aufweisen.
- **Anzahl an Familien pro EW (FAM):**  
Mit dem Familienleben geht eine gewisse Beständigkeit einher. Familien leben meistens länger an einem Ort und sind deshalb bereit, sich auf langfristige Investitionen einzulassen. Es wird daher vermutet, dass in Gemeinden, in denen die Anzahl an Familien pro EW höher ist, auch mehr PV/EW existieren.

In den Studien zur Adoption von Solartechnologien wurde häufig auch der Einfluss finanzieller Anreize wie regionaler Förderprogramme auf die Diffusion der Technologien untersucht (vgl. DURHAM et al. 1988; JAGER 2006; ZHANG et al. 2011). In BW ist die Grundförderung durch das EEG jedoch in allen Gemeinden gleich hoch. Daten über spezielle Förderprogramme von Banken oder Förderinitiativen einzelner Gemeinden existieren nicht, so dass dieser Parameter nicht im Regressionsmodell berücksichtigt wird. ZAHNAN et al. (2008) untersuchte zudem, ob die mangelnde Verfügbarkeit von Solaranbietern sich auf die Nutzung von Solaranlagen auswirkt. Die Variable stellte sich jedoch als nicht signifikant heraus. Auch in diesem Modell wird davon ausgegangen, dass das Vorhandensein von Installateuren von PV-Anlagen kein limitierender Faktor ist, da fast alle Elektroinstallateure PV-Anlagen anbieten und montieren. Andere Studien zeigen, dass das Umweltbewusstsein ein entscheidender Faktor für die Installation ist (SIDIRAS und KOUKIOS 2004; JAGER 2006). In Deutschland war die Adoption von PV-Anlagen in den ersten Jahren bis Anfang der 1990er Jahre häufig ökologisch motiviert. Die Einführung des EEG im Jahr 2000 bewirkte durch die Vergütung des eingespeisten Stroms eine rasante Diffusion der PV-Anlagen. Für die Diffusion spielte ab 2000 also v.a. die finanzielle Förderung eine Rolle; die ökologische Motivation trat dem gegenüber in den Hintergrund (vgl. Abschnitt 2.2.1). Das Umweltbewusstsein wurde deshalb für die Analyse der Daten von 2009 nicht mehr als erklärende Variable in die Regression aufgenommen.

Nach der Diffusionstheorie zeichnen sich Early Adopters u.a. durch ein höheres Einkommen, einen höheren Bildungsstand und Sozialstatus aus (vgl. Abschnitt 3.1.3.2). Unter den sozioökonomischen Eigenschaften eignen sich die Faktoren „Einkommen“ und „Bildung“ zur Aufnahme in das Regressionsmodell, da sie leicht quantifiziert werden können.

- **Einkünfte pro Steuerpflichtige (EINK):**  
Early Adopters verfügen in der Regel über ein höheres Einkommen, wie dies bei LABAY und KINNEAR (1981), SIDIRAS und KOUKIOS (2004), JAGER (2006), KEIRSTEAD (2007) und ROTHFIELD (2010) für Adoptoren von Solaranlagen bestätigt wird. Je höher das Einkommen, desto größer ist der finanzielle Handlungsspielraum für die Anschaffung einer PV-Anlage. Da das finanzielle Risiko besonders in den ersten Jahren der Markteinführung einer neuen Technologie hoch ist, spielt die Höhe des Einkommens für die Early Adopters eine Rolle. Befinden sich die Gemeinden in BW noch im Early-Adopter-Stadium, so sollten Gemeinden mit höheren Einkünften pro Steuerpflichtige auch eine größere Anzahl an PV/EW aufweisen.
- **Anteil an Beschäftigten mit Fachhochschul- oder Universitätsabschluss (BILDG):**  
Ein höheres Bildungsniveau begünstigt nach der Diffusionstheorie die frühzeitige Auseinandersetzung mit neuen Technologien. LABAY und KINNEAR (1981), DURHAM et al. (1988), JAGER (2006), KEIRSTEAD (2007) und CLAUDY et al. (2011) zeigen, dass Adoptoren von Solaranlagen auch über eine bessere formale Bildung verfügen. Je größer der Anteil an Beschäftigten mit Hochschulabschlüssen in einer Gemeinde, desto mehr PV/EW sollten in der Gemeinde vorhanden sein, wenn sich die Gemeinden noch im Early-Adopter-Stadium befinden.

Die Diffusionstheorie besagt auch, dass Early Adopters in der Regel jüngere Personen sind, da sie über eine schnellere Lernfähigkeit verfügen und meist technikaffiner sind. Das Alter ist für die PV-Nutzung jedoch kein charakterisierender Faktor: Jüngere Personen sind zwar innovationsfreudiger, wie dies auch LABAY und KINNEAR (1981) und ROTHFIELD (2010) bei der Adoption von Solaranlagen feststellen, sie verfügen jedoch meist nicht über die nötigen finanziellen Mittel für die Anschaffung einer PV-Anlage. ZAHRAN et al. (2008) schlagen deshalb vor, den Anteil an 40- bis 49-Jährigen, d.h. die zahlungskräftige Altersgruppe, in die Analyse einzubeziehen. Aufgrund der widersprüchlichen Zusammenhänge wird die Variable „Alter“ nicht in die Regressionsanalyse aufgenommen.

Tab. 4 gibt Definition und Quelle der Variablen wieder, sowie deren deskriptive Statistik. Für die Gültigkeit inferenzstatistischer Tests wird die Normalverteilung der Variablen vorausgesetzt (URBAN und MAYERL 2011, S. 138). Der Test auf Normalverteilung der Variablen zeigt zwar, dass nur die Variable PV/EW normalverteilt ist. Alle Histogramme der Variablen weisen jedoch annähernde Glockenkurven auf, bis auf die Variable VIEH mit einer stark rechtsschiefen Verteilung. Durch Transformation mit dem natürlichen Logarithmus konnte eine Normalverteilung der Variable VIEH hergestellt werden. Die Korrelationsmatrix der in die Regression eingehenden Variablen befindet sich im Anhang (vgl. ANHANG 3, Tab. 14).

#### 6.4.2.2 Ergebnisse der Regressionsanalyse

Die Regressionsanalysen wurden mit GeoDa durchgeführt (OpenGeoDa 1.0.1 2011). Zunächst wurde eine Standard-Regression mit Hilfe der Ordinary-Least-Squares (OLS)-Schätzung berechnet (Modell 1) und daran anschließend eine räumliche Regression basierend auf dem MLE-Verfahren (Modell 2 und 3) (Vorgehensweise

Tab. 4: Variablendefinition und deskriptive Statistik

| Variable | Definition   | Mittelwert | Standard-<br>abweichung | Minimum  | Maximum  | Quelle  |
|----------|--|------------|-------------------------|----------|----------|---|
| PV/EW    | Anzahl an PV-Anlagen pro Einwohner (ln)  | -4,09      | 0,65                    | -6,42    | -2,24    | <i>EnBW<br/>Transportnetze AG,<br/>Energy Map,<br/>Statistisches<br/>Landesamt BW</i> |
| GLOST    | Durchschnittliche Globalstrahlung in kW/m <sup>2</sup>   | 1112,18    | 21,95                   | 1059,60  | 1177,54  | <i>Deutscher<br/>Wetterdienst (DWD)</i>   |
| EZFH     | Anteil an Ein- und Zweifamilienhäusern   | 0,89       | 0,07                    | 0,49     | 1,00     | <i>Statistisches<br/>Landesamt BW</i>   |
| EZFH01   | Anteil an Ein- und Zweifamilienhäusern mit Baujahr > 2001                                      | 0,02       | 0,01                    | 0,00     | 0,12     | <i>infas geodaten</i>   |
| VIEH     | Anzahl an landwirtschaftlichen Betrieben mit Viehhaltung pro Einwohner (ln)                    | -5,48      | 1,27                    | -9,64    | -2,47    | <i>Statistisches<br/>Landesamt BW</i>   |
| FAM      | Anzahl an Familien pro Einwohner   | 0,09       | 0,03                    | 0,00     | 0,33     | <i>infas geodaten</i>   |
| EINK     | Einkünfte pro Steuerpflichtigen pro Jahr in EUR  | 31990,38   | 3814,13                 | 19752,00 | 55544,00 | <i>Statistisches<br/>Landesamt BW</i>   |
| BILDG    | Anteil sozialversicherungs-pflichtig Beschäftigter mit Fachhochschul- o. Universitätsabschluss | 0,08       | 0,04                    | 0,00     | 0,29     | <i>Statistisches<br/>Landesamt BW</i>   |

Quelle: Eigene Berechnung

angelehnt an OVERMARS et al. 2003; MESSNER und ANSELIN 2004; WARD und GLEDITSCH 2008; TAN und HAINING 2009).

Modell 1 ist in Gleichung 6.10 dargestellt.

$$\frac{PV}{EW} = \beta_0 + \beta_1 EZFH_i + \beta_2 EZFH01_i + \beta_3 VIEH_i + \beta_4 FAM_i + \varepsilon_i \quad (6.10)$$

Die Variable „Globalstrahlung“ war zunächst in Modell 1 enthalten, stellte sich jedoch als nicht signifikant heraus und wurde deshalb aus dem Modell entfernt (s. ANHANG 3, Tab. 15). Zudem wies die Residuenanalyse im Modell mit der Variable „Globalstrahlung“ auf gravierende Modellverstöße hin (BACKHAUS et al. 2008, S. 79ff.; URBAN und MAYERL 2011, S. 177ff.). Neben fehlender Normalverteilung und Heteroskedastizität lag eine sehr hohe Multikollinearität vor („condition number“ = 188) (s. ANHANG 3, Tab. 15). Wie auch ZHANG et al. (2011) und ROTHFIELD (2010) bereits für Japan bzw. Kalifornien feststellten, eignet sich die Globalstrahlung nicht zur Erklä-

rung der PV-Nutzungsunterschiede in BW. Dies ist darauf zurückzuführen, dass unter den technischen und naturräumlichen Einflussfaktoren oft eher die lokalen Bedingungen wie Dachausrichtung, Dachverschattung und Temperatur für die Höhe der Stromerzeugung entscheidend sind (QUASCHNING 2011, S. 236ff.). Diese Faktoren können jedoch nur auf Individualebene zur Erklärung herangezogen und nicht auf aggregierter Ebene erfasst und interpretiert werden.

Modell 1 (ohne die Variable „Globalstrahlung“) hat ein korrigiertes  $R^2$  von 0,626 (s. Tab. 5 und ANHANG 3, Tab. 16). Das Modell eignet sich also, die Zusammenhänge zu erklären. Alle Regressionskoeffizienten sind nun hoch signifikant ( $p < 0,0001$ ) und die Multikollinearität geht deutlich zurück („condition number“ = 53). Bei der Residuenanalyse zeigt sich jedoch auch hier, dass keine Normalverteilung vorliegt. Der Breusch-Pagan Test weist weiterhin auf Heteroskedastizität der Residuen hin. Moran’s I ist hoch signifikant ( $p < 0,0001$ ) mit einem Wert von 0,234 und zeigt damit an, dass eine räumliche Autokorrelation der Residuen vorliegt. Das heißt, obwohl für den Einfluss exogener Variablen kontrolliert wurde, liegt weiterhin eine räumliche Abhängigkeit der Gemeinden in der Anzahl der PV-Anlagen pro EW vor. Mit Hilfe des *Spatial Lag Models* (Modell 2) wird nun überprüft, ob sich die Modellgüte verbessert, wenn neben dem Einfluss sozioökonomischer Variablen auch räumliche Abhängigkeiten berücksichtigt werden. Modell 2 ist in Gleichung 6.11 dargestellt<sup>6</sup>.

$$\frac{PV}{EW} = \beta_0 + \beta_1 EZFH_i + \beta_2 EZFH01_i + \beta_3 VIEH_i + \beta_4 FAM_i + \rho W(PV/EW)_j + \varepsilon_i \quad (6.11)$$

$$i = 1,2 \dots N, j = 1,2 \dots N - 1$$

Mit Modell 2 wird eine bessere Schätzung der PV/EW erreicht, da der Log Likelihood Wert von -545,7 auf -461,4 deutlich ansteigt (s. Tab. 5 und ANHANG 3, Tab. 17). Auch AIC und SC sprechen für eine bessere Schätzung durch Modell 2, da beide Werte im Vergleich zu Modell 1 niedriger sind. Eine räumliche Autokorrelation der Residuen liegt mit Moran’s I = 0,09 kaum mehr vor. Durch die Verwendung des *Spatial Lag Models* hat sich die Regressionsschätzung also verbessert. Die Residuen weisen allerdings weiterhin auf Heteroskedastizität hin, nähern sich jedoch stärker einer Normalverteilung an, als in Modell 1 (vgl. ANHANG 3, Tab. 18).

Die Ausprägung der Regressionskoeffizienten hat sich im Vergleich zur OLS-Schätzung in Modell 1 leicht verschoben: Die Stärke des Zusammenhangs zwischen PV/EW und allen erklärenden Variablen nimmt im Vergleich zu Modell 1 ab. Die Erklärungskraft der Koeffizienten wurde im Modell 2 zum Teil auf den *Spatial Lag Parameter* übertragen, der mit einem Wert von  $\rho = 0,42$  ebenfalls hoch signifikant ist ( $p < 0,001$ ). Der Zusammenhang der erklärenden Variablen mit der Variable PV/EW

<sup>6</sup> Der robuste LM-Test ist sowohl für das *Spatial Lag Model* als auch für das *Spatial Error Model* hoch signifikant ( $p < 0,001$ ). Die Wahl des *Spatial Lag Models* erfolgt Theorie-gestützt (vgl. Kap. 6.4.1.1).



lag in Modell 1 demnach an der räumlichen Autokorrelation der Variable PV/EW, für die in Modell 2 nun kontrolliert wurde. Die Signifikanz des  $\rho$  und die verbesserte Schätzung durch das *Spatial Lag Model* weisen darauf hin, dass ein Nachbarschaftseffekt vorliegt, der die Unterschiede in der PV-Nutzung auf Gemeinde-Ebene erklären kann und auf einen räumlichen Diffusionsprozess hindeutet (MESSNER und ANSELIN 2004; TAN und HAINING 2009).

Im letzten Schritt wird das *Spatial Lag Model* um die Variablen EINK und BILDG erweitert, um zu überprüfen, ob sich die PV-Diffusion in BW noch im Early-Adopter-Stadium befindet (vgl. Modell 3 in Gleichung 6.12).

$$\frac{PV}{EW} = \beta_0 + \beta_1 EZFH_i + \beta_2 EZFH01_i + \beta_3 VIEH_i + \beta_4 FAM_i + \beta_6 EINK_i + \beta_7 BILDG_i + \rho W(PV/EW)_j + \varepsilon_i \quad (6.12)$$

$$i = 1,2 \dots N, \quad j = 1,2 \dots N - 1$$

Tab. 5: Ergebnisse der Regressionsanalysen für die abhängige Variable PV/EW im Jahr 2009

|                      | Modell 1<br>(OLS)   | Modell 2<br>(Spatial Lag, MLE) | Modell 3<br>(Spatial Lag, MLE) |
|----------------------|---------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Konstante            | -6,675**<br>(0,211) | -4,637**<br>(0,254)            | -4,643**<br>(0,254)            |
| EZFH                 | 3,439**<br>(0,244)  | 2,830**<br>(0,231)             | 2,827**<br>(0,234)             |
| EZFH01               | 6,082**<br>(1,195)  | 4,215*<br>(1,104)              | 3,878*<br>(1,113)              |
| VIEH                 | 0,157**<br>(0,012)  | 0,102**<br>(0,011)             | 0,105**<br>(0,011)             |
| FAM                  | 2,510**<br>(0,598)  | 2,290**<br>(0,551)             | 2,702**<br>(0,576)             |
| EINK                 |                     |                                | 0,000<br>(0,000)               |
| BILDG                |                     |                                | 0,782<br>(0,416)               |
| $\rho$               |                     | 0,423**<br>(0,030)             | 0,445**<br>(0,031)             |
| N                    | 1103                | 1103                           | 1103                           |
| Korr. R <sup>2</sup> | 0,626               | 0,685                          | 0,687                          |
| Log Likelihood       | -545,694            | -461,446                       | -458,880                       |
| AIC                  | 1101,390            | 934,893                        | 933,770                        |
| SC                   | 1126,420            | 964,927                        | 973,816                        |
| Moran's I            | 0,234               | 0,089                          | 0,084                          |

\*\* p < 0,0001, \* p < 0,001, Standardfehler in Klammern  
Anmerkung: OLS: Ordinary-Least-Square Estimation, MLE: Maximum Likelihood Estimation

Quelle: Eigene Berechnung

Das Schätzergebnis zeigt, dass die Regressionskoeffizienten der beiden Variablen EINK und BILDG nicht signifikant sind und dass sich der Log Likelihood-Wert sowie der AIC-Wert kaum verändern (s. Tab. 5 und ANHANG 3, Tab. 19). Der SC-Wert steigt dagegen leicht an, was auf eine Verschlechterung der Schätzung hinweist. Einkommen und Ausbildungsniveau eignen sich demnach nicht, um die Unterschiede in der PV-Nutzung zu erklären. Auch ZHANG et al. (2011) stellten für Japan fest, dass das Einkommen keinen signifikanten Einfluss auf die PV-Nutzung hat. Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass die Adoptoren von PV-Anlagen 2009 nicht mehr als Early Adopters bezeichnet werden können und die PV-Diffusion bereits den Massenmarkt erreicht hat.

Abschließend lässt sich festhalten, dass mit Modell 2 mit einem korrigierten  $R^2$  von 0,685 eine zufriedenstellende Schätzung der PV/EW erreicht wird. Es zeigt sich, dass die Unterschiede in der PV-Nutzung auf Gemeindeebene durch Gebäude-Faktoren (Anteil an EZFH, Neubauten und Viehhaltungsbetrieben) sowie dem Anteil an Familien zu einem großen Teil erklärt werden können. Ein wesentlicher Erklärungsanteil fällt zudem auf den Nachbarschaftseffekt, der auf einen räumlichen Diffusionsprozess bei der Nutzung von PV-Anlagen hinweist.

## 6.5 Fazit

In diesem Kapitel wurde gezeigt, dass räumliche Unterschiede in der Nutzung von PV-Anlagen auf Gemeindeebene bestehen und auf welche Einflussfaktoren diese Unterschiede zurückzuführen sind.

Anhand der räumlichen Daten über die Verteilung der PV-Anlagen wurde in Abschnitt 6.2 dargestellt, wie sich die Anlagen vom Jahr 2000 bis 2009 ausgebreitet haben und daraufhin die Vermutung geäußert, dass ein räumlicher Nachbarschaftseffekt bei der Diffusion von PV-Anlagen existiert. Mit Hilfe der Analysen zur räumlichen Autokorrelation konnte in Abschnitt 6.3 bestätigt werden, dass eine signifikante Clusterung von PV-Anlagen auf Gemeindeebene vorliegt und dass Hot Spot- und Cold Spot-Regionen von PV-Anlagen in BW bestehen. In der räumlichen Regressionsanalyse in Abschnitt 6.4 zeigt sich, dass die Unterschiede in der Nutzungsintensität auf einigen exogenen Einflussfaktoren, nämlich dem Anteil an Ein- und Zweifamilienhäusern, Neubauten, Viehhaltungsbetrieben und Familien beruhen. Ausgeschlossen werden konnte der Einfluss der Globalstrahlung, sowie von Einkommen und Bildungsstand. Zudem hängt die Anzahl an PV-Anlagen in einer Gemeinde auch von der Anzahl an PV-Anlagen in den Nachbargemeinden ab. Auf Gemeindeebene liegt also ein Nachbarschaftseffekt vor, der auf einen Diffusionsprozess hindeutet.

Es ist jedoch nicht bekannt, ob der Nachbarschaftseffekt auf die soziale Interaktion einzelner Haushalte zurückzuführen ist. Um die Zusammenhänge auf der Individualebene zu identifizieren, werden in Kapitel 7 die Einflussfaktoren auf die PV-Diffusion in der Hot Spot-Region Heilbronn-Franken mit Hilfe von Interviews und einer Haushaltsbefragung untersucht.

Schließlich wurde in den quantitativen Analysen des Kapitels 6 die zeitliche Dynamik noch nicht berücksichtigt. Um die Diffusion vollständig zu erfassen, erfolgt die Untersuchung des Diffusionsprozesses mit einem Diffusionsmodell in Kapitel 8.

## 7 Diffusion von PV-Anlagen in der Region Heilbronn-Franken – eine Fallstudie

Die Region Heilbronn-Franken ist eine Region im Nordosten BWs, die sich zusammensetzt aus dem Stadt- und Landkreis Heilbronn, dem Main-Tauber Kreis, dem Hohenlohekreis und dem Landkreis Schwäbisch Hall (s. Karte 7). In Abschnitt 6.2 und 6.3 wurde aufgezeigt, dass sich die Region durch eine dynamische und hohe PV-Nutzung auszeichnet und statistisch signifikante räumliche Autokorrelationen bezüglich der Anzahl an PV-Anlagen pro EW zwischen einigen Gemeinden bestehen. In der Region Heilbronn-Franken befindet sich also ein „Hot Spot“ von PV-Anlagen, d.h. ein Cluster von Gemeinden, in denen im Vergleich zum Durchschnitt BWs besonders viele PV-Anlagen installiert sind (vgl. Abschnitt 6.3.2).

Mit Hilfe von Regressionsanalysen konnten bereits wesentliche Ursachen aufgedeckt werden, die für die räumlichen Unterschiede in der PV-Nutzung verantwortlich sind (vgl. Abschnitt 6.4). Quantitative Verfahren zur Erklärung der Nutzungsunterschiede stoßen jedoch an ihre Grenzen, da es unmöglich ist, alle Einflussfaktoren statistisch zu erfassen und deren Bedeutung zu messen. In diesem Kapitel wird daher die Hot Spot-Region Heilbronn-Franken beispielhaft herausgegriffen, um weitere Ursachen für die Nutzungsunterschiede herauszufinden und die Zusammenhänge im Diffusionsprozess zu verstehen. Die Fallstudie ermöglicht, mit Hilfe von Experteninterviews die wesentlichen Akteure im Diffusionsprozess, deren Rolle und Interaktion zu untersuchen sowie weitere Ursachen für die Nutzungsunterschiede aus Sicht der Akteure aufzudecken (Abschnitt 7.1). Durch eine Haushaltsbefragung können Informationen über die Einflussfaktoren auf den Adoptions- und Diffusionsprozess von PV-Anlagen in privaten Haushalten gewonnen, sowie Erklärungsansätze für die räumlichen Unterschiede in der PV-Nutzung einzelner Gemeinden gefunden werden (Abschnitt 7.2).

### 7.1 Der PV-Diffusionsprozess aus Sicht der Akteure

Die Diffusion von PV-Anlagen in Deutschland wurde maßgeblich durch bestimmte Akteursgruppen beeinflusst (vgl. Abschnitt 2.2.1). Nach ROGERS (2003) sind dies sogenannte Change Agents, die versuchen, die Diffusion gezielt voranzutreiben (vgl. Abschnitt 3.1.3). KRUIJSEN (1999) zeigte, dass das Engagement und die Interaktion zwischen einzelnen Akteuren im PV-Bereich in einzelnen Ländern unterschiedlich ausfällt (vgl. Abschnitt 5.1). Es stellt sich die Frage, ob das Vorhandensein und das Engagement bestimmter Akteure sich durch die Anzahl an installierten PV-Anlagen auch lokal oder regional bemerkbar machen und welche Akteure die Rolle von Change Agents einnehmen.

Karte 7: Die Region Heilbronn-Franken in Baden-Württemberg

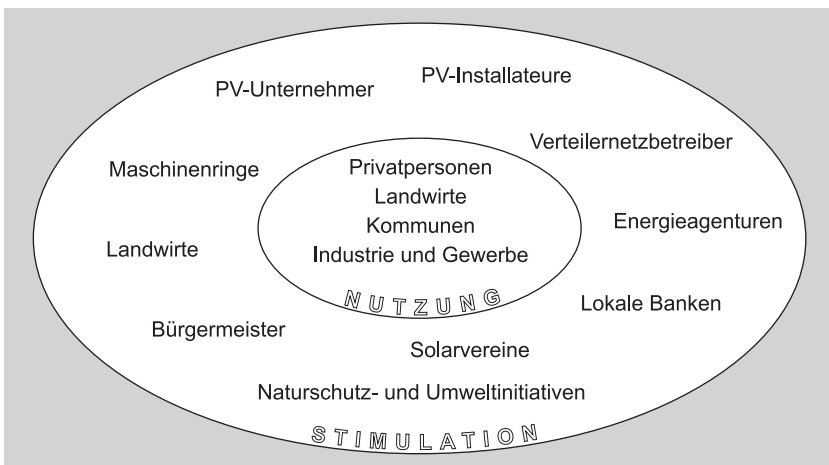


Zur Untersuchung der Rolle der Akteure und der Einflussfaktoren auf den Diffusionsprozess wurden Experteninterviews durchgeführt. Die Auswahl der Experten beschränkte sich auf diejenigen Akteure, die den Diffusionsprozess direkt stimulieren und Einfluss auf die Installation von PV-Dachanlagen haben. Angelehnt an die Arbei-

ten von KRUIJSEN (1999), DEWALD (2007), MAUTZ et al. (2008) und MOSER et al. (2009) wurden folgende Akteursgruppen identifiziert: PV-Unternehmer und PV-Installateure, Verteilnetzbetreiber<sup>7</sup>, Energieagenturen, lokale Banken, Solarvereine, Naturschutz- und Umweltinitiativen, Bürgermeister, Maschinenringe und Landwirte<sup>8</sup>(s. Abb. 20).

Ziel der Experteninterviews war zum einen, die Rolle der einzelnen Akteure in der PV-Diffusion zu erörtern und damit die starke PV-Nutzung in der Region Heilbronn-Franken zu erklären. Zum anderen dienten die Experten auch als Informationsquelle, die Aufschluss über die Ursachen der Unterschiede in der PV-Nutzung zwischen den Gemeinden geben können. Schließlich stellten die Interviews eine Vorstudie für die Haushaltsbefragung dar und gaben Hinweise für die Konstruktion des Fragebogens.

Abb. 20: Akteure im Diffusionsprozess



Quelle: Eigene Darstellung

### 7.1.1 Experteninterviews der Akteure

Die Diffusion von PV-Anlagen findet innerhalb eines sozialen Systems statt, das von einer Vielzahl von Akteuren geprägt wird. Experteninterviews ermöglichen, auf das spezifische Wissen dieser Akteure zurückzugreifen und somit die Einflussfaktoren auf den Diffusionsprozess zu untersuchen. Denn „...Situationen werden unterschiedlich wahrgenommen, je nach Interesse, je nach Erfahrung und je nach Möglichkeit, diese Situation zu verändern“ (MEIER KRUKER und RAUH 2005, S. 14). Als Experten werden in

<sup>7</sup> Verteilnetzbetreiber werden zur Vereinfachung im Folgenden als Netzbetreiber bezeichnet

<sup>8</sup> Maschinenringe und Landwirte wurden nicht befragt. Die Bedeutung der Maschinenringe für die Diffusion von PV-Anlagen ergab sich erst aus den Experteninterviews. Die Landwirte sind nicht nur wichtige Abnehmer von PV-Anlagen, sondern stimulieren auch maßgeblich den Diffusionsprozess. Dies wurde jedoch auch erst im Laufe der Experteninterviews deutlich.

diesem Zusammenhang die Akteure im PV-Bereich behandelt, die sich professionell mit dem Thema auseinandersetzen.

Für die Befragung wurde ein leitfadengestütztes Experteninterview ausgewählt, da dieses erleichtert, alle forschungsrelevanten Themen in der Befragung zu berücksichtigen. Gleichzeitig erlaubt der Leitfaden aber auch eine offene Gesprächsführung, in der vom Experten aufgeworfene neue Aspekte behandelt werden können. Die Experten stellen in der Befragung jeweils Repräsentanten einer bestimmten Akteursgruppe dar (SCHNELL et al. 2005, S. 387; FLICK 2009, S. 214ff.).

Die Experteninterviews wurden in einem Zeitraum von sechs Wochen im Mai und Juni 2010 durchgeführt. Zu dieser Zeit war es teilweise schwierig, Gesprächspartner zu gewinnen, da durch das Inkrafttreten der Novellierung des EEG zum 1.7.2010 eine große Anzahl an PV-Anlagen nachgefragt wurde, die vor dem Stichtag ans Stromnetz angeschlossen werden sollten, so dass besonders die PV-Unternehmer, Installateure und Netzbetreiber personell überlastet waren.

Die Experten wurden zunächst per e-mail kontaktiert und für das Interview meist an ihrem Arbeitsplatz aufgesucht<sup>9</sup>. Insgesamt wurden 16 Interviews durchgeführt. Unter den Interviewpartnern waren drei Vertreter von Energieagenturen (Energiezentrum Wolpertshausen, Energieagentur Main-Tauber), vier PV-Unternehmer, zwei Elektroinstallateure, zwei Netzbetreiber, eine lokale Bank, drei Bürgermeister und ein Vertreter eines Solarvereins.

Die Interviews wurden meist als Audioaufnahmen mitgeschnitten und transkribiert; wo dies nicht möglich war, wurden im Anschluss Gedächtnisprotokolle angefertigt<sup>10</sup>. Die Dauer der Interviews betrug zwischen 30 und 90 Minuten. Die Codierungen der Interviewpartner sind in Tab. 6 aufgeführt.

Tab. 6: Interviewpartner und deren Codierung

| Interviewpartner    | Codierung       |
|---------------------|-----------------|
| PV-Unternehmer      | A2, A6, A8, A15 |
| Elektroinstallateur | A3, A5          |
| Netzbetreiber       | A11, A14        |
| Bank                | A9              |
| Energieagentur      | A1, A7, A12     |
| Bürgermeister       | A10, A13, A16   |
| Solarverein         | A4              |

Quelle: Eigene Erhebung

Für die verschiedenen Akteursgruppen wurde jeweils ein Leitfaden in Form einer Mindmap erstellt, auf der die zentralen Themenblöcke und die dazugehörigen Fragen übersichtlich angeordnet sind. Dies erleichterte eine spontane Gesprächsführung und

<sup>9</sup> Bei einer Person musste auf ein Telefoninterview ausgewichen werden.

<sup>10</sup> Bei vier Interviewpartnern wurden Gedächtnisprotokolle erstellt.

ermöglichte, die zentralen Themen ohne eine vorgegebene Reihenfolge abzuhandeln. Zum Gesprächseinstieg wurde dem Interviewpartner eine Karte von BW vorgelegt, auf der die räumlichen Unterschiede in der Anzahl an PV-Anlagen auf Gemeinde-Ebene dargestellt sind.

## 7.1.2 Die Rolle der einzelnen Akteure im Diffusionsprozess

In diesem Kapitel werden die einzelnen Akteure in Bezug auf ihre Rolle in der Verbreitung von PV-Anlagen vorgestellt. Die Darstellungen basieren auf den Schilderungen der Akteure, die ihre eigenen Aktivitäten beschreiben, aber auch auf der Fremdsicht der anderen Akteure.

### PV-Unternehmen und Elektroinstallateure<sup>11</sup>

PV-Unternehmen und Elektroinstallateure vertreiben und installieren PV-Anlagen in unterschiedlichen Leistungsbereichen. Sie bedienen einerseits die Nachfrage von Privathaushalten (meist bis 10 kWp), verkaufen aber je nach Unternehmensausrichtung auch größere Dachanlagen an Landwirte, Industrie und Gewerbe oder Kommunen (z.B. in Form von Bürgersolaranlagen). Elektroinstallateure bedienen v.a. den lokalen Markt; größere PV-Unternehmen haben meist eine Ausstrahlung über die Gemeindegrenzen hinaus (A5, A15). Sowohl die PV-Unternehmen als auch die Elektriker meinen, dass die Nachfrage nach PV-Anlagen besonders auf den aktiven Kundenkontakt und den guten Ruf ihres Unternehmens zurückzuführen ist (A2, A3). Einige PV-Unternehmen bieten auch gezielt Informationsveranstaltungen an, um das Wissen über die Technologie zu verbreiten und Hilfestellung zu Versicherung und Finanzierung zu geben (A8). Ein großes PV-Unternehmen beschreibt, dass es ein umfassendes Geschäftskonzept entwickelt hat, um sich den Markt in der Region zu erschließen:

*„Bei uns kam noch dazu, dass wir von Anfang an die Banken mit einbezogen haben. [...] Wir haben mittlerweile über 30 Vertriebsbanken, von denen wir Kapital und Dachflächen bekommen oder mit denen wir Besitzer von großen Dachflächen ansprechen können“ (A15).*

Die ausgesprochen starke Diffusion von PV-Anlagen in der Region wird auf die drei großen PV-Firmen TauberSolar, SolarArt und SolarDirekt<sup>12</sup> zurückgeführt, die mit Hilfe von engagierten Einzelpersonen und einem aktiven Marketing die Installa-

---

11 Als PV-Unternehmen werden hier Unternehmen verstanden, die sich auf den Vertrieb von PV-Anlagen spezialisiert haben und teilweise eigene Anlagen betreiben (KEINE Herstellung von PV-Anlagen). Je nach Unternehmen umfasst das Spektrum Solaranlagen für Privathaushalte in den kleineren Leistungsbereichen (bis 10 kWp), aber auch Großanlagen im MW-Bereich. Diese Unternehmen bieten sowohl die Installation als auch die Wartung von PV-Anlagen an.

Unter Elektroinstallateuren werden hier die örtlichen Handwerker zusammengefasst, die die Installation von PV-Anlagen vornehmen, jedoch zudem meist auch die üblichen Leistungen eines Elektroinstallateurs anbieten.

12 SolarDirekt existiert nicht mehr.



tion von PV-Anlagen vorantrieben (A1, A6, A7). Ein Vertreter einer Energieagentur beschreibt die Situation in seinem Landkreis:

*„Hier in der Region gibt es die Firma Tauber-Solar, die eine gute Performance gezeigt hat. Die konnten sich gut verkaufen und es standen authentische Personen dahinter“ (A7).*

PV-Unternehmen spielen also bei der Verbreitung von PV-Anlagen eine zentrale Rolle. Der mögliche Gewinn, der sich durch den Verkauf von Anlagen ergibt, stellt eine hohe Motivation dar, die Diffusion voranzutreiben. Einige Unternehmen nahmen in der Vergangenheit dadurch die Rolle von Change Agents ein, die durch Werbung und Informationsveranstaltungen das Bewusstsein für die Technologie erhöht und damit den Diffusionsprozess in der Region angestoßen haben.

### **Netzbetreiber**

Die Befragungsregion Heilbronn-Franken wird von verschiedenen Netzbetreibern versorgt. Das größte Gebiet unterliegt der EnBW Regional AG<sup>13</sup>, neben kleineren Netzbetreibern wie der EW Braunsbach-Tullau GmbH, den Überlandwerken Schäftersheim GmbH und einigen Stadtwerken. Die Netzbetreiber sind gesetzlich dazu verpflichtet, die PV-Anlagen – je nach Leistung – an das Nieder- oder Mittelspannungsnetz anzuschließen. Bis zu einer Leistung von 30 kW<sub>p</sub> sind sie gesetzlich zum Anschluss verpflichtet. Falls das Netz die nachgefragte Leistung nicht tragen sollte, muss der Netzbetreiber den Ausbau auf eigene Kosten vornehmen (A11, A5). Einige Anlagenbetreiber gehen deshalb bewusst mit der Leistung auf 30 kW<sub>p</sub> zurück, damit der Netzanschluss vom Netzbetreiber getätigt wird. So bemerkt ein Netzbetreiber:

*„Die Netzkapazität hemmt die Anlagen, allerdings nicht deren Anzahl, sondern deren Leistung. [...] Wäre die Netzkapazität nicht der begrenzende Faktor, hätten wir wesentlich mehr Zuwachs wie im Moment“ (A11).*

Die Netzbetreiber stehen aus der Sicht der PV-Unternehmer und Installateure dem Ausbau von PV-Anlagen unterschiedlich gegenüber. Laut der Erfahrung eines Elektroinstallateurs betrachten die Stadtwerke Schwäbisch Hall Erneuerbare Energien als Chance und fördern den Ausbau. Die EnBW Regional AG zeigt sich dagegen eher zurückhaltend, da vielerorts ein kostenaufwendiger Netzausbau nötig wäre (A3). Ein PV-Unternehmer aus dem Main-Tauber Kreis berichtet, dass die Netzbetreiber anfangs eine blockierende Haltung einnahmen, dies jedoch heute nicht mehr der Fall ist. Die Überlandwerke Schäftersheim GmbH werden als sehr offen und kooperativ empfunden. Die EnBW Regional AG ist durch die derzeit hohe Anzahl an Anfragen überlastet, so dass es zu Verzögerungen im Anschluss kommen kann (A6). Dieser Unternehmer schätzt die Stadtwerke jedoch als konservativ ein. Seiner Meinung nach werfen Erneuerbare Energien für die Stadtwerke technische Probleme auf, für die bisher keine standardisierten Abläufe bestehen:

*„Gerade mit den Stadtwerken Bad Mergentheim hatten wir anfänglich und haben wir jetzt noch große Probleme, ans Netz zu kommen. Selbst im Privatbereich, bei Kleinanlagen“ (A6).*

---

13 EnBW Regional AG Stuttgart und Ostwürttemberg Donau Ries AG ODR

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Netzbetreiber regional unterschiedlich agieren, je nach Zustand der Netze und dem Willen Erneuerbare Energien bewusst zu fördern. Die Diffusion von PV-Anlagen in den kleineren Leistungsbereichen bis 30 kWp können sie jedoch aufgrund der gesetzlichen Anschlusspflicht nicht verhindern, höchstens zeitlich verzögern.

## **Banken**

Eine PV-Anlage ist ein Investitionsobjekt, das meist über Kredite der lokalen Banken finanziert wird.

*„Die wenigsten Kunden machen eine Anlage aus Eigenmitteln. [...] Wenn die lokalen Banken nicht wären, wüsste ich nicht wie die PV-Anlagen finanziert werden sollten“,* so ein Bankangestellter der Sparkasse in Creglingen (A9).

Einige PV-Unternehmer bemerken jedoch, dass sich die Banken erst seit zwei bis drei Jahren in der PV-Förderung engagieren (A6, A8, A4). *„Und da war unsere Erfahrung bis vor zwei bis drei Jahren, dass die Banken da sehr konservativ waren“* (A6). Zudem ist die Aktivität der lokalen Banken regional unterschiedlich (A2). Im Main-Tauber Kreis bietet die Sparkasse seit 2009 ein eigenes Finanzierungsangebot an. Die Sparkasse hat PV als neues Geschäftsfeld entdeckt und will in der Region präsent sein: *„PV ist für uns auch eine Image-Sache“* (A9). Neben der Sparkasse engagieren sich die Volksbanken des Landkreises seit 2010 im Rahmen des „1000-Dächer-Plus“-Programms (A6, A7).

Die Banken nahmen also anfangs eher eine passive Rolle ein und haben den Diffusionsprozess in den ersten Jahren kaum mitgestaltet. Seit ca. 2008 haben sie jedoch durch die Dynamik im PV-Bereich die Anlagenfinanzierung als neues Geschäftsfeld aufgetan und bieten nun – regional unterschiedlich – eigene Finanzierungskonzepte an.

## **Energieagenturen**

Energieagenturen sind öffentliche Einrichtungen, die Dienstleistungen für Bürger, Unternehmen und Kommunen im Energiebereich meist für einen Landkreis anbieten und besonders im Bereich der Erneuerbaren Energien aktiv sind. Das Energiezentrum Wolpertshausen des Landkreises Schwäbisch Hall bezeichnet sich als Kompetenzzentrum der Region, das unabhängig von Firmen den Ausbau von Erneuerbaren Energien und PV fördert (A12). Privatpersonen werden zu PV beraten und erhalten Informationen zu PV-Installateuren in der Region. Im Energiezentrum wurden in der Vergangenheit häufig Informationsveranstaltungen einer lokalen PV-Firma abgehalten (A1). Ein Vertreter der Energieagentur Main-Tauber beschreibt, dass die Energieagentur viel in Öffentlichkeits-, Motivations- und Informationsarbeit investiert. Besonders das von der Energieagentur unterstützte Projekt „Sun-Area“<sup>14</sup>, ein für viele Gemeinden der Region erstelltes Solarkataster, weckte bei Privatpersonen die Neugierde für PV (A7).

---

<sup>14</sup> Das Unternehmen Sun-Area ermittelt großflächig Solarkataster und Solarpotenziale für Städte, Kommunen und ganze Landkreise. Ein Zusammenschluss von Kommunen der Leader-Aktionsgruppe Neckar-Odenwald-Tauber ließ die Berechnung des Photovoltaik- und Solarthermiepotentials für die Dachflächen einiger Kommunen durchführen (<http://www.sun-area.net/>).

Die Energieagenturen haben sich in der Region auch durch die Initiierung von PV-Projekten einen Namen gemacht. Das Energiezentrum Wolpertshausen betont besonders die Bedeutung des 2002 ins Leben gerufenen Projekts „Solar Hohenlohe Aktiv“<sup>15</sup> für die öffentliche Wahrnehmung von PV-Anlagen (A1). Im Rahmen dieses Projekts hat das Energiezentrum in Zusammenarbeit mit der Wirtschaftsförderungsgesellschaft des Landkreises Schwäbisch Hall mbH kommunale Dachflächen in der Umgebung angemietet und darauf Bürgersolaranlagen installiert.

*„In unserer Einstiegsaktion sind wir in fast jeden Gemeinderat unseres Kreises gegangen oder haben zumindest mit dem Bürgermeister gesprochen, der das Thema dann in den Gemeinderat getragen hat“ (A12).*

Die Energieagentur hat also aktiv Werbung für PV betrieben und versucht, die Politik über Gemeinde- und Kreisrat mit einzubinden.

Im Main-Tauber-Kreis existiert die Energieagentur dagegen erst seit 2008. Im Jahr 2010 initiierte sie zusammen mit der Volksbank Main-Tauber eG die Solarinitiative „1000-Dächer-Plus“<sup>16</sup>, durch die speziell PV-Anlagen in kleinerem Leistungsbereich (4-5 kWp) für Privat-Haushalte gefördert werden.

Energieagenturen können also eine wichtige Rolle für die Diffusion von PV-Anlagen spielen, sowohl durch ihre Funktion als Kompetenzzentrum in der Region als auch durch das Betreiben eigener PV-Anlagen. Das Energiezentrum in Wolpertshausen hat durch das frühe Engagement im PV-Bereich die Diffusion in der Region stark vorangetrieben, wie auch ein Bürgermeister des Landkreises Schwäbisch Hall bemerkt (A 16).

### **Bürgermeister**

In einigen Gemeinden spielten auch die Bürgermeister eine zentrale Rolle für die Verbreitung von PV-Anlagen, indem sie Interesse für die Technologie zeigten und kommunale Dachflächen für die Installation von Anlagen zur Verfügung stellten oder eigene PV-Projekte initiierten (A2, A10, A16). Aufgeschlossene, aktive Bürgermeister werden von PV-Unternehmern als besonders förderlich für die Umsetzung von Bürgersolaranlagen angesehen (A6, A16).

*„Es ist sehr wichtig, dass ein Bürgermeister dahinter steht, der sagt: ‚Ja, ich will das! Ich schreib das auf meine Fahne! Ich habe das initiiert!‘“ (A6).*

Für das Projekt „Solar Hohenlohe Aktiv“ war die Bereitstellung kommunaler Dachflächen die Voraussetzung für das Gelingen des Projekts. Viele Bürgermeister waren bereit, Dachflächen zu vermieten; einige nahmen motiviert durch die Energieagentur die Installation von PV-Anlagen sogar selbst in die Hand (A12). Ein Bürgermeister beschreibt, dass aufgrund seiner Initiative im Ort auf der Mehrzweckhalle und der Schule PV-Anlagen errichtet wurden. Die nötige Dachsanierung der Schule konnte gleich mit erledigt werden (A10).

---

15 <http://www.solaranlagen.wfgsha.de/>

16 <http://www.1000daecher-maintauber.de/cms/website.php>

Die Installation von PV-Anlagen ist für Bürgermeister auch eine Möglichkeit, sich umweltpolitisch zu positionieren und das Thema PV an die Öffentlichkeit zu bringen (A11). Ein Bürgermeister des Landkreises Main-Tauber beschreibt:

*„Schon vor der baulichen Maßnahme war für mich wichtig, dass der Standort der Anlage exponiert ist und somit eine gewisse öffentliche Wirkung erzielt. Die Anlage wurde auf einem Feuerwehrgebäude unmittelbar an der Kreisstraße gebaut und das Gebäude ist gut einsehbar“ (A16).*

Bürgermeister nehmen – wie PV-Unternehmer – in einigen Gemeinden die Funktion eines Change Agents ein, die durch die aktive Förderung von Bürgersolaranlagen oder die Installation von PV-Anlagen auf eigenen kommunalen Dächern das Thema an die Öffentlichkeit bringen. Das Engagement des Bürgermeisters und des Gemeinderats kann also wichtige Impulse für die PV-Diffusion in der Gemeinde geben.

### **Solarvereine, Naturschutz- und Umweltinitiativen**

Seit Ende der 1970er Jahre gründeten sich in ganz Deutschland Umwelt- und Naturschutzgruppen, die häufig in Vereinen organisiert sind und gezielt die Verbreitung von erneuerbaren Energien fördern wollten (s. Abschnitt 2.2.1). Gründer der Vereine waren meist engagierte Privatpersonen, die selbst als Pioniere PV-Anlagen betrieben und sich sowohl zum Austausch untereinander als auch zum Betreiben von Öffentlichkeitsarbeit zusammenschlossen.

*„Ich habe mal gehört, dass PV wegen Solarinitiativen so stark ist. Das sind lokal verwurzelte Leute, die sich gegenseitig kennen und bekannt sind. Die sind idealistisch, denen glaubt man das, die haben das rüber gebracht“ (A15).*

In den Interviews wurde häufig die Bedeutung dieser Initiativen und Vereine für die lokale PV-Entwicklung betont. Im Landkreis Schwäbisch Hall war die Energieinitiative aus Kirchberg an der Jagst besonders einflussreich; im Main-Tauber Kreis die Naturschutzgruppe in Bad Mergentheim und der Solarverein in Creglingen (A1, A5, A7, A13, A15).

Der Solarverein in Creglingen besteht seit 2002 und hat ca. 15 Mitglieder, meist mit technisch-handwerklicher Berufserfahrung. Der Verein hatte den Bau der Anlage auf dem Schuldach in Creglingen angestoßen und trug dazu bei, das Wissen zu PV vor Ort zu vertiefen. Durch das Betreiben der Anlage auf dem Schuldach konnten praktische Erfahrungen gesammelt und an interessierte Personen weitergegeben werden. Der Verein hat jedoch mittlerweile an Bedeutung verloren, da sich Privathaushalte bei Interesse für eine Anlage nun meist direkt an den Installateur wenden (A4).

Die in Solar- und Energievereinen organisierten Personen können einerseits den Innovatoren zugeordnet werden, da sie meist als Erste PV-Anlagen betrieben. Gleichzeitig nahmen sie durch die Informations- und Aufklärungsarbeit des Vereins auch die Rolle von Change Agents ein, die die Energiewende anstießen. Die Präsenz eines solchen Vereins vor Ort kann also das Bewusstsein für PV erhöhen und Auswirkungen auf die Anzahl an PV-Anlagen in einer Gemeinde oder Region haben.

## Maschinenringe

Vertreter von Maschinenringen wurden zwar nicht interviewt, in mehreren Befragungen wurde die Bedeutung dieser Akteursgruppe für die Diffusion von PV-Anlagen jedoch betont. Nach dem Landesverband für Maschinenringe sind diese „Zusammenschlüsse von Landwirten auf der Basis eines Vereins“ (Landesverband der Maschinenringe BW 2011). Ein Bürgermeister beschreibt Maschinenringe als

*„[...] Dienstleistungsorganisationen mit hauptamtlichen Geschäftsführern. Ursprünglich haben die nur Maschinen an die Landwirte verliehen, aber heute bieten die alle möglichen Dienstleistungen [...] an. Die sind sehr innovativ, da man bei unserem Maschinenring z.B. auch Hackschnitzel kaufen kann oder PV vermittelt bekommt“ (A13).*

Maschinenringe haben sich in den letzten Jahren durch den Verkauf von PV-Anlagen an Landwirte ein Geschäftsfeld erarbeitet (A16). Aufgrund des großen Vertriebs verfügen sie über gute Einkaufskonditionen und können die Anlagen preisgünstig an die Landwirte weitergeben (A2, A6). Zudem sind Maschinenringe für viele Landwirte bereits ein vertrauter Partner, über den auch Versicherungen und die Altersvorsorge organisiert sind (A3).

Laut eines PV-Unternehmers spielen Maschinenringe eine wichtige Rolle für die Diffusion von PV-Anlagen:

*„Die Maschinenringe haben einen großen Beitrag geleistet, dass die PV bekannter wurde und dass sie immer wirtschaftlicher wurde“ (A8).*

Sie arbeiten häufig mit Banken zusammen und können – wenn ein engagierter Geschäftsführer dahinter steht – die Diffusion von PV-Anlagen besonders im landwirtschaftlichen Bereich vorantreiben (A15).

Die Rolle der Maschinenringe ist jedoch regional verschieden. Ein PV-Unternehmer betont die starke Position von Maschinenringen im Landkreis Schwäbisch Hall:

*„Wir hatten zweimal dort einen Ansatz versucht, aber es ist einfach so, dass die Maschinenringe sehr stark sind in dem Thema und dort den Markt der Landwirte für sich besetzt haben“ (A6).*

Im Bereich um die Gemeinde Rot am See an der Grenze zu Bayern treffen drei große Maschinenringe aufeinander, so dass die PV-Anlagen in der Region besonders günstig zu erwerben sind (A8).

Die Maschinenringe stellen also eine wichtige Akteursgruppe für die Verbreitung von PV-Anlagen auf landwirtschaftlichen Gebäuden dar. Sie haben sich früh im Markt positioniert und den Prozess der PV-Diffusion mitgestaltet. Durch die Zusammenarbeit mit anderen Akteuren (wie Banken, Landwirten) haben sie die Thematik ins öffentliche Bewusstsein gerückt. In Landkreisen, in denen Maschinenringe aktiv sind, hat dies vermutlich auch zu einem Anstieg an PV-Anlagen auf landwirtschaftlichen Gebäuden geführt, so dass sich die Sichtbarkeit von PV insgesamt in der Region erhöht hat.

## Landwirte

Die Bedeutung der Landwirte für die Diffusion von PV-Anlagen wurde im Laufe der Interviews immer wieder betont. Landwirte waren meist die Pioniere in der Gemeinde, die als Erste PV-Anlagen installierten (A5). Sie erkannten früh das hohe Renditepotential von PV und investierten daraufhin zahlreich in PV-Anlagen. Durch die Installation von verhältnismäßig großen Anlagen auf Scheunendächern sowie Stall- und Wohngebäuden trugen sie zur hohen Sichtbarkeit von PV bei (A4, A9, A14).

Die Attraktivität von PV für Landwirte ist auf die größeren Handlungsspielräume von Landwirten im Vergleich zu Hauseigentümern zurückzuführen. Im Folgenden werden anhand der Aussagen der Interviewpartner die Ursachen für eine hohe PV-Nutzung in der Landwirtschaft erläutert.

Der entscheidende Faktor für die Installation von PV-Anlagen ist die Verfügbarkeit großer Dachflächen, wie dies vor allem bei Viehzuchtbetrieben der Fall ist (A11, A5). Außerdem sind Landwirte

*„es seit jeher gewohnt, relativ große Investitionen zu tätigen, auch mit einer entsprechend geringen Rendite. Wenn ein Landwirt 100.000 € investieren muss, dafür 5% Rendite bekommt und das finanziert bekommt, dann macht er das. Ein Gewerbetreibender fängt unter 10% Rendite erst gar nicht an“ (A11).*

Der Grundbesitz reicht vielen Banken zudem als Sicherheit aus, so dass Landwirte meist ohne Probleme Kredite bekommen (A13).

Häufig kommt es zum Bau von Folgeanlagen, da Landwirte durch die erste Anlage Erfahrung sammeln konnten und meist noch Dachflächen für weitere Installationen zur Verfügung stehen (A9). Ist der Kredit der ersten Anlage abbezahlt, so rentiert sich die Investition in eine Folgeanlage auch steuerlich, da man so von den hohen Abschreibungen der neuen Anlage profitiert (A11).

Ein Bürgermeister beschreibt, dass für die Installation von PV-Anlagen zunehmend auch neue Maschinenhallen allein für die Nutzung der Dachfläche gebaut werden:

*„Dort bauen sie Hallen in der sogenannten ‚neuen fränkischen Bauweise‘, die keinen anderen Sinn haben, außer darauf PV zu installieren. Die werden dann zwar Maschinenhallen genannt und irgendein Wagen wird dann darunter gestellt, aber PV ist die einzige Nutzung“ (A13).*

Die aktive Bautätigkeit ist darauf zurückzuführen, dass Landwirte im Außenbereich privilegiert sind und genehmigungsfrei auf ihrem Grund bauen können. Im Gegensatz zu einer Freiflächenanlage ist bei einer Dachanlage kein Bebauungsplan der Gemeinde nötig (A13, A16). Beim Neubau landwirtschaftlicher Gebäude wird meist auch die PV-Nutzung berücksichtigt und die Scheune optimal nach Süden ausgerichtet (A11).

In der Region Heilbronn-Franken ist zu beobachten, dass die landwirtschaftliche Tätigkeit in den Gemeinden zurückgeht und landwirtschaftliche Gebäude oft nur noch der PV-Nutzung dienen (A13). PV ist für Landwirte ein wichtiger Wirtschaftszweig geworden und für viele teilweise die einzige Einkommensquelle (A5).

Die Ausführungen zeigen, dass die Nutzung von PV aus wirtschaftlichen Gründen für Landwirte sehr attraktiv ist. Viele Landwirte haben dies schnell erkannt, früh in

PV investiert und damit die Rolle von Innovatoren eingenommen. Die Installation von relativ großen Anlagen hat die Sichtbarkeit der Technologie in der Region erhöht und dadurch möglicherweise den Diffusionsprozess angestoßen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das Interesse jeder Akteursgruppe, die Diffusion von PV zu fördern, von der wirtschaftlichen oder politischen Bedeutung von PV für diese Akteursgruppe abhängt. Für PV-Unternehmer, Installateure, Maschinenringe und Banken stellt PV ein Geschäftsfeld dar, für das aktiv Werbung betrieben wird, um die Verkaufszahlen zu erhöhen. Energieagenturen, Bürgermeister und Solarvereine sehen das Engagement für PV als politischen Auftrag oder sind persönlich an der Mitgestaltung einer nachhaltigen Stromversorgung interessiert. Je nach beruflicher Funktion stehen den Akteuren unterschiedliche Einflussmöglichkeiten zur Verfügung.

Im nächsten Kapitel wird nun aufgezeigt, welche Faktoren – nach Meinung der Experten – den Diffusionsprozess in Heilbronn-Franken beeinflussten und für die räumlichen Unterschiede in der Nutzung von PV verantwortlich waren.

### 7.1.3 Ursachen für räumliche Unterschiede in der PV-Nutzung

Die räumlichen Nutzungsunterschiede von PV zwischen den Gemeinden sind durch die Regressionsanalyse in Abschnitt 6.4 nur zum Teil erklärt worden. Die Ergebnisse der quantitativen Analysen werden in diesem Kapitel nun um die Einschätzungen von Experten ergänzt. Die Experten sind selbst Akteure im Diffusionssystem, haben den Diffusionsprozess in der Region Heilbronn-Franken in den letzten Jahren aktiv verfolgt oder mitgestaltet und können somit lokale Details und Zusammenhänge aufzeigen.

In diesem Kapitel werden die Ursachen für die Nutzungsunterschiede zusammengefasst, wobei der Einfluss der einzelnen Akteure auf den Diffusionsprozess nochmals aufgegriffen wird. Die Ausführungen werden zudem ergänzt um weitere Ursachen, die von den Experten in den Interviews angesprochen wurden.

In den Regressionsanalysen zeigte sich, dass die Globalstrahlung keinen statistisch signifikanten Einfluss auf die Anlagen-Verteilung in den Gemeinden hat (vgl. Abschnitt 6.4.2.2). Zur Erklärung der regionalen Unterschiede innerhalb BWs sind die Globalstrahlungswerte allein deshalb weniger geeignet. Unter den naturräumlichen Einflussfaktoren spielen die Topographie und das Kleinklima – laut PV-Unternehmern – eine größere Rolle (A6, A15).

*„Man darf es nicht allein auf die Einstrahlung reduzieren. Ein wesentlicher Aspekt sind auch die Temperaturen und die Feuchtigkeit. [...] Wenn Sie in den höher gelegenen Gemeinden Anlagen bauen, haben sie Jahreserträge, die im Schnitt fast 40 bis 50 kWh pro kWp höher liegen, als wenn sie in einer Talgemeinde bauen. Das liegt einfach hier an der Nebellage, an der Luftfeuchtigkeit, was maßgeblich die Erträge bestimmt“ (A6).*

Niedrige Jahresdurchschnittstemperaturen erhöhen die Funktionsfähigkeit der Anlagen (A6).

Ausgehend von der Theorie der Diffusion von Innovationen und vorausgehenden Studien zur Charakterisierung von PV-Haushalten, wurde auch in der Regressionsanalyse angenommen, dass die Verteilung bestimmter Haushalts-Typen die räumlichen Unterschiede in der Anzahl an PV-Anlagen beeinflusst. Gemeinden mit einem höheren Anteil an Familien haben statistisch signifikant mehr PV-Anlagen (vgl. Abschnitt 6.4.2.2). Einige PV-Unternehmer meinen dagegen, dass eine eindeutige Charakterisierung der Personen, die sich für PV interessieren, heute nicht mehr möglich ist. Die Innovatoren und Early Adopters waren zunächst vor allem Beamte und Lehrer, die PV-Anlagen zur Geldanlage und aus Umweltschutzgründen installierten (A2). Mittlerweile sind unter den Kunden jedoch alle Alters-, Einkommens- und Berufsgruppen vertreten (A2, A3, A6).

Die Bedeutung der Anzahl landwirtschaftlicher Betriebe zur Erklärung der räumlichen Nutzungsunterschiede von PV wurde bereits in Abschnitt 6.4.2.2 identifiziert. Je höher die Anzahl an Betrieben mit Viehhaltung pro Gemeinde, desto höher ist die Anzahl an PV-Anlagen. Auch in den Interviews wurde die besondere Rolle der Landwirte für die PV-Diffusion betont und dies häufig als Ursache für die große Anzahl an PV-Anlagen in ländlichen Gemeinden herangezogen (vgl. Abschnitt 7.1.2). Die hohe Verfügbarkeit von Dachflächen ermöglicht die Installation von großen, teilweise auch von mehreren Anlagen, die wiederum die Sichtbarkeit von PV in der Region erhöhen und Impulse für die Installation von weiteren Anlagen in der Nachbarschaft geben können (A4, A11, A13). In städtischen Gebieten fehlen dagegen geeignete Gebäude, da viele Dachflächen zu klein und verwinkelt sind und viele Menschen zur Miete wohnen, so dass die Möglichkeit zur Installation einer Anlage auf dem eigenen Hausdach häufig nicht gegeben ist (A15).

Als entscheidend für die dynamische PV-Entwicklung in der Region wird die Präsenz einiger Akteursgruppen genannt, die den Diffusionsprozess aktiv vorangehen haben (vgl. MADLENER und BACHHIESL 2007). Die Bedeutung und der tatsächliche Einfluss der einzelnen Akteursgruppen auf die Diffusion von PV-Anlagen sind zwar kaum quantifizierbar und eine umfassende räumliche Darstellung ist nicht möglich. Die Experteninterviews geben jedoch darüber Aufschluss, welche Akteure die Funktion von Change Agents einnahmen und durch ihr Engagement vor Ort die lokale oder regionale Clusterung von PV-Anlagen beeinflusst haben (vgl. auch Abschnitt 7.1.2).

In Abschnitt 7.1.2 wurde bereits die Rolle der Energieagenturen für die Diffusion von PV-Anlagen betont, deren Engagement eine Ausstrahlung im ganzen Landkreis, aber vor allem in der ansässigen und den umliegenden Gemeinden hat. Besonders deutlich wird dies durch das seit 2002 in Wolpertshausen bestehende Energiezentrum. Die aktive Förderung der PV-Diffusion und die Einzigartigkeit des Projekts „Solar Hohenlohe Aktiv“ haben zur Verbreitung von PV-Anlagen in der Gemeinde und dem Umland beigetragen. So beschreibt ein Bürgermeister des Landkreises Schwäbisch Hall:

*„In unserem Landkreis ist [die hohe Anzahl an PV-Anlagen] bedingt durch die Betreuung, Werbung und eigene Maßnahmen der Wirtschaftsförderungsgesellschaft und der Energieagentur. Die haben das sehr stark in den öffentlichen Fokus gerückt. Auch durch den Bau eigener Anlagen haben sie das Thema in aller Munde gebracht“ (A16).*



Da die Energieagentur Main-Tauber erst seit 2008 besteht, spielte sie für den Diffusionsprozess im Main-Tauber-Kreis in den ersten Jahren keine Rolle (A7).

Neben den Energieagenturen waren es in einzelnen Gemeinden auch die Energie- oder Solarvereine, die Informationen über PV verbreiteten und den Diffusionsprozess anstießen (A5, A6, A13) (vgl. Abschnitt 7.1.2). Die Aufgeschlossenheit von Bürgermeistern gegenüber dem Thema PV und die aktive Unterstützung des Prozesses in ihrer Gemeinde wird auch für die räumlichen Unterschiede in der PV-Diffusion verantwortlich gemacht (A6, A7, A15) (vgl. Abschnitt 7.1.2).

Neben dem politischen Engagement der genannten Akteure wird die Präsenz von PV-Unternehmen für die lokale oder regionale PV-Diffusion betont (A1, A7, A15). So haben sich große Firmen wie Novatech oder Taubersolar durch ihre langjährige Tätigkeit in der Region einen Markt erarbeitet und viele Anlagen im Umland verkauft (vgl. Abschnitt 7.1.2). Auch wird die Bedeutung aktiver Elektroinstallateure für die Verbreitung von PV in einer Gemeinde hervorgehoben:

*„Was [die Diffusion von PV] mit Sicherheit gefördert hat, war, wenn aktive Installateure in der näheren Umgebung waren, weil die natürlich für sich Werbung gemacht haben“ (A11).*

Fast alle Interviewpartner wiesen auf die besondere Rolle der Maschinenringe für die PV-Diffusion in der Region hin, die v.a. für den Verkauf von Anlagen an die Landwirte verantwortlich sind (A2, A3, A4, A5, A6, A8, A13, A15, A16). Besonders im Landkreis Schwäbisch-Hall hat dies die hohe Diffusion von PV gefördert (A6, A8) (vgl. Abschnitt 7.1.2). Die Banken tragen dagegen erst seit ca. 2007 mit speziellen Finanzierungskonzepten von PV-Anlagen zu einer höheren Attraktivität von PV in der Region bei und können somit nicht die räumlichen Unterschiede in der Diffusion seit dem Jahr 2000 erklären (vgl. Abschnitt 7.1.2). Die Netzbetreiber stehen PV eher zurückhaltend gegenüber, können den Bau von Anlagen < 30 kWp aber nicht verhindern (vgl. Abschnitt 7.1.2). Die Zugehörigkeit zu einem Netzgebiet ist also nicht ausschlaggebend für die räumlichen Unterschiede in der PV-Nutzung.

Die einzelnen Akteure handeln jedoch nicht isoliert voneinander. Als besonders förderlich für die PV-Diffusion wird eine enge Verflechtung der Akteure betrachtet, da dies den Kommunikationsprozess beschleunigt. Dort, wo Netzwerke zwischen Politik, örtlichen Handwerkern, PV-Unternehmern und Bürgervereinen bestehen, äußert sich dies auch in einer höheren Anzahl an PV-Anlagen (A6). Es wird betont, dass im ländlichen Raum ein engerer Kontakt zwischen Bürgern und Kommune besteht und auch die Bürger untereinander stärker kommunizieren (A12, A15). Es existieren also häufig engere Nachbarschaftsverhältnisse, die den Austausch über PV erleichtern und die Diffusion fördern (vgl. Abschnitt 7.1.4).

Über die Bedeutung der Grenzlage zu Bayern bestehen unterschiedliche Meinungen. Ein PV-Unternehmer und ein Netzbetreiber beschreiben, dass besonders in Franken ein intensiver Austausch über die Grenze besteht und die Aktivitäten der Maschinenringe in Bayern auch nach BW ausstrahlen (A11, A15). Demgegenüber meinen ein anderer PV-Unternehmer und ein Bürgermeister aus dem Landkreis Schwäbisch-Hall, dass die Entwicklung in der Region rein endogen ist und allein die Akteure im Landkreis für die Diffusion verantwortlich sind (A6, A16).

Der Einfluss des Nachbarschaftseffekts auf die Diffusion und die Ausbildung räumlicher Unterschiede in der PV-Nutzung wurde von den Interviewpartnern mehrfach erwähnt und wird nun im nächsten Kapitel genauer erläutert.

#### 7.1.4 Die Bedeutung des Nachbarschaftseffekts

Bereits in den quantitativen Analysen auf Gemeindeebene wurde festgestellt, dass Gemeinden, die in räumlicher Nähe zueinander liegen, ähnlich viele PV-Anlagen aufweisen (vgl. Abschnitt 6.3). In den Regressionsanalysen zeigt sich, dass die Entfernung zwischen den Gemeinden – neben anderen Faktoren – einen statistisch signifikanten Einfluss auf die Verteilung der PV-Anlagen hat (vgl. Abschnitt 6.4). Die Frage ist nun, ob der Nachbarschaftseffekt auch aus Sicht der Experten existiert und ob diese auch einen Einfluss auf die Diffusion von PV-Anlagen festgestellt haben.

In den Interviews sprachen die Experten die Bedeutung des Nachbarschaftseffekts für die Diffusion entweder von selbst an oder äußerten sich positiv dazu. Aus den Beobachtungen eines Elektroinstallateurs ist für viele Privathaushalte die Mundpropaganda die wichtigste Informationsquelle. Die Erfahrungswerte der Nachbarn sind wertvolle Informationen, die die Entscheidungsfindung unterstützen können (vgl. 3.1.2.1) (A3, A7).

*„Denn wenn man gesehen hat, dass es funktioniert, wird man einen Impuls kriegen, darüber nachzudenken, auch selbst etwas zu machen“ (A7).*

Bei der Montage der Anlagen kommen auch häufig Nachbarn auf die Baustelle und erkundigen sich über die Möglichkeiten der Installation einer Anlage auf dem eigenen Hausdach (A3).

Wichtig ist aber auch die reine Sichtbarkeit der PV-Anlagen, die für viele Personen den Anstoß gibt, sich selbst mit dem Thema zu beschäftigen, *„das Sehen und Nachmachen“* (A15). Aus einem Ort berichtet ein PV-Unternehmer:

*„Wir haben dort mittlerweile fünf Anlagen in Form von Gemeinschaftsanlagen gebaut und gut 30 Anlagen auch auf privaten Wohnhäusern. Die Bevölkerung hat das registriert: „Da ist was im Gange. Das könnte auch was für mein Wohnhaus sein.““ (A6).*

Durch eine hohe Anzahl an Anlagen im Ort sehen die Nachbarn, dass die Technologie funktioniert und sich die Investition lohnt (A3).

Einige Interviewpartner betonen auch den Neidfaktor gegenüber dem Nachbarn, der für die Entscheidung zum Kauf einer Anlage eine Rolle spielt:

*„Mensch der Nachbar hat auch eine und ich hab keine. Da muss ich was machen“ (A5).*

Ein Netzbetreiber beschreibt:

*„Man hat den Eindruck, dass v.a. in kleineren Ortschaften der eine es dem anderen neidet und dann noch eine größere Anlage drauf machen muss“ (A14).*

Auch ein anderer Netzbetreiber beobachtet, dass der Diffusionsprozess häufig durch die Kommunikation mit den Nachbarn angestoßen wird:

*„Es gibt noch einen Effekt: Wenn jemand eine Anlage hat, dann erzählt er, wie gut das ist, was er an Vergütung bekommt und wie sich das rechnet. Dann sagt der Nachbar natürlich auch: ‚Wenn der das kann, kann ich das schon lang!‘ und ‚Meine Anlage soll noch größer sein als die vom Nachbarn!‘. Wir haben festgestellt, dass in einer Ortschaft jeder eine Anlage hat und eine größere will und in einer anderen hat keiner eine Anlage. Auch wenn Ortschaften relativ nah sind. Da spielen dann soziale Effekte eine wesentliche Rolle“ (A11).*

Bei der Investitionsentscheidung ist also nicht nur die günstige Form der Geldanlage entscheidend, sondern auch soziales Prestige.

*„Da wird die PV-Anlage nicht nur aus Rendite-Aspekten gekauft, sondern da ist sie auch Statussymbol. Da will man es dann auch haben, weil es der Nachbar hat. Und der Nachbar erzählt natürlich gern darüber, dass die Investition toll war“ (A8).*

Die Interviewauszüge zeigen, dass der Nachbarschaftseffekt auch real existiert. Hervorgehoben wird besonders die Bedeutung der Kommunikation mit den direkten Nachbarn (A3, A5, A7, A8, A11, A14), aber auch die Sichtbarkeit der Anlagen im Ort oder in den Nachbargemeinden, regt zur Beschäftigung mit dem Thema PV an (A2, A13, A15). Aus Beobachtungen der Experten hat der Nachbarschaftseffekt also einen deutlichen Einfluss auf die Diffusion innerhalb einer Gemeinde und über die Sichtbarkeit der Anlagen auch über die Gemeindegrenzen hinaus.

Im nächsten Kapitel wird dargestellt, welche Faktoren die individuelle Adoptionsentscheidung in privaten Haushalten beeinflussen und warum es zu räumlichen Unterschieden in der PV-Nutzung kommen kann.

## **7.2 Einflussfaktoren auf die PV-Diffusion am Beispiel der Gemeinden Creglingen und Dörzbach**

Die Ergebnisse der Experteninterviews zeigen, dass einzelne Akteursgruppen einen Einfluss auf die PV-Diffusion in der Region Heilbronn-Franken haben. Mit Hilfe einer Haushaltsbefragung sollten darauf aufbauend die Einflussfaktoren auf die Adoptionsentscheidung privater Haushalte im Detail untersucht werden. Im Vordergrund steht zum einen die Frage, was die PV-Eigentümer von den Nicht-Eigentümern unterscheidet und zum anderen, was die Ursachen für Unterschiede in der PV-Nutzung zwischen zwei strukturell ähnlichen Gemeinden sind.

Zur Untersuchung der räumlichen Unterschiede in der PV-Nutzung wurde eine Haushaltsbefragung in zwei Gemeinden der Region Heilbronn-Franken durchgeführt (vgl. Abschnitt 7.2.1 und 7.2.2). Die Ergebnisse der Befragung werden in Abschnitt 7.2.3 und 7.2.4 vorgestellt.

## 7.2.1 Auswahl der Gemeinden für die Haushaltsbefragung

Neben dem Vergleich von PV-Eigentümern mit Nicht-Eigentümern soll mit Hilfe der Haushaltsbefragung untersucht werden, warum sich Gemeinden in der Intensität der PV-Nutzung unterscheiden. Für die Befragung wurden zwei Gemeinden ausgewählt, die zwar strukturell ähnliche Voraussetzungen für die Installation von PV-Anlagen haben, sich aber dennoch in der Anzahl an PV-Anlagen pro Einwohner unterscheiden. Über die Auswertung der Befragungsdaten können schließlich weitere Faktoren aufgedeckt werden, die für die räumlichen Unterschiede in der PV-Nutzung verantwortlich sind.

Im ersten Schritt wurde eine Korrelationsanalyse durchgeführt, um den Zusammenhang zwischen sozioökonomischen Variablen und der PV-Nutzung in den Gemeinden der Region Heilbronn-Franken zu erörtern. In Tab. 7 sind die Korrelationskoeffizienten der Variablen dargestellt, die mit der Variable „Anzahl an PV-Anlagen pro Einwohner“ („PV/EW“) hoch signifikant korrelieren<sup>17</sup>. Demnach sind in einer Gemeinde mehr PV-Anlagen pro Einwohner installiert, wenn die Gemeinde einen hohen Anteil an Familien (Bevölkerungsanteil bis 18 Jahre) und an Einfamilienhäusern (EFH) aufweist. Je höher die Anzahl an PV/EW, desto höher ist auch der Anteil an Beschäftigten mit abgeschlossener Lehre und der Anteil an landwirtschaftlichen Betrieben mit Viehhaltung. Ein hoher Anteil an Mehrfamilienhäusern (MFH) und Akademikern (Beschäftigte mit (Fach-) Hochschulabschluss) wirkt sich dagegen negativ auf die PV-Nutzung aus.

Tab. 7: Korrelationen der Cluster-Variablen

| Cluster-Variablen  | Spearman<br>Korrelationskoeffizienten<br>mit der Variablen: PV-<br>Anlagen/Einwohner |
|--|--|
| Bevölkerungsanteil bis 18 Jahre  | 0,387**  |
| Anteil Einfamilienhäuser an Wohngebäuden   | 0,450**  |
| Anteil Mehrfamilienhäuser an Wohngebäuden  | -0,570**   |
| Anteil sozialversicherungspflichtig Beschäftigter mit abgeschlossener Lehre                  | 0,461**  |
| Anteil sozialversicherungspflichtig Beschäftigter mit Fachhochschul- oder Hochschulabschluss | -0,391**   |
| Landwirtschaftliche Betriebe mit Viehhaltung (Rinder, Schweine, Schafe) pro Einwohner        | 0,769**  |

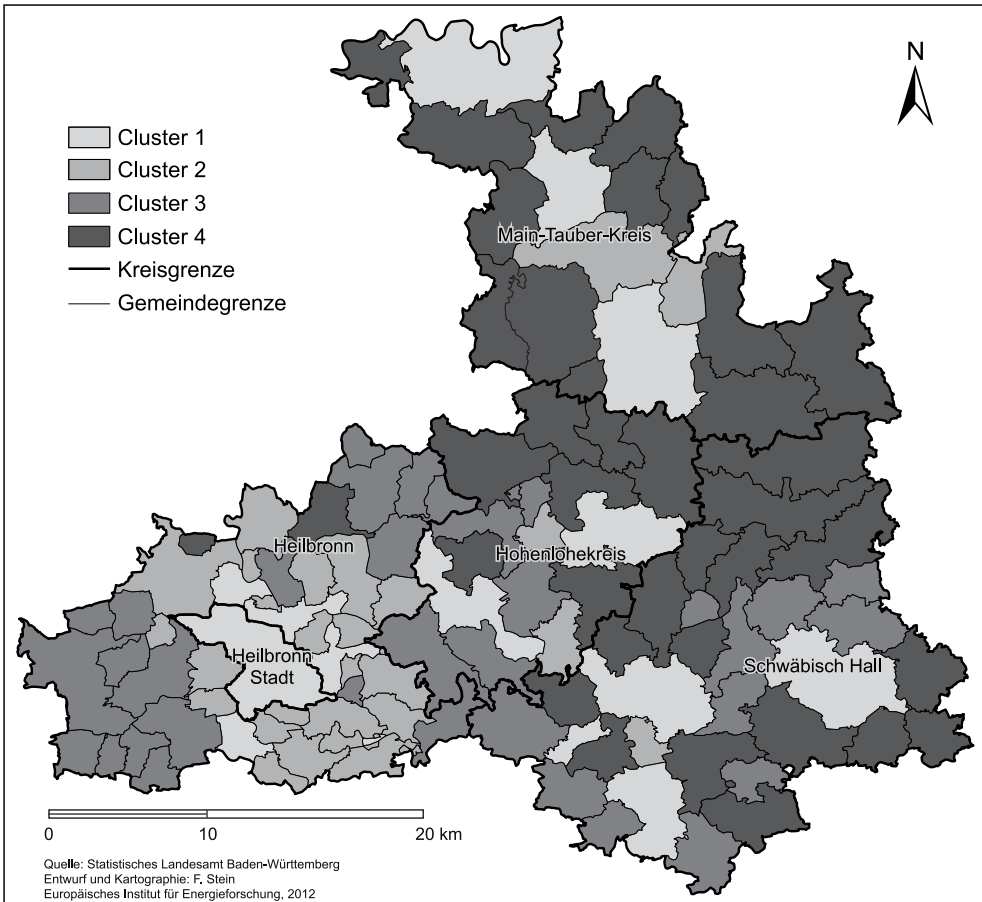
\*\*  $p = 0,01$  (2-seitig)

Quelle: Eigene Berechnung

<sup>17</sup> Korrelationskoeffizient nach Spearman, da keine Normalverteilung der Variablen vorlag, mit einem Signifikanzniveau von 0,01 (zweiseitig). Ausgewählt wurden Variablen mit einem Korrelationskoeffizienten  $> |0,3|$ . Einige Variablen wurden aufgrund hoher Multikollinearität ausgeschlossen.

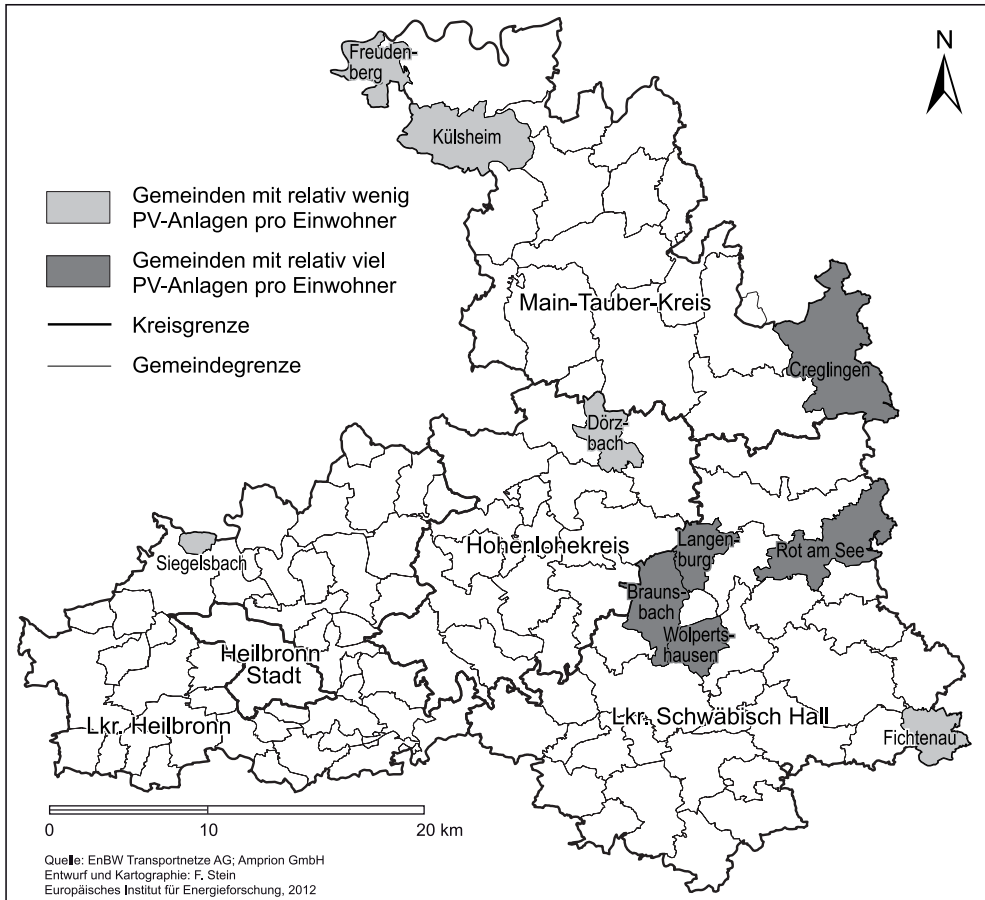
Im zweiten Schritt wurde auf Basis der in der Korrelationsanalyse identifizierten Variablen eine Clusteranalyse durchgeführt<sup>18</sup>. Karte 8 zeigt die Einteilung der Gemeinden Heilbronn-Frankens in vier Cluster. Für die Befragung sollten schließlich zwei Gemeinden ausgewählt werden, die strukturell ähnliche Voraussetzungen für die PV-Nutzung haben, d.h. sich in einem Cluster befinden, sich jedoch trotzdem in der PV-Nutzungsintensität („PV/EW“) signifikant unterscheiden. Durch die Interpretation der Ausprägung der Clustermerkmale wird deutlich, dass sich Gemeinden aus Cluster 4 besonders für die Befragung eignen, da sie günstige Eigenschaften für die PV-Nutzung aufweisen: überdurchschnittlich hoher Anteil an Familien, EFH, Beschäftigten mit abgeschlossener Lehre und Viehhaltungsbetrieben.

Karte 8: Clustereinteilung der Gemeinden in Heilbronn-Franken



<sup>18</sup> Hierarchische Clusteranalyse mit Ward-Verfahren. Distanzmaß: quadrierte euklidische Distanz.

Karte 9: Auswahl der Gemeinden für die Haushaltsbefragung



In Karte 9 sind jeweils die fünf Gemeinden mit der höchsten und der niedrigsten Anzahl an PV/EW von Cluster 4 dargestellt. Als Gemeinde mit hoher PV-Nutzung wurde Creglingen (CR) aus dem Main-Tauber-Kreis ausgewählt, da in dieser Gemeinde bereits einige Experteninterviews durchgeführt wurden, so dass sich die Ergebnisse der Befragung besser interpretieren lassen. Bei den Gemeinden mit einer niedrigen Anzahl an PV/EW fiel die Wahl auf Dörzbach (DÖ) im Hohenlohekreis, da diese Gemeinde unter den fünf Gemeinden mit niedriger PV-Nutzung den höchsten Anteil an Viehhaltungsbetrieben aufweist und damit Creglingen strukturell am stärksten ähnelt.

## 7.2.2 Befragung, Rücklaufquote und Auswertungsmethodik

Die schriftliche Haushaltsbefragung wurde mit Hilfe eines standardisierten Fragebogens durchgeführt und fand im Juni 2010 statt. Der Fragebogen umfasste die Bereiche Energieverhalten und Einstellungen zu PV sowie Fragen zum Informations- und Kommunikationsverhalten. Zusätzlich wurden die Daten zu PV-Anlagen und die sozioökonomischen Merkmale der Haushalte erfasst (s. Fragebogen ANHANG 4, Abb. 42).

Die Befragung stellte eine Totalerhebung über alle 1700 Haushalte in Creglingen und alle 869 Haushalte in Dörzbach dar, so dass insgesamt 2529 Fragebögen in Papierform verteilt wurden. Es bestand die Möglichkeit, den Fragebogen entweder in Papierform auszufüllen und mit dem beigefügten Antwortkuvert zurückzuschicken oder über die Online-Version zu antworten.

Die Rücklaufquote betrug in beiden Gemeinden ca. 10 %, was einer Anzahl von 246 zurückgesendeten Fragebögen entspricht (vgl. Tab. 8). 35 % (d.h. 85 Stück) der Fragebögen wurden von PV-Eigentümern und 65 % (d.h. 161 Stück) von Nicht-Eigentümern ausgefüllt. Die PV-Eigentümer werden in der Befragung jedoch besser repräsentiert als die Nicht-Eigentümer. So lag die Rücklaufquote bei den PV-Eigentümern insgesamt bei 23,5 %, wobei deutliche Unterschiede zwischen den Gemeinden bestehen: In Creglingen nahmen 19,4 % der Haushalte mit PV-Anlagen an der Befragung teil, gegenüber 52,2 % in Dörzbach. Bei Nicht-Eigentümern lag die Rücklaufquote allerdings nur bei 7,3 %. Das höhere Antwortverhalten von PV-Eigentümern ist auf das größere Interesse der PV-Eigentümer am Befragungsthema zurückzuführen und bestätigt auch die Ergebnisse von JAGER (2006, S. 1938).

Tab. 8: Rücklaufquoten der Haushaltsbefragung

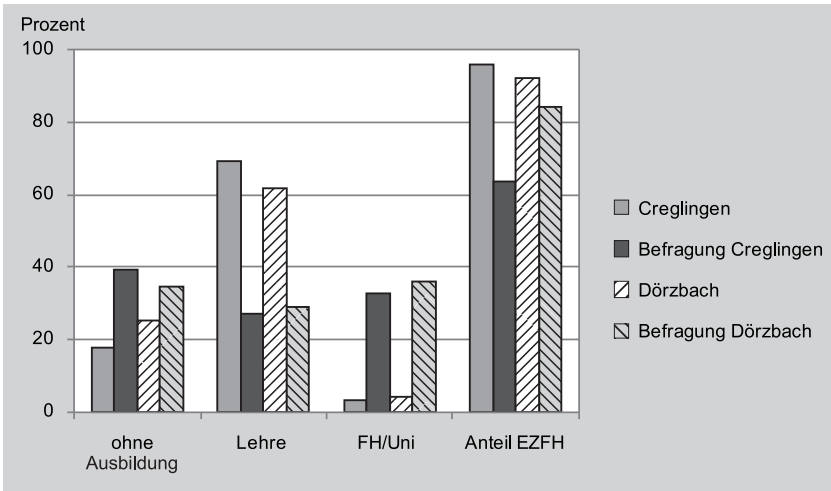
|            | Verteilte Fragebögen    | Rücklauf Papier | Rücklauf Internet | Rücklauf gesamt | Rücklaufquote         |
|------------|-------------------------|-----------------|-------------------|-----------------|-----------------------|
| Insgesamt  | 2569                    | 175             | 71                | 246             | 9,6 %                 |
| Creglingen | 1700                    | 113             | 48                | 161             | 9,5 %                 |
| Dörzbach   | 869                     | 62              | 23                | 85              | 9,8 %                 |
|            | Installierte PV-Anlagen | Rücklauf Papier | Rücklauf Internet | Rücklauf gesamt | Rücklaufquote PV      |
| Insgesamt. | 361                     | 64              | 21                | 85              | 23,5 %                |
| Creglingen | 315                     | 45              | 16                | 61              | 19,4 %                |
| Dörzbach   | 46                      | 19              | 5                 | 24              | 52,2 %                |
|            | HH ohne PV-Anlagen      | Rücklauf Papier | Rücklauf Internet | Rücklauf gesamt | Rücklaufquote KEIN-PV |
| Insgesamt. | 2208                    | 111             | 50                | 161             | 7,3 %                 |
| Creglingen | 1385                    | 68              | 32                | 100             | 7,2 %                 |
| Dörzbach   | 823                     | 43              | 18                | 61              | 7,4 %                 |

Quelle: EnBW Transportnetze AG 2011, Energy Map 2011 und eigene Erhebung

Um Aussagen über die Repräsentativität der Befragung treffen zu können, ist zu überprüfen, ob das Bevölkerungsspektrum in der Befragung repräsentiert wird. Ein Vergleich der Bildungsabschlüsse zeigt, dass Personen ohne abgeschlossene Aus-

bildung in beiden Gemeinden leicht überrepräsentiert sind. Deutlich überrepräsentiert sind Personen mit (Fach-)Hochschulabschluss; unterrepräsentiert sind dagegen Personen mit abgeschlossener Lehre. Abb. 21 zeigt jedoch auch, dass Haushalte aus allen Bildungsklassen vertreten sind. Haushalte, die in EZFH leben, werden durch die Befragung relativ gut abgebildet.

Abb. 21: Repräsentativität der Befragungsergebnisse: Berufsausbildung und Wohnverhältnisse



Quelle: StaLa BW(2010) und eigene Erhebung

In den Auswertungen der Befragungsergebnisse gilt es sowohl herauszufinden, welche Faktoren die Adoptionsentscheidung beeinflussen (Abschnitt 7.2.3) als auch, welche Ursachen für die Unterschiede in der PV-Nutzung in Creglingen und Dörzbach verantwortlich sind (Abschnitt 7.2.4). Ziel ist deshalb, mit Hilfe von statistischen Tests zu erfassen, ob sich das Antwortverhalten sowohl von PV-Eigentümern und Nicht-Eigentümern als auch der Einwohner von Creglingen und Dörzbach signifikant unterscheidet. Da keine Normalverteilung der erhobenen Merkmale vorliegt, wurde für die Auswertung der ordinal und metrisch skalierten Daten der U-Test nach Mann-Whitney zum Vergleich zweier unabhängiger Stichproben berechnet (Bortz und Schuster 2010, S. 130). Zum Vergleich des Antwortverhaltens bei nominal skalierten Daten wurden Kreuztabellen erstellt und die Gruppenunterschiede mittels Chi<sup>2</sup>-Test auf deren Signifikanz überprüft (Bortz und Schuster 2010, S.137). Die Auswertungen des Fragebogens mittels U-Test und Kreuztabellen werden nun in den folgenden Kapiteln vorgestellt. Die Ergebnisse des U-Tests befinden sich im Anhang (vgl. ANHANG 4, Tab. 20).



### 7.2.3 Einflussfaktoren auf die individuelle Adoptionsentscheidung

Nach der Diffusionstheorie wird der Adoptionsprozess von produkt-, adopter- und umweltspezifischen Eigenschaften geleitet (vgl. Abschnitt 3.1.2). Bevor der Frage nachgegangen wird, warum räumliche Unterschiede in der PV-Nutzung existieren, ist es interessant herauszufinden, welche Personen sich für die Installation entscheiden und wie sich diese von Nicht-PV-Eigentümern unterscheiden. Als adopterspezifische Eigenschaften werden sowohl die sozioökonomischen Unterschiede zwischen PV-Eigentümern und Nicht-Eigentümern analysiert, als auch die Unterschiede in Einstellungen und Energieverhalten sowie dem Informations- und Kommunikationsverhalten (vgl. JAGER 2006; KEIRSTEAD 2007; CLAUDY et al. 2011)<sup>19</sup>. Die Bedeutung der Kommunikation im Diffusionsprozess und die Rolle einzelner Akteure wurden bereits in den Experteninterviews aufgedeckt. In diesem Abschnitt wird nun überprüft, ob die Bedeutung der Innovatoren und Change Agents auch durch die Haushaltsbefragung bestätigt wird.

#### Sozioökonomische Unterschiede

Die Gruppenvergleiche zwischen PV-Eigentümern und Nicht-Eigentümern zeigen, dass PV-Haushalte signifikant *jünger* sind (46 vs. 51 Jahre) und signifikant häufiger in *Familien* leben (Frage 19 und 22): in 79 % der befragten PV-Haushalte sind Kinder vorhanden gegenüber 62 % in Haushalten ohne PV (vgl. Anhang 4, Tab. 21). Die Ergebnisse entsprechen der Diffusionstheorie, wonach jüngere Personen innovationsfreudiger sind. Die Tatsache, dass PV-Anlagen häufiger in Haushalten mit Kindern auftreten, lässt sich darauf zurückführen, dass Familien stärker sozial gefestigt und eher bereit sind, größere Zukunftsinvestitionen zu tätigen als Single- oder Paar-Haushalte.

Bei einem Vergleich der Bildungsabschlüsse und der Haushaltsnettoeinkommen zwischen PV-Eigentümern und Nicht-Eigentümern lassen sich entgegen der Diffusionstheorie jedoch keine signifikanten Unterschiede feststellen (Frage 20 und 21). Hierfür spricht, dass sich die PV-Diffusion mittlerweile schon im „Majority“-Stadium befindet und somit bereits das gesamte Bevölkerungsspektrum unter den PV-Adoptoren vertreten ist. Das Einkommen ist vermutlich kein Hindernis mehr für die Anschaffung, da verschiedene Möglichkeiten der Kreditfinanzierung bestehen und eine PV-Anlage eine sichere und rentable Form der Geldanlage darstellt.

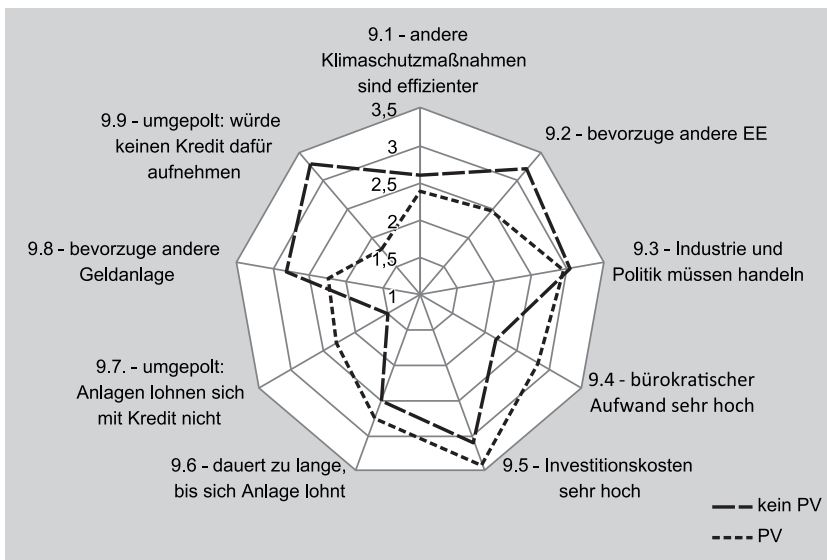
PV-Eigentümer und Nicht-Eigentümer unterscheiden sich auch bzgl. der Wohnverhältnisse (Frage 12): Unter PV-Eigentümern sind signifikant häufiger *Hauseigentümer* vertreten (93 % vs. 81 %), was darauf zurückzuführen ist, dass die Verfügbarkeit einer eigenen Dachfläche die Voraussetzung für die Installation ist, soweit nicht die Form einer Beteiligungsanlage gewählt wird (vgl. ANHANG 4, Tab. 22). Bei einem Vergleich der Gebäudetypen (Frage 13), in denen die Befragten wohnen, fällt auf, dass signifikant mehr PV-Eigentümer in *landwirtschaftlichen Wohngebäuden* wohnen. So wohnen 36 % der befragten PV-Eigentümer in Bauernhäusern gegenüber 12 % der Nicht-Eigentümer (vgl. ANHANG 4, Tab. 23).

<sup>19</sup> Ausführliche Auswertungen der einzelnen Fragen des Fragebogens finden sich bei STEIN (2011).

## Einstellungen und Energieverhalten

Im nächsten Schritt gilt es herauszufinden, ob sich PV-Eigentümer und Nicht-Eigentümer in ihren Einstellungen gegenüber PV und im Energieverhalten unterscheiden (Frage 9). Die Einstellungsmessung erfolgte über eine Likert-Skala, in der der Wert „1“ für „trifft gar nicht zu“ und der Wert „5“ für „trifft voll zu“ steht. Abb. 22 stellt die PV-Eigentümer den Nicht-Eigentümern gegenüber. Signifikante Unterschiede im Antwortverhalten ergeben sich v.a. bei den Fragen zur Finanzierung: Nicht-Eigentümer sind seltener der Meinung, dass sich PV-Anlagen bei 100%-Kreditfinanzierung lohnen (Frage 9.7) und sind weniger bereit, für PV-Anlagen einen Kredit aufzunehmen (Frage 9.9). Sie bevorzugen eher andere Geldanlagen (Frage 9.8) und andere Formen der Erneuerbaren Energien (Frage 9.2). Signifikante Unterschiede ergeben sich auch bei Frage 9.4: PV-Eigentümer bewerten im Vergleich zu Nicht-Eigentümern den bürokratischen Aufwand als schwerwiegender, was darauf zurückzuführen ist, dass PV-Eigentümer bereits Erfahrung mit dem Installationsprozess gemacht haben und Nicht-Eigentümer den Aufwand nicht gleichermaßen einschätzen können.

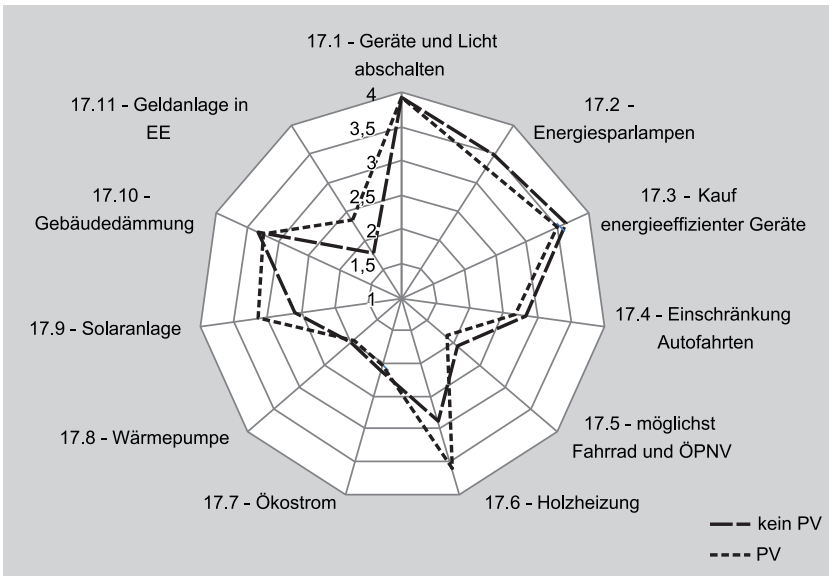
Abb. 22: Einstellungen gegenüber PV – PV-Eigentümer vs. Nicht-Eigentümer (Frage 9)



Quelle: Eigene Erhebung

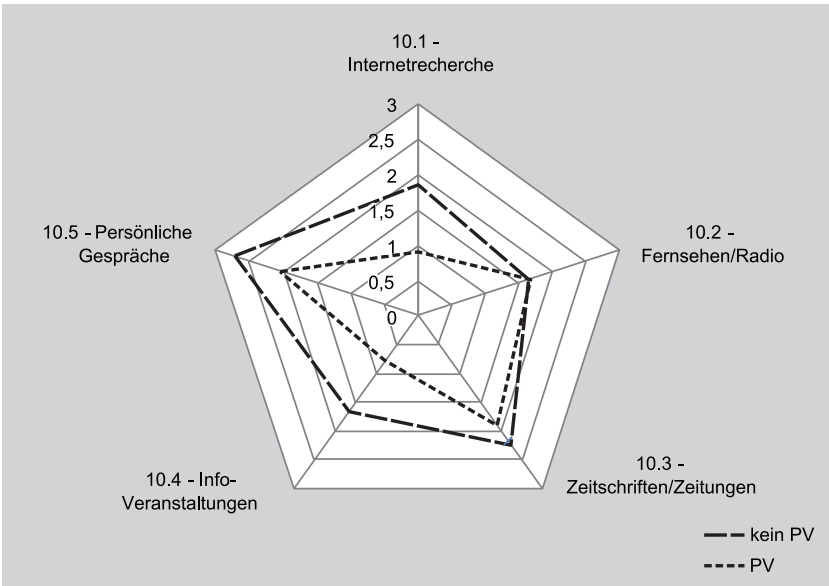
Bei einem Vergleich des Energieverhaltens treten signifikante Unterschiede bei drei Antworten auf (Frage 17). Auch hier wurde das Verhalten wieder über eine Likert-Skala gemessen von „kommt für mich nicht in Frage“ (Wert = 1) bis „mache bzw. habe ich bereits“ (Wert = 4). PV-Eigentümer heizen häufiger mit Holz oder interessieren sich stärker dafür (Frage 17.6). Das gleiche gilt für Solarthermieanlagen (17.9). Zudem legen sie häufiger Geld in Erneuerbare Energien an (17.11) (s. Abb. 23).

Abb. 23: Energieverhalten der PV-Eigentümer vs. der Nicht-Eigentümer (Frage 17)



Quelle: Eigene Erhebung

Abb. 24: Genutzte Informationsquellen – PV-Eigentümer vs. Nicht-Eigentümer (Frage 10)



Quelle: Eigene Erhebung

## Informations- und Kommunikationsverhalten

Bevor es zur tatsächlichen Adoptionsentscheidung kommt, müssen Informationen über PV-Anlagen eingeholt werden, die das Wissen über die neue Technologie vermehren und erlauben, den persönlichen Nutzen einer solchen Investition einzuschätzen. Als Informationsquelle dienen zunächst die Massenmedien; um sich endgültig von der Anschaffung zu überzeugen, werden häufig Erfahrungswerte durch persönliche Gespräche mit Nachbarn oder Bekannten herangezogen, die bereits eine Anlage besitzen (vgl. Abschnitt 3.1.3.1). In Abb. 24 wird deutlich, dass PV-Eigentümer fast alle Informationsquellen besser nutzen, um sich über PV zu informieren, als Nicht-Eigentümer (Frage 10) (Werte der Likert-Skala: „gar nicht“ = 0 bis „sehr viel“ = 3). Hoch signifikante Unterschiede ergeben sich bei der Häufigkeit von Internetrecherchen, dem Besuch von Informationsveranstaltungen und bei persönlichen Gesprächen über PV. Letzteren wird insgesamt die höchste Bedeutung beigemessen (vgl. ANHANG 4, Tab. 20)

Bei besonders auffälligen oder sichtbaren Technologien spielt neben der persönlichen auch die unpersönliche Kommunikation eine Rolle: Allein die Wahrnehmung einer Vielzahl von Anlagen kann die eigene Investitionsentscheidung beeinflussen, da somit offensichtlich wird, dass sich die Anlagen lohnen (vgl. Abschnitt 3.1.3.1). In der Befragung zeigt sich, dass PV-Eigentümer aufmerksamer für PV-Anlagen sind, da sie signifikant mehr PV-Anlagen in ihrem Umfeld wahrgenommen haben (Frage 5). Zudem kennen sie auch signifikant mehr Anlagen-Besitzer persönlich (Frage 6) (vgl. ANHANG 4, Tab. 20). Da keine zeitliche Dynamik durch die Befragung erfasst werden konnte, geht daraus jedoch nicht hervor, ob die höhere Wahrnehmung und die höhere Anzahl persönlicher Kontakte auch Einfluss auf die Anschaffung hatten.

Das Kommunikationsverhalten wurde auch mit Rücksicht auf die Entfernung zu den Gesprächspartnern untersucht (Frage 11). Für die Häufigkeit der Kommunikation scheint es jedoch keine Rolle zu spielen, wie weit die Personen entfernt sind: Die Gesprächshäufigkeit ist nicht davon abhängig, ob die Person aus dem gleichen Ort, dem Nachbarort oder nicht aus der eigenen Gemeinde kommt (vgl. ANHANG 4, Tab. 24). Die Ergebnisse zeigen allerdings auch hier, dass PV-Eigentümer signifikant häufiger Gespräche über PV führen als Nicht-Eigentümer.

Eine Auswertung der wichtigsten Gesprächspartner zeigt, dass PV-Eigentümer die meisten Informationen über die PV-Branche erhalten: 47 % der PV-Eigentümer nennen Personen aus der PV-Branche als wichtigsten Gesprächspartner, gefolgt von Landwirten mit 41 % (Frage 14). Der Diffusionsprozess von PV-Anlagen wird also wesentlich durch die PV-Unternehmer vorangetrieben, die bereits in den Interviews als Change Agents identifiziert worden sind. Landwirte sind durch ihre Vorreiterrolle und ihre Erfahrungswerte sowohl für die PV-Eigentümer als auch für die Nicht-Eigentümer wichtige Kontaktpersonen (vgl. ANHANG 4, Tab. 25).

Durch einen Vergleich der PV-Eigentümer mit den Nicht-Eigentümern wurde aufgezeigt, in welchen Bereichen sich die zwei Gruppen unterscheiden. Gleichzeitig können somit nun Rückschlüsse auf die wesentlichen Faktoren gezogen werden, die die Adoptionsentscheidung beeinflussen. So eignen sich das Alter, die Familien- und die Wohnverhältnisse als Unterscheidungsmerkmale, da PV-Eigentümer signifikant

jünger sind, häufiger Kinder haben und über ein eigenes Haus verfügen. Einer der wichtigsten Gründe, der Nicht-Eigentümer von einer Anschaffung fern hält, ist deren geringe Bereitschaft zur Kreditfinanzierung. Ein weiterer möglicher Einflussfaktor ist das Umweltbewusstsein, wie es sich bei PV-Eigentümern durch ihre Affinität zu nachhaltigen Energiequellen wie Holz und Solarthermie, sowie zu Geldanlagen in erneuerbare Energien äußert.

Schließlich wird in der Diffusionstheorie das Informations- und Kommunikationsverhalten als entscheidender Einflussfaktor auf die Adoption hervorgehoben. Auch die Ergebnisse der Haushaltsbefragung zeigen, dass PV-Eigentümer durchweg besser über PV informiert sind und auch mehr über PV kommunizieren als Nicht-Eigentümer.

Nach der Analyse der Einflussfaktoren auf die PV-Adoption wird im nächsten Kapitel der Frage nachgegangen, warum sich zwei Gemeinden mit ähnlich günstigen Voraussetzungen für die Installation von PV-Anlagen dennoch in der PV-Nutzungsintensität unterscheiden.

#### **7.2.4 Ursachen für die Unterschiede in der PV-Nutzung in Creglingen und Dörzbach**

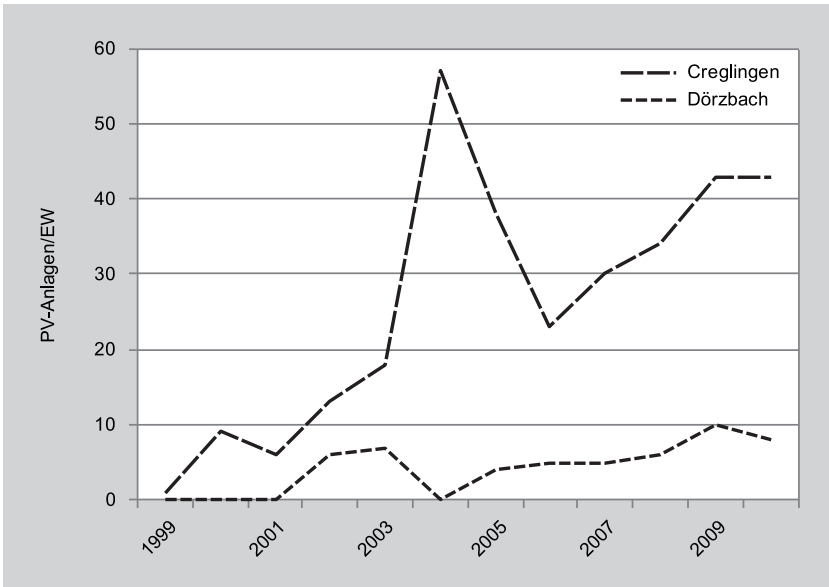
Creglingen und Dörzbach sind Gemeinden einer landwirtschaftlich geprägten Region und weisen auf den ersten Blick beide günstige Bedingungen für die Installation von PV-Anlagen auf. In Creglingen waren 2010 jedoch bereits 315 PV-Anlagen bis 30 kWp installiert, in Dörzbach dagegen nur 51 Anlagen (ENBW TRANSPORTNETZE AG 2011; ENERGY MAP 2011). Dies entspricht in Creglingen einer Anzahl von 65 PV/EW, in Dörzbach liegt die PV-Dichte bei 21 PV/EW, d.h. die PV-Nutzung ist in Creglingen ca. dreimal so hoch wie in Dörzbach.

Bei einem Vergleich der Diffusionsprofile der beiden Gemeinden werden die Unterschiede noch deutlicher (vgl. Abb. 25 und Abb. 26): In Creglingen wurde die erste Anlage bereits 1999 montiert, in Dörzbach setzte die Diffusion erst 2002 ein. Bis 2004 stieg die Anzahl an Anlagen in Creglingen stetig an, wobei allein im Jahr 2004 57 neue Anlagen hinzukamen. Nach einem Einbruch in 2005/2006 nahm die Anzahl an Neuinstallationen bis 2010 wieder zu. In Dörzbach wurden dagegen in keinem Jahr mehr als zehn Anlagen errichtet. Im Gegensatz zu Creglingen, wo bereits das Early Majority-Stadium der Diffusion erreicht zu sein scheint, befindet sich die Diffusion in Dörzbach vermutlich noch im Early Adopter-Stadium. Nun stellt sich die Frage, ob die Unterschiede in den Diffusionsprofilen sich auch in den Haushaltstypen widerspiegeln und somit Ursache für die räumlichen Unterschiede in der PV-Nutzung sein könnten.

#### **Vergleich der Haushaltstypen**

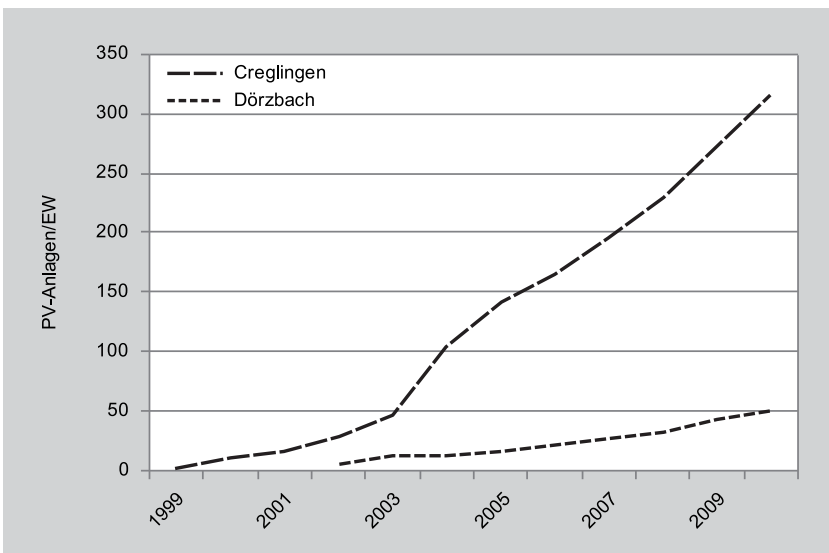
Ein Vergleich der sozioökonomischen Variablen liefert keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den befragten Haushalten der beiden Gemeinden. Weder beim Alter und den Familienverhältnissen noch bei Bildung und Einkommen unterscheiden sich die Haushalte von Creglingen und Dörzbach. Auch bei den Antworten zu den

Abb. 25: Adoptionskurven von Creglingen und Dörzbach



Quelle: EnBW Transportnetze AG (2011)

Abb. 26: Diffusionskurven von Creglingen und Dörzbach

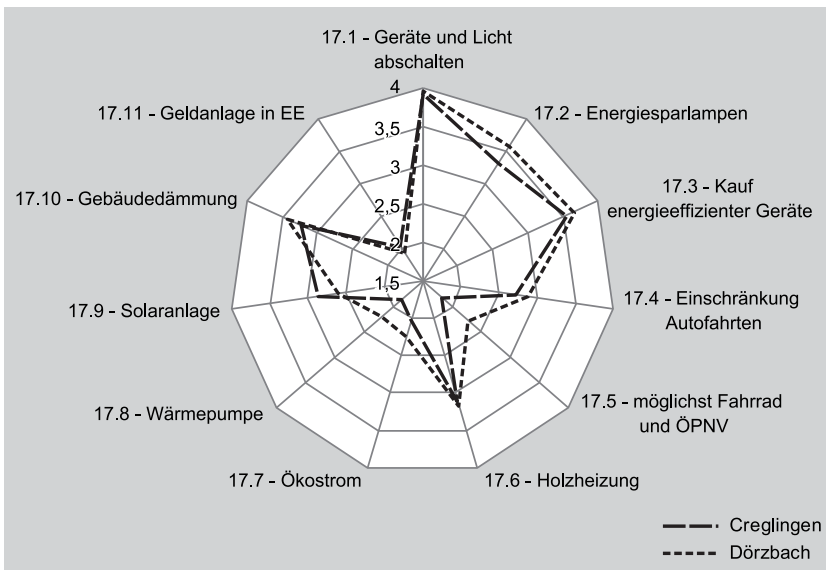


Quelle: EnBW Transportnetze AG (2011)

Einstellungen zu PV sind keine signifikanten Unterschiede erkennbar. Die gleichen Ergebnisse liefert ein Vergleich der PV-Eigentümer von Creglingen und Dörzbach. Die PV-Haushalte in Dörzbach weisen also allein durch die abgefragten Kriterien keine ausgeprägten „Early Adopter“-Eigenschaften auf (vgl. U-Test in ANHANG 4, Tab. 20).

Einzig bei den Fragen zum Energieverhalten zeigt sich, dass die Einwohner von Dörzbach umweltbewusster sind als die von Creglingen (s. Abb. 27). Sie verwenden signifikant häufiger Energiesparlampen (Frage 17.2), benutzen öfter das Fahrrad oder den ÖPNV (Frage 17.5) und haben relativ mehr Wärmepumpen als die Creglinger (Frage 17.8). Wärmepumpen sind ähnlich wie PV-Anlagen mit einem hohen Investitionsaufwand verbunden. Eine mögliche Erklärung für die geringe Anzahl an PV-Anlagen ist deshalb, dass die Einwohner von Dörzbach eine relativ höhere Präferenz für Wärmepumpen haben als die von Creglingen und damit weniger Budget für PV-Anlagen frei ist.

Abb. 27: Energieverhalten der EW von Creglingen vs. der EW von Dörzbach (Frage 17)



Quelle: Eigene Erhebung

### Vergleich der räumlichen Voraussetzungen für PV-Nutzung

Creglingen und Dörzbach wurden zwar dem gleichen Cluster zugeordnet, die Unterschiede zwischen den Gemeinden sind jedoch nicht allein durch die statistischen Daten der Clusteranalyse erfasst worden. Es ist also wahrscheinlich, dass in Creglingen räumliche Voraussetzungen vorliegen, die die Installation von PV-Anlagen zusätzlich begünstigen.

Ein Vergleich der Gebäudetypen zwischen den Gemeinden zeigt, dass in Creglingen mehr Befragte in Bauernhöfen leben als in Dörzbach (25 % vs. 12 %) (Frage 13). In Dörzbach gaben dagegen signifikant mehr Befragte an, in einem Ein- oder Zweifamilienhaus zu wohnen (84 % vs. 64 %). Die höhere Bedeutung der Landwirtschaft in Creglingen wird auch durch die Kommunalstatistik bestätigt: In Creglingen existierten 2007 199 Viehhaltungsbetriebe gegenüber 43 in Dörzbach (Statistische Ämter des Bundes und der Länder 2011). Diese Tatsache erklärt auch, warum in Creglingen landwirtschaftliche Gebäude als Trägergebäude dominieren, in Dörzbach dagegen Wohngebäude (Frage 3). Landwirtschaftliche Gebäude und v.a. Viehställe eignen sich aufgrund der großen Dachflächen besonders für die Installation von PV-Anlagen. Je höher die Anzahl an Viehhaltungsbetrieben, desto besser sind also die Voraussetzungen für eine hohe PV-Nutzung in einer Gemeinde.

Landwirte spielen auch als Gesprächspartner über PV eine wichtige Rolle (Frage 14). Die weite Sichtbarkeit der Anlagen und das bereits in den Interviews erwähnte Netzwerk unter den Landwirten fördert den Austausch über die Technologie (vgl. Abschnitt 7.1.2). In Creglingen, wo mehr landwirtschaftliche Betriebe existieren, werden Landwirte auch als häufigste Gesprächspartner zum Thema PV genannt (von 52 % der Befragten), gefolgt von Personen aus der PV-Branche (von 51 % der Befragten) und PV-Eigentümern (von 34 % der Befragten)<sup>20</sup>. In Dörzbach sind dagegen Personen aus der PV-Branche relativ wichtiger für den Austausch: 39 % der Befragten geben Personen aus der PV-Branche als wichtigste Gesprächspartner an, 21 % nannten Landwirte und 18 % PV-Eigentümer (vgl. ANHANG 4, Tab. 26).

In den Interviews hatte sich bereits herausgestellt, dass einige Akteure die Rolle von Change Agents einnehmen und den Diffusionsprozess in einer Gemeinde entscheidend mit beeinflusst haben. In der Haushaltsbefragung wurde daraufhin abgefragt, welche Personen sich in der eigenen Gemeinde besonders für PV einsetzen (Frage 4). Sowohl in Creglingen als auch in Dörzbach wurden die Elektriker als wichtigste Akteure genannt mit 48 % in Creglingen und 13 % in Dörzbach (vgl. ANHANG 4, Tab. 27). An zweiter Stelle steht in Creglingen der Solarverein (35 %), der sich für das Thema PV in der Gemeinde stark gemacht hatte; eine ähnliche Initiative existiert in Dörzbach nicht. Damit wird die Aussage aus den Interviews bestätigt, dass das Vorhandensein eines Solarvereins und dessen Aktivitäten – wie der Bau einer Bürgersolaranlage auf dem Schuldach im Fall Creglingens – das Bewusstsein für PV in einem Ort erhöhen und damit auch die Installation weiterer PV-Anlagen anstoßen kann (vgl. Abschnitt 7.1.2).

Zudem spielt in Creglingen der ortsansässige Installateur Elektro Ott eine besondere Rolle, der über 60 % der Anlagen der Befragten installiert hat. In Dörzbach liegt dagegen keine eindeutige Dominanz eines Elektroinstallateurs vor. Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass die Präsenz eines Installateurs, der in seiner Gemeinde aktiv Werbung für Verkauf und Installation von PV-Anlagen betreibt, die PV-Nutzung in der Gemeinde vorantreiben kann. Der Elektroinstallateur Ott nahm also die Rolle eines Change Agents ein (vgl. Abschnitt 7.1.2).

Die Bedeutung der räumlichen Nähe für die Wahl des Installateurs zeigt sich in

---

<sup>20</sup> Mehrfachnennungen möglich



Creglingen auch deutlicher als in Dörzbach (Frage 15). Die drei wichtigsten Installateure sind in Creglingen nicht weiter als 15 km entfernt, wohingegen es in Dörzbach 22 km sind (vgl. ANHANG 4, Tab. 28 und Tab. 29). Bei der Frage, warum der entsprechende Installateur ausgewählt wurde, zeichnen sich nur bei der räumlichen Nähe signifikante Unterschiede zwischen den Gemeinden ab, wobei auch hier die räumliche Nähe in Creglingen als wichtiger bewertet wird als in Dörzbach (Frage 16). Beweggründe wie gute Erfahrung mit dem Installateur, Empfehlung von Bekannten oder der Preis unterscheiden sich nicht zwischen den Gemeinden. Es scheint, als ob die Creglinger die kurze Distanz zum Fachgeschäft Ott besonders schätzen, da der Installateur leichter verfügbar erscheint, beispielsweise bei Problemen mit der Anlage.

Die Unterschiede in der PV-Diffusion zwischen Creglingen und Dörzbach lassen sich mithilfe der Ergebnisse der Haushaltsbefragung auf zwei Hauptfaktoren zurückführen. Zum einen spielt die größere Anzahl an landwirtschaftlichen Betrieben in Creglingen eine wichtige Rolle. Landwirte haben aufgrund der attraktiven Bedingungen zahlreich in PV investiert. Zugleich hat die Installation von meist großflächigen Dachanlagen auch eine Ausstrahlungswirkung auf andere Haushalte der Umgebung (vgl. Abschnitt 7.1.2). Je höher die Anzahl an Viehbetrieben, desto höher ist tendenziell auch die Anzahl an PV-Anlagen.

Zum anderen wurde deutlich, dass in Creglingen mit dem Solarverein und dem Elektroinstallateur Ott zwei Akteure vor Ort waren, die als sog. Change Agents die Diffusion von PV-Anlagen vorangetrieben haben. Der Solarverein wurde nicht nur in der Haushaltsbefragung als wichtiger Akteur genannt, sondern auch bereits in den Interviews positiv erwähnt. Demnach war der Solarverein ein Zusammenschluss von Personen in Creglingen, die sich mit dem Thema PV auseinander gesetzt haben (Installateure, lokale Bank, Bürgermeister,...), Informationsveranstaltungen für Bürger angeboten und gemeinsam das Projekt der Bürgersolaranlage auf dem Schuldach in Creglingen durchgeführt haben (vgl. Abschnitt 7.1.2). Die Möglichkeit des Austauschs über PV im Solarverein und die Umsetzung eines gemeinschaftlichen Projekts mit Multiplikatorwirkung hat die PV-Diffusion in Creglingen vermutlich deutlich beeinflusst. Gleichzeitig war mit dem Elektroinstallateur Ott ein kompetenter Partner vor Ort, der sich auf den Vertrieb von PV-Anlagen spezialisiert hat und den lokalen Markt bedienen konnte.

Das Vorhandensein von Change Agents in einer Gemeinde kann also auch zur Ausprägung räumlicher Unterschiede in der PV-Nutzung führen.

## 7.3 Fazit

Ziel dieses Kapitels war, mit Hilfe der Fallstudie in der Region Heilbronn-Franken – über die quantitativen Analysen in Kapitel 6 hinaus – weitere Einflussfaktoren auf den Diffusionsprozess zu identifizieren und Informationen über die Bedeutung des Nachbarschaftseffekts zu gewinnen. Die Ergebnisse der Kapitel 6 und 7 stellen

schließlich die Grundlage für die Diffusionsmodellierung in Kapitel 8 dar.

Aus der Haushaltsbefragung ergibt sich, dass Gemeinden mit einer hohen Anzahl an PV-Anlagen vor allem dort zu finden sind, wo ein hoher Anteil an Ein- und Zweifamilienhäusern, ein hoher Anteil an Hauseigentümern, sowie ein hoher Anteil an Familien und landwirtschaftlichen Betrieben (v.a. Viehhaltungsbetriebe) vorliegt. Hohes Umweltbewusstsein ist, unabhängig vom Diffusionsstadium, generell förderlich für die Anschaffung einer PV-Anlage. Daten zu Umweltbewusstsein und Hauseigentum sind jedoch auf Gemeindeebene nicht verfügbar.

Durch die Interviews und die Haushaltsbefragung wurde auch deutlich, dass das Vorhandensein bestimmter Change Agents wie aktive PV-Unternehmer und Elektroinstallateure, Bürgermeister und Solarvereine und – besonders auf regionaler Ebene – das Engagement von Energieagenturen und Maschinenringen die PV-Diffusion vorangetrieben haben. Der Einfluss dieser Change Agents kann in einem quantitativen Diffusionsmodell jedoch nicht berücksichtigt werden, da die Datenerhebung zu aufwendig und der Einfluss der einzelnen Akteure schwer messbar ist und damit kaum in einem Modell operationalisiert werden kann.

Die Bedeutung des Nachbarschaftseffekts wurde besonders in den Interviews betont. Ein Nachbarschaftseffekt existiert also zum einen über den direkten persönlichen Kontakt und Informationsaustausch mit den in der direkten Nachbarschaft lebenden Haushalten. Zum anderen haben die PV-Anlagen durch die Sichtbarkeit auf Hausdächern einen Ausstrahlungseffekt sowohl auf die Haushalte in der jeweiligen Gemeinde als auch auf Personen, die in der Region wohnen und durch ihr tägliches Mobilitätsverhalten auch die Anlagen in den Nachbargemeinden wahrnehmen.

Ziel des folgenden Kapitels ist zu untersuchen, wie sich die Diffusionskurven der einzelnen Gemeinden unterscheiden und ob ein Nachbarschaftseffekt der Diffusion zwischen Gemeinden auch statistisch nachweisbar ist.

## 8 Räumliche Diffusion von PV-Anlagen in Baden-Württemberg von 2000 bis 2030

Bisher wurde dargestellt, dass räumliche Unterschiede in der PV-Nutzung im Jahr 2009 bestehen. Die Ursachen liegen erstens in der räumlichen Ausprägung der Einflussfaktoren und zweitens in Nachbarschaftsbeziehungen zwischen Gemeinden, die durch Cluster- und räumliche Regressionsanalyse bereits identifiziert wurden (vgl. Kapitel 6).

Die Frage ist nun, wie sich die räumlichen Unterschiede entwickelt haben und ob sich diese auch in unterschiedlichen Diffusionskurven widerspiegeln. Die Analyse der räumlichen Diffusion ermöglicht, die Ausbreitung von PV-Anlagen im Zeitverlauf räumlich differenziert auf Gemeinde-Ebene zu betrachten und die Bedeutung von Nachbarschaftswechselwirkungen in der PV-Diffusion *zwischen* den Gemeinden zu untersuchen.

Aufgrund der hohen Korrelation der PV-Nutzung mit den Raumkategorien (RK)<sup>21</sup> (vgl. Abschnitt 6.2) wird angenommen, dass unterschiedliche Raumtypen Unterschiede im Diffusionsverlauf und damit im Innovations- und Imitationsverhalten aufweisen. Liegen signifikante Unterschiede im Innovations- und Imitationseffekt zwischen den RK vor, so weist dies darauf hin, dass Unterschiede in der Diffusion auch Unterschiede in der räumlichen Verteilung der PV-Nutzung verursachen.

Des Weiteren wird die Annahme getroffen, dass die Ursache für die räumlichen Unterschiede der PV-Nutzung auch in einem unterschiedlich stark ausgeprägten Nachbarschaftseffekt liegt. Die Frage ist, ob die Lage einer Gemeinde innerhalb eines Hot Spots (HS) der PV-Nutzung den Imitationseffekt im Vergleich zu anderen Gemeinden erhöht. Ist dies der Fall, so deutet das darauf hin, dass nicht nur Imitation *innerhalb* einer Gemeinde stattfindet, sondern dass auch ein Nachbarschaftseffekt *zwischen* den Gemeinden vorliegt, wie in der Theorie der räumlichen Diffusion von Hägerstrand dargestellt.

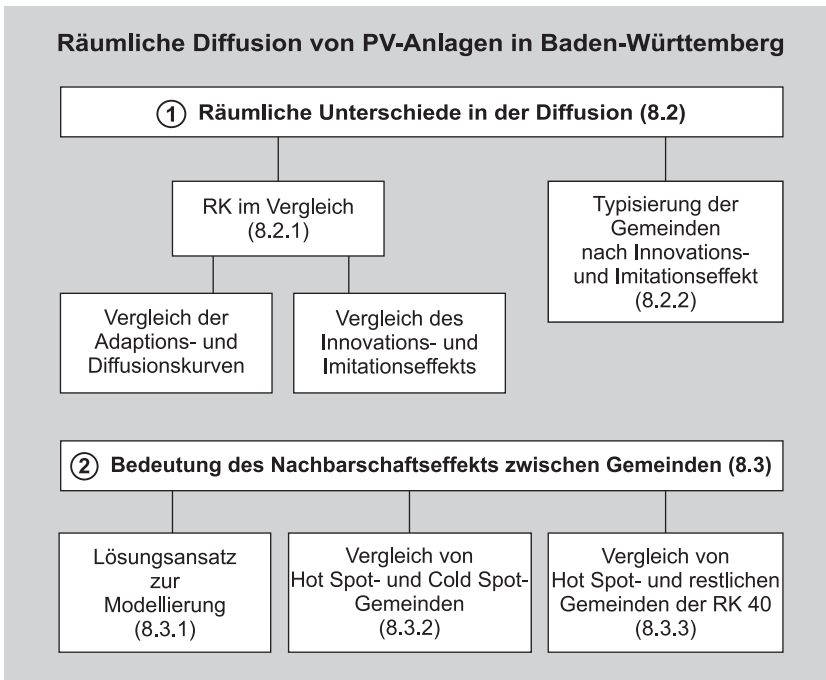
In Abschnitt 8.1 werden die methodischen Grundlagen für die Modellierung der PV-Diffusion gelegt. Daraufhin werden die räumlichen Unterschiede in der Diffusion aufgezeigt (Abschnitt 8.2) und schließlich die Bedeutung des Nachbarschaftseffekts bei der PV-Diffusion diskutiert (Abschnitt 8.3) (vgl. Abb. 28).

### 8.1 Modellierung der Diffusion von PV-Anlagen

Ziel der Diffusionsmodellierung ist, die Entwicklung räumlicher Unterschiede in der PV-Nutzung aufzuzeigen und die Bedeutung des räumlichen Nachbarschafts-

<sup>21</sup> Je ländlicher die Gemeinde, desto höher die PV-Nutzung (RK 10: Verdichtungsräume, RK 20: Randzone um Verdichtungsräume, RK 30: Verdichtungsgebiete im ländlichen Raum, RK 40: ländlicher Raum im engeren Sinne).

Abb. 28: Ablauf der Analysen in Kapitel 8



Quelle: Eigene Darstellung

effekts zu untersuchen. In Anlehnung an die vom BMWi in Auftrag gegebene Studie zur Entwicklung der Energiemärkte in Deutschland (FAHL et al. 2010), wird die PV-Entwicklung bis zum Jahr 2030 modelliert. Die Diffusionsmodelle dienen in erster Linie der Überprüfung von Hypothesen und nicht der Prognose der PV-Entwicklung in den einzelnen Gemeinden.

Die Diffusion von PV-Anlagen begann in einigen Gemeinden bereits in den 1980er und 90er Jahren. Für die Modellierung wird für alle Gemeinden jedoch als Startzeitpunkt das Jahr 2000 gewählt, in dem das EEG in Kraft trat. Ab 2000 sind somit die finanziellen Rahmenbedingungen bzgl. der Einspeisevergütung für alle Gemeinden gleich.

In Abschnitt 8.1.1 wird das Bass-Modell zunächst in Bezug auf die PV-Diffusion vorgestellt und erläutert, wie die einzelnen Parameter zu interpretieren sind. Die Schätzung der Modell-Parameter wird in Abschnitt 8.1.2 und die Bestimmung des Marktpotentials in Abschnitt 8.1.3 dargestellt. Daraufhin folgt ein Abschnitt zur Beurteilung der Modellgüte (Abschnitt 8.1.4). Abschließend wird die Datengrundlage und Auswertungsmethodik erklärt (Abschnitt 8.1.5).

### 8.1.1 Das Bass-Modell der PV-Diffusion

In Abschnitt 4.4 wurde das Bass-Modell als Standardmodell der Diffusionsforschung vorgestellt. Auch die Diffusion der PV als eine innovative Energietechnologie wird nun mit Hilfe des Bass-Modells modelliert. Da PV-Anlagen ein langlebiges Produkt darstellen, für das meist keine Ersatzkäufe getätigt werden, sind die Grundvoraussetzungen des Bass-Modells erfüllt.

Wie bereits in Abschnitt 4.4 erläutert, lässt sich das Bass-Modell durch folgende Differentialgleichung beschreiben (Gleichung 8.1):

$$n_t = \frac{dN_t}{dt} = \left( p + \frac{q}{M} * N_t \right) * (M - N_t) \quad (8.1)$$

wobei  $n_t$  die erwarteten PV-Neuinstallationen pro Einwohner (EW) zum Jahr  $t$  darstellen,  $N_t$  die kumulierte Anzahl an installierten PV-Anlagen pro EW im Jahr  $t$  und  $M$  das Marktpotential, d.h. die maximal mögliche Anzahl an PV-Anlagen pro EW.  $p$  steht für den Innovationskoeffizient und  $q$  für den Imitationskoeffizient<sup>22</sup>.

Die Diffusionskurve ( $N_t$ ) wird in Gleichung 8.2 beschrieben. Sie setzt sich zusammen aus dem Produkt der Lösung der Differentialgleichung  $F_t$  und dem Marktpotential  $M$ . Die Adoptionskurve ist die Ableitung der Diffusionskurve nach der Zeit und ist in Gleichung 8.3 dargestellt. Gleichung 8.3 wird im Folgenden für die Schätzung der Parameter verwendet.

$$N_t = M * F_t = M * \frac{1 - e^{-(p+q)t}}{1 + \left(\frac{p}{q}\right) * e^{-(p+q)t}} \quad (8.2)$$

$$n_t = M * f_t = M * \frac{(p + q)^2 * e^{-(p+q)t}}{p * \left(1 + \left(\frac{q}{p}\right) * e^{-(p+q)t}\right)^2} \quad (8.3)$$

Das Bass-Modell ist für die Modellierung der PV-Diffusion gut geeignet, da es sowohl den Kauf aufgrund unabhängiger Informationsbeschaffung berücksichtigt (Innovationskoeffizient), als auch Nachahmungskäufe (Imitationskoeffizient). Es wird angenommen, dass der Innovationskoeffizient das Verhalten von Personen beschreibt, die sich aus Interesse für die Technologie selbstständig Informationen über PV-Anlagen im Internet, Fachzeitschriften oder im Fachhandel (z.B. bei Elektroinstallateuren) beschaffen und sich daraufhin eine Anlage installieren. Der Imitati-

---

<sup>22</sup> Im Folgenden werden anstatt „a“ und „b“ wie in Kapitel 4.4 der Innovationskoeffizient mit „p“ und der Imitationskoeffizient mit „q“ bezeichnet, wie dies auch in der ursprünglichen Formulierung des Bass-Modells der Fall ist (vgl. Bass 1969).

onskoeffizient steht im PV-Diffusionsmodell für die Bedeutung der Nachahmung bei der Verbreitung von PV-Anlagen: Personen schaffen sich eine PV-Anlage an, weil sie durch die Wahrnehmung einer Vielzahl an Anlagen in ihrem Umfeld und durch die Kommunikation mit PV-Besitzern vom Nutzen einer PV-Anlage überzeugt werden (vgl. Abschnitt 5.3).

Genauso wie  $p$  und  $q$  kann auch  $M$  mit dem Bass-Modell geschätzt werden. Es sollte jedoch von einer Schätzung von  $M$  abgesehen werden, wenn der Wendepunkt der Diffusion noch nicht erreicht ist, da in diesem Fall der Spielraum für den Kurvenverlauf zu hoch ist und keine plausiblen Ergebnisse für  $M$  erzielt werden können (MAHAJAN et al. 1990, S. 8f.). Ein Vergleich mit der aktuellen PV-Entwicklung in BW zeigt, dass die Neuinstallationen an PV-Anlagen in den Jahren 2010 und 2011 weiter zunahmen und der Wendepunkt noch nicht erreicht ist (BMW 2012). Das Marktpotential sollte aus diesem Grund extern bestimmt und nicht durch das Modell geschätzt werden (vgl. Abschnitt 8.1.3).

### 8.1.2 Schätzung des Innovations- und Imitationskoeffizienten

Das Bass-Modell stellt durch seinen semilogistischen Aufbau eine nichtlineare Funktion dar. Die Schätzung nichtlinearer Modelle ist im Vergleich zu linearen Modellen wesentlich komplexer, da die Schätzverfahren erweitert werden müssen (BATES und WATTS 1988, S. 32).

Unter vereinfachenden Annahmen ist es möglich, die Parameter mittels OLS-Regression zu schätzen, indem die Gleichung in ein Polynom 2. Grades umgeformt wird (Bass 1969, S. 219). Durch die Multikollinearität von  $N_t$  und  $N_t^2$  führen OLS-Schätzungen jedoch häufig zu falschen Vorzeichen der Parameter und liefern instabile Ergebnisse (MAHAJAN et al. 1990, S. 9; MEADE und ISLAM 2006, S. 257). Zudem ist es nicht möglich, die Standardfehler der Parameter zu berechnen, so dass keine Aussage über die Signifikanz der geschätzten Parameter gemacht werden kann (SRINIVASAN und MASON 1986, S. 172).

SCHMITTLEIN und MAHAJAN (1982) schlagen deshalb eine Maximum Likelihood-Schätzung (MLE) vor (SCHMITTLEIN und MAHAJAN 1982). Eine weitere Alternative bietet die Non Linear Least Square-(NLS-)Schätzung (SRINIVASAN und MASON 1986). Sowohl das MLE- als auch das NLS-Verfahren liefern bessere Modellschätzungen als das OLS-Verfahren und erlauben die Berechnung der Standardfehler der Parameter. SRINIVASAN und MASON (1986) argumentieren, dass bei der ML-Schätzung die Standardfehler der Parameter jedoch häufig unterschätzt werden, so dass das Bass-Modell besser mittels NLS berechnet werden sollte (SRINIVASAN und MASON 1986, S. 170; PUTSIS und SRINIVASAN 2000, S. 285).

Ziel der NLS-Schätzung ist wie beim OLS-Verfahren die Minimierung der Fehlerquadratsumme. Bei nichtlinearen Modellen kann das Minimum der Fehlerquadratsumme jedoch nicht wie in der linearen Regression explizit angegeben werden, so dass iterative numerische Verfahren verwendet werden müssen (RUCKSTUHL 2008, S. 6). Die NLS-Funktion im Statistikprogramm „R“ verwendet zur Parameterschätzung den Gauss-Newton-Algorithmus: Ausgehend von den Startwerten werden mittels

der Methode der kleinsten Quadrate die Parameter in jedem Iterationsschritt so angepasst, dass die Residuen zunehmend minimiert werden, bis keine Veränderung mehr erfolgt und das Optimum der Schätzung erreicht ist. Hierzu wird in jedem Schritt eine lineare Näherung der Funktion bestimmt (Taylor-Reihe erster Ordnung) (BATES und WATTS 1988, S. 40ff.).

Aus oben genannten Gründen wird zur Schätzung der PV-Diffusionsmodelle das NLS-Verfahren verwendet. Die Schätzungen werden mit Hilfe des Statistikprogramms „R“ durchgeführt (The R Foundation for Statistical Computing 2011) (vgl. ANHANG 5, Tab. 30 und Tab. 31). Iterative Schätzverfahren benötigen Startwerte für die zu schätzenden Parameter. Häufig werden die Startwerte aus vorausgegangenen Studien ähnlicher Güter gewonnen. SULTAN et al. (1990) stellten bei einem Vergleich von 213 erfolgreich im Markt eingeführten Produkten fest, dass der Innovationskoeffizient im Durchschnitt bei  $p = 0,03$  lag und der Imitationskoeffizient bei  $q = 0,38$  (SULTAN et al. 1990, S. 74). Diese Startwerte werden auch zur Modellierung der PV-Diffusion übernommen.

### 8.1.3 Bestimmung des Marktpotentials

Das Marktpotential  $M$  beschreibt die maximal mögliche Anzahl an PV-Anlagen pro EW, die innerhalb einer Raumeinheit installiert werden können. Diese Sättigungsgrenze ist bei PV-Anlagen bis zu 30 kWp abhängig von den verfügbaren Dachflächen. Je nach politischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen kann diese Grenze jedoch deutlich schwanken. Einfluss auf das Marktpotential von PV haben v.a. Veränderungen der Einspeisevergütung durch das EEG, aber auch die Preisentwicklung von Modulen und Wechselrichtern, ausgelöst durch technische Weiterentwicklungen oder ein zunehmendes Angebot preisgünstiger Produkte asiatischer Hersteller. Mögliche Veränderungen können auch von einem Wandel gesellschaftlicher Werte ausgehen. Durch das zunehmende Bewusstsein für den Klimawandel und die Endlichkeit fossiler Ressourcen könnte das Interesse an PV-Anlagen weiter ansteigen. Sinkende Marktpreise von PV-Anlagen werden tendenziell durch die im EEG festgeschriebene degressive Vergütung des mit PV-Anlagen erzeugten Stroms wieder ausgeglichen, so dass angenommen wird, dass das Marktpotential von PV-Anlagen in den letzten Jahren relativ konstant blieb. Änderungen des EEG werden deshalb nicht im Modell berücksichtigt.

Das Marktpotential wird hier als das technische Angebotspotential zur Stromerzeugung durch PV auf Dachflächen definiert. Nach KALTSCHMITT (2006) hängt dieses Potential vom Gebäudebestand, der durchschnittlichen Dachfläche sowie der Dachform und -neigung ab. Zugleich sind bautechnische (z.B. Kamine, Dachfenster) und solartechnische Restriktionen (z.B. Abschattungseffekte, Sicherheitsabstände) zu berücksichtigen (KALTSCHMITT et al. 2006, S. 271).

In einer Studie im Auftrag des Wirtschaftsministerium BWs wurde das technische Potential auf Dachflächen in BW anhand aktueller Daten zum Gebäudebestand und Annahmen zur Weiterentwicklung von PV berechnet (AMMON und UHLEMANN 2009). Grundlage für die Abschätzungen bildeten die aktuellen Förderrichtlinien des EEG

und das Energiekonzept der Landesregierung. Das berechnete technische Potential auf Dachflächen zur Installation von PV-Anlagen in BW liegt demnach bei 12,6 GWp (AMMON und UHLEMANN 2009, S. 55). Bei einer durchschnittlichen Anlagengröße von 6,5 kWp (vgl. Abschnitt 6.1.1) und einer Bevölkerung von 10,7 Mio. (STA LA BW 2010) liegt das Marktpotential bei ca. 0,18 PV/EW.

Um beurteilen zu können, welchen Einfluss die Wahl der Höhe des Marktpotentials auf den Verlauf der Diffusionskurve (d.h. auf  $p$  und  $q$ ) und auf die Güte der Modellschätzung (d.h. auf den Standardfehler der Residuen (SFR)<sup>23</sup>) hat, wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt: Das Diffusionsmodell wurde mit verschiedenen Marktpotentialen geschätzt und die Höhe des SFR sowie der  $p$  und  $q$  zwischen den Modellen verglichen. Der Einfluss verschiedener Marktpotentiale wurde für die vier RKs getestet, da diese die Unterschiede in der Siedlungsstruktur und damit der verfügbaren Dachflächen widerspiegeln (vgl. Abschnitt 6.2). Angelehnt an die Potentialabschätzungen von AMMON und UHLEMANN (2009) wurde das Marktpotential zwischen 0,01 und 0,15 PV/EW variiert. Die Werte wurden bewusst kleiner 0,18 PV/EW gewählt, da in der Potentialabschätzung von AMMON und UHLEMANN auch Anlagen größer als 30 kWp enthalten sind, die in dieser Arbeit nicht berücksichtigt werden.

Abb. 29 zeigt, dass die SFR in den RK unterschiedlich hoch sind<sup>24</sup>. Das Marktpotential sollte für jede RK so gewählt werden, dass der SFR minimal ist. Bei den städtischen RK (10 und 20) nimmt der SFR bis ca. 0,03 PV/EW ab und bleibt dann relativ stabil. Bei RK 30 (Verdichtungsbereich im ländlichen Raum) nimmt der SFR auch zunächst bis 0,05 ab, steigt jedoch ab 0,13 wieder sprunghaft an. Bei RK 40 (ländlicher Raum im engeren Sinne) stabilisiert sich der SFR ab ca. 0,1 PV/EW. Den relativ geringen Schwankungen des SFR bei einem Marktpotential im Bereich von 0,03 bis 0,1 PV/EW stehen hohe Schwankungen von  $p$  und  $q$  gegenüber (vgl. Abb. 30 und Abb. 31). Tendenziell gilt, je niedriger das Marktpotential, desto höher  $p$  und  $q$ . Die Sensitivitätsanalyse zeigt also, dass sich die Wahl des Marktpotentials stark auf den Verlauf der Diffusionskurve auswirkt. Das Marktpotential sollte also nicht geschätzt, sondern, basierend auf plausiblen Annahmen, für jede Raumeinheit extern bestimmt werden.

Als verfügbare Dachflächen für PV-Anlagen bis 30 kWp kommen nach AMMON und UHLEMANN (2009) 50% der EZFH in Frage<sup>25</sup>. Nach QUASCHNING (2000) reduziert sich jedoch die verfügbare Dachfläche für PV-Anlagen auf 66% aufgrund der Nutzungskonkurrenz zur Solarthermie (QUASCHNING 2000). Für landwirtschaftliche Gebäude (LW) wird eine Eignung von 90% angenommen (AMMON und UHLEMANN 2009, S. 52). Aufgrund der Größe der landwirtschaftlichen Gebäude wird davon ausgegangen, dass keine Konkurrenz zur solarthermischen Nutzung besteht.

---

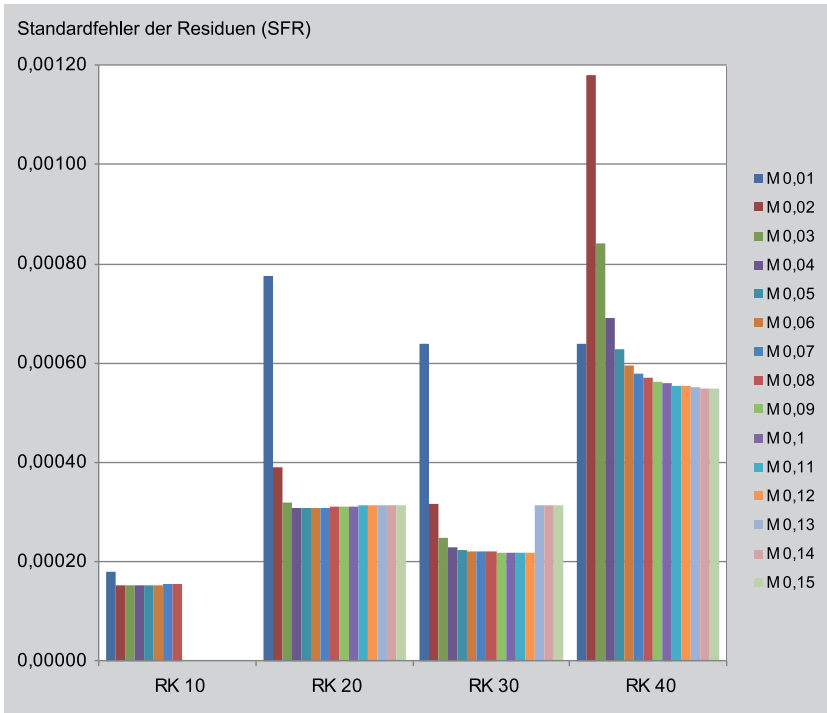
23 Standardfehler der Residuen:  $\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\theta - \hat{\theta})^2}{(n - k)}}$ , wobei  $n$ : Anzahl der Fälle,  $\theta$ : beobachteter Wert,  $\hat{\theta}$ : geschätzter Wert und  $k$ : Anzahl der Parameter

24 Für RK 10 war ab einem Marktpotential  $M > 0,08$  keine Modellschätzung mehr möglich.

25 Eine Unterscheidung zwischen städtischem und ländlichem Raum bei der Eignung der Dachflächen von EZFH, wie bei EuPD Research (2009, S. 50) angenommen, wird als nicht sinnvoll erachtet, da Verschattungseffekte in EZFH-Siedlungen ähnlich hoch sind.

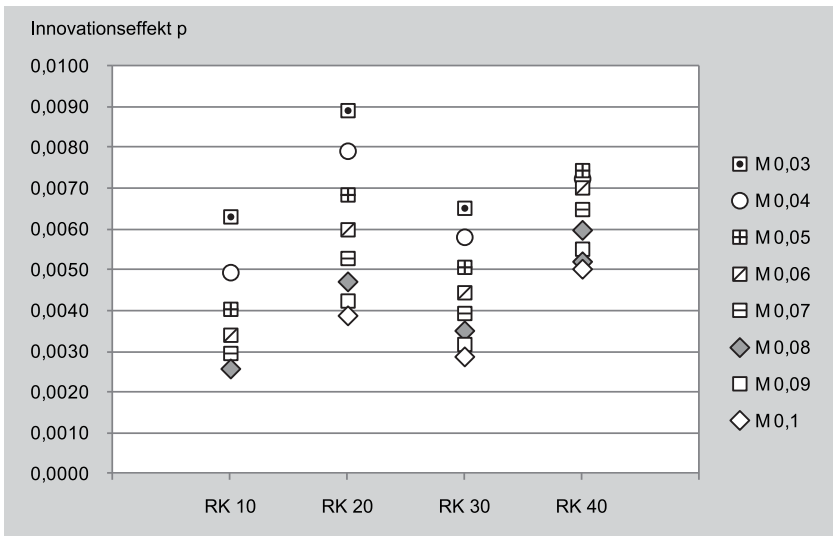


Abb. 29: Standardfehler der Residuen (SFR) der vier RK



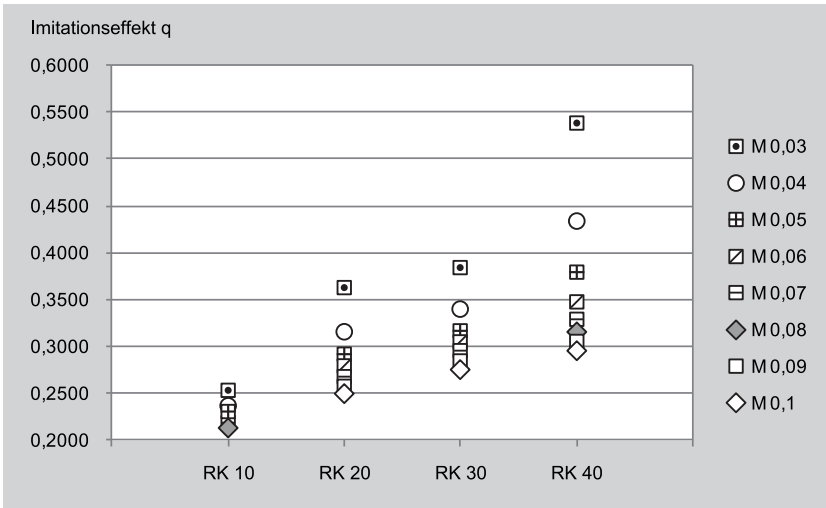
Quelle: Eigene Berechnung

Abb. 30: Vergleich des Innovationseffekts  $p$  zwischen den RK für verschiedene Marktpotentiale  $M$



Quelle: Eigene Berechnung

Abb. 31: Vergleich des Imitationseffekts  $q$  zwischen den RK für verschiedene Marktpotentiale  $M$



Quelle: Eigene Berechnung

Mehrfamilienhäuser gehen aufgrund meist ungeklärter Eigentumsverhältnisse der Dachfläche nicht in die Potentialabschätzung ein, ebenso wenig wie Gebäude aus Industrie und Gewerbe, sowie öffentliche Gebäude, bei denen es sich meist um Anlagen größer 30 kWp handelt. Somit ergibt sich folgende Formel zur Berechnung des Marktpotentials ( $M$ ) einer Raumeinheit (Gleichung 8.4):

$$M \left( \frac{PV}{EW} \right) = \left( 0,5 * \frac{EZFH}{EW} \right) * 0,66 + 0,9 * \frac{LW}{EW} \quad (8.4)$$

Die berechneten Marktpotentiale der einzelnen Gemeinden liegen zwischen 0,02 und 0,21 mit einem Mittelwert von 0,09. Ein Vergleich der durchschnittlichen Marktpotentiale der einzelnen RK mit den Marktpotentialen der Sensitivitätsanalyse zeigt, dass die berechneten Marktpotentiale jeweils im Minimum des SFR liegen. Die berechneten Marktpotentiale entsprechen damit den Modellanforderungen.

### 8.1.4 Beurteilung der Modellgüte und Validierung der Schätzung

Bei nichtlinearen Modellen werden zwar die gleichen Annahmen getroffen wie bei linearen Modellen (Varianzhomogenität, Unabhängigkeit und Normalverteilung der Residuen), die Überprüfung auf Modellverstöße ist jedoch schwieriger, da die Schätzungen immer nur Ergebnisse einer linearen Näherung darstellen. Eine weitere Schwierigkeit besteht darin, dass bei Modellverstößen keine Parameter entfernt werden können, da das Bass-Modell sonst die Zusammenhänge nicht mehr richtig

darstellt. Auch ein Test auf Normalverteilung der Residuen ist nicht möglich, da die Stichprobe von 10 Datenpunkten bzw. Jahren zu klein ist, um Aussagen über die Verteilung zu treffen (BATES 1992, S. 427).

Die Güte der Modellschätzung wird deshalb über die Signifikanz der Parameterschätzungen überprüft: Je niedriger die Signifikanz der Parameter, desto höher der Standardfehler und desto schlechter die Modellschätzung. Des Weiteren werden die Modelle mit Hilfe des Standardfehlers der Residuen verglichen, wobei auch hier gilt: Je niedriger der Standardfehler der Residuen, desto besser ist die Modellschätzung.

Zur Validierung des Modells werden gemäß BATES und WATTS (1988) die geschätzten Werte graphisch mit den beobachteten Werten verglichen (BATES und WATTS 1988, S. 90f.).

### **8.1.5 Datengrundlage und Auswertung**

Als Eingangs-Daten dienen die kumulierte Anzahl an PV-Anlagen pro EW jeder Raumeinheit (Raumkategorie, Cluster bzw. Gemeinde) von 2000 bis 2009, sowie das Marktpotential (vgl. Abschnitt 8.1.3). Die Modellschätzung wird in Jahresschritten von 2000 bis 2030 durchgeführt (vgl. Abschnitt 8.1). Die Modelle werden für unterschiedliche Raumeinheiten berechnet: zur Übersicht werden Modelle aus aggregierten Daten erstellt, in denen die PV-Anlagen für die einzelnen Raumkategorien bzw. Hot und Cold Spots zusammengefasst werden. Im Anschluss wird für jede der 1103 Gemeinden ein eigenes PV-Diffusionsmodell geschätzt (vgl. ANHANG 5 Tab. 30 und Tab. 31).

Zur Auswertung werden die Daten zur PV-Entwicklung den geschätzten Werten graphisch gegenübergestellt, sowohl in der Adoptionskurve als auch in der Diffusionskurve. In die Auswertung gehen nur diejenigen Modelle ein, die signifikante Parameterschätzungen für  $p$  und  $q$  auf dem Niveau von  $\alpha = 5\%$  erreichen.

Um zu überprüfen, ob signifikante Unterschiede zwischen den Gemeinden einer RK oder eines Clusters bzgl. des Innovationseffekts  $p$  und des Imitationseffekts  $q$  bestehen, wird der U-Test nach Mann-Whitney für nicht normalverteilte Daten durchgeführt (BORTZ und SCHUSTER 2010, S. 130ff.). Wird das Signifikanzniveau von 0,01 unterschritten, so wird die Nullhypothese („Es besteht kein signifikanter Unterschied zwischen den Gemeinden“) verworfen und die Alternativhypothese („Es besteht ein signifikanter Unterschied zwischen den Gemeinden“) angenommen.

## **8.2 Räumliche Unterschiede in der Diffusion von PV-Anlagen von 2000 bis 2030**

In Kapitel 6 und 7 wurden die räumlichen Unterschiede in der PV-Nutzung auf Gemeindeebene sowie mögliche Ursachen dafür aufgezeigt. Die Frage ist nun, ob auch räumliche Unterschiede in der Diffusion von PV-Anlagen bestehen, die die Nutzungsunterschiede erklären können.

Zunächst wird ein Vergleich der Diffusion einzelner Gemeinden anhand einer Einteilung nach Raumkategorien vorgenommen, die die Unterschiede in der Siedlungsstruktur wiedergeben (WiMi BW 2002, S. 9ff.) (Abschnitt 8.2.1). Im Anschluss werden die Gemeinden anhand der Ausprägung des Innovations- und Imitationseffekts beschrieben (Abschnitt 8.2.2).

## 8.2.1 Raumkategorien im Vergleich

In seinem Phasenmodell zur räumlichen Diffusion von Innovationen geht HÄGERSTRAND davon aus, dass sich Innovationen vom Zentrum ins Umland ausbreiten (vgl. Abschnitt 3.2.2.3). Städte gelten im Vergleich zu ländlichen Regionen als innovativer, was sich in einem höheren Innovationseffekt in städtischen Räumen widerspiegeln müsste. Auf der anderen Seite wird – basierend auf den Erkenntnissen der Experteninterviews – davon ausgegangen, dass in ländlicheren Regionen ein höherer Imitationseffekt als in der Stadt vorherrscht (vgl. Abschnitt 7.1.4.). Dies liegt laut der Interviewpartner zum einen an der häufigeren persönlichen Kommunikation mit den Nachbarn und zum anderen an einer stärker ausgeprägten sozialen Kontrolle und damit einer stärkeren Beobachtung des Verhaltens der Nachbarn auf dem Land.

In Abschnitt 6.2 wurde eine hohe Korrelation der RK mit der PV-Nutzung festgestellt, d.h. je ländlicher eine Gemeinde, desto höher ist tendenziell die Anzahl an PV-Anlagen pro EW. Ziel der Analyse ist nun zu überprüfen, ob sich die einzelnen RKs auch im Diffusionsverlauf unterscheiden und ob sich die Hypothesen über den Innovations- und Imitationseffekt städtischer und ländlicher Räume bestätigen.

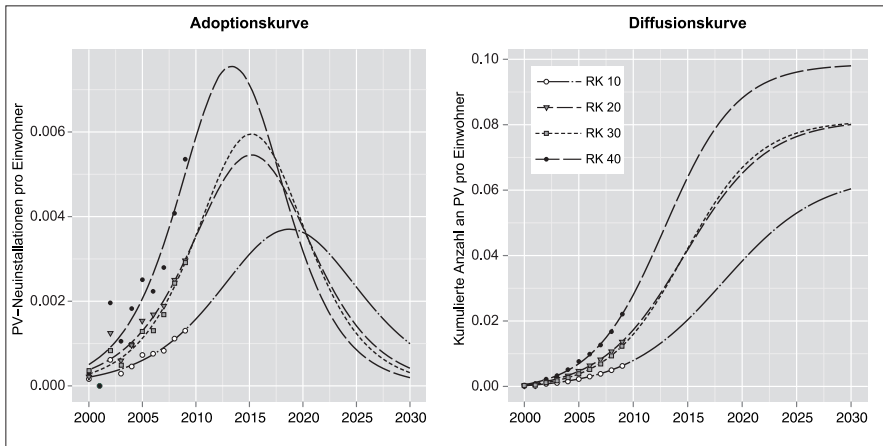
Im ersten Schritt werden die Adoptions- und Diffusionskurven der RK verglichen, wobei zur besseren Übersicht ein Diffusionsmodell pro RK geschätzt wurde (im Folgenden als „RK-Modelle“ bezeichnet) (Abschnitt 8.2.1.1). Im zweiten Schritt werden die Diffusionsmodelle der einzelnen Gemeinden hinzugezogen, um präzisere Aussagen über die Unterschiede im Innovations- und Imitationseffekt der Gemeinden einer RK machen zu können (Abschnitt 8.2.1.2).

### 8.2.1.1 Unterschiede in Adoptions- und Diffusionskurven

Die Adoptions- und Diffusionskurven der vier RK sind in Abb. 32 dargestellt – die beobachteten Werte sind jeweils als Punkte gegen die geschätzten Kurven abgebildet. Die Adoptionskurven beschreiben die PV-Neuinstallationen pro Einwohner von 2000 bis 2030 jeder RK. Es zeigt sich, dass die beobachteten Werte mehr oder weniger stark um die geschätzten Kurven streuen. Die stärksten Abweichungen weist RK 40 auf, die geringsten RK 10, was sich auch in der Höhe des Standardfehlers der Residuen bestätigt. Die Neuinstallationen steigen nicht stetig an; im Jahr 2003 ist die Anzahl an neuen PV-Anlagen in allen RK geringer als im Vorjahr. Von 2000 bis 2009 ist jedoch überall eine steigende Tendenz zu beobachten.

Die Diffusionskurve beschreibt die kumulierte Anzahl an PV-Anlagen pro EW ebenfalls im Zeitraum von 2000 bis 2030. Die unterschiedliche Höhe des Marktpotentials der vier RK wird durch die unterschiedliche Höhe der Sättigungsgrenze

Abb. 32: Adoptions- und Diffusionskurven der vier RK



Quelle: Eigene Berechnung

der Diffusionskurven deutlich<sup>26</sup>: Die meisten PV-Anlagen werden in den ländlichen Gemeinden (RK 40) installiert ( $M$  bei ca. 0,1 PV/EW). Die Verdichtungsgebiete im ländlichen und städtischen Raum haben durch eine ähnliche Siedlungsstruktur (Anzahl an EZFH/EW und LW/EW) auch ähnlich hohe Maxima ( $M$  bei ca. 0,08 PV/EW). Ein deutlich niedrigeres Marktpotential von 0,065 PV/EW liegt in den städtischen Räumen vor. Die Diffusion schreitet in RK 10 zudem langsamer voran, so dass das Marktpotential in 2030 noch nicht ausgeschöpft ist.

Zur Analyse der räumlichen Unterschiede bzgl. Diffusionsverlauf und Diffusionsstadium eignet sich die Adoptionskurve besser, da der Wendepunkt durch den Gipfel der Adoptionskurve markiert ist. In allen RK zeigt sich, dass das Innovationsstadium bereits vor dem Jahr 2000 eingesetzt hat, da die Diffusionskurven nicht beim Wert Null starten. In den RK 20, 30 und 40 ist das „Early Adopter“-Stadium bereits überschritten: im Jahr 2009 sind in RK 20 bereits 16,7%, in RK 30 15,2% und in RK 40 22,6% des Marktpotentials ausgeschöpft. In RK 10 befindet sich die Diffusion erst am Ende des „Early Adopter“-Stadiums, da zum Jahr 2009 nur 9,7% aller potentiellen PV-Anlagen installiert sind.

Durch den Diffusionsverlauf in den RK 20, 30 und 40 zeigt sich, dass PV-Anlagen im Jahr 2009 also bereits in den Massenmarkt vorgedrungen sind und von der breiten Bevölkerung adoptiert werden. Wie bereits durch die Regressionsanalyse in Abschnitt 6.4.2.2 und die Ergebnisse der Experteninterviews deutlich wurde (Abschnitt 7.1.3), lassen sich die heutigen Käufer von PV-Anlagen nicht mehr mit den Merkmalen typischer „Early Adopter“ beschreiben (hohes Einkommen, formale Bildung und Umweltbewusstsein).

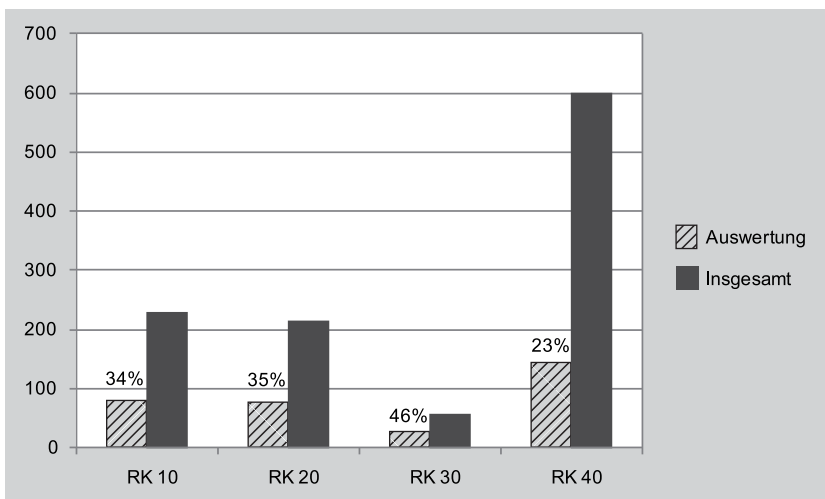
26 Bei der Interpretation der Ergebnisse der Diffusionsmodellierung ist zu berücksichtigen, dass die Höhe des Marktpotentials aller Gemeinden stark durch die Höhe der finanziellen Förderung beeinflusst wird und damit v.a. durch die Änderungen des EEG (vgl. Kap. 8.1.1). Alle Interpretationen, die hier anhand der Modellierungsergebnisse vorgenommen werden, sind nicht als Prognosen zu verstehen, sondern dienen allein der Darstellung der räumlichen Unterschiede in der Diffusion.

Ein Vergleich der Adoptionskurven zeigt, dass sich die RK teilweise deutlich im Diffusionsverlauf unterscheiden. RK 40 weist den höchsten Wendepunkt auf und erreicht diesen bereits im Jahr 2013, d.h. in den Folgejahren nimmt das Wachstum an neuen PV-Anlagen wieder ab. Damit befindet sich der ländliche Raum bereits eindeutig im „Early-Majority“-Stadium der Diffusion. Einwohner der ländlichen Räume waren an PV-Anlagen bisher deutlich stärker interessiert als in den übrigen RK. Die Diffusionskurven der RK 30 und RK 20 erreichen den Wendepunkt beide zum Jahr 2015, wenn auch der Wendepunkt der RK 30 etwas höher liegt. Beide RK befinden sich damit noch eher am Anfang des „Early Majority“-Stadiums. Auch hier stellen PV-Anlagen im Jahr 2009 keine Innovation mehr dar und sind nun auch für Personen eine interessante Investition, die neuen Technologien zunächst vorsichtiger gegenüber treten. In RK 10, dem städtischen Raum, hat sich die PV-Technologie am langsamsten verbreitet und beginnt erst, den Massenmarkt zu erobern. Der Wendepunkt wird 2019 erreicht und die Diffusion ist auch im Jahr 2030 noch nicht abgeschlossen. Die Unterschiede in den Kurvenverläufen sind auf Unterschiede im Innovations- und Imitationseffekt zurückzuführen, die im folgenden Kapitel näher erläutert werden.

### 8.2.1.2 Unterschiede im Innovations- und Imitationseffekt

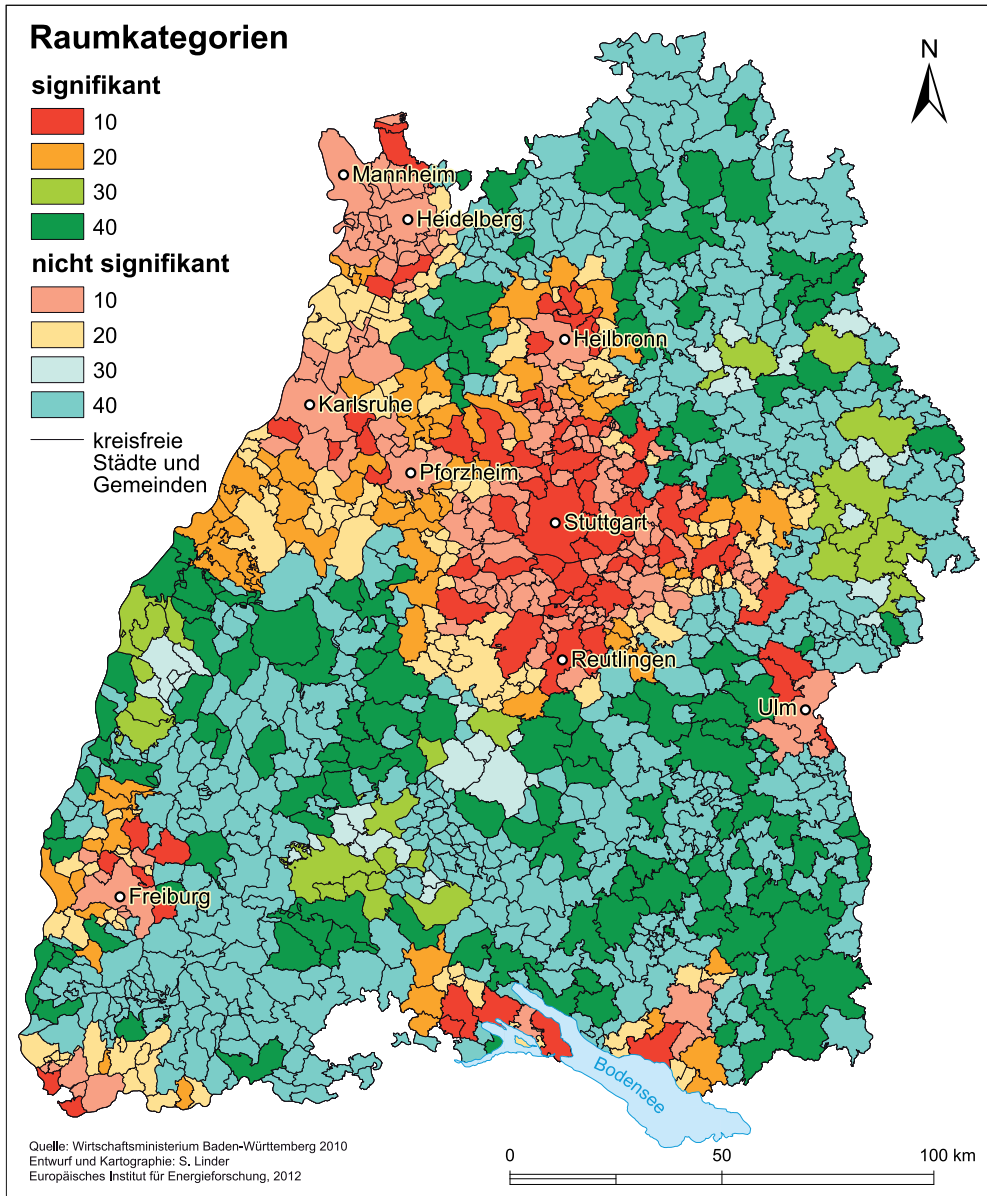
Um präzisere Aussagen über Innovations- und Imitationseffekt in den einzelnen Gemeinden treffen zu können, wurde für jede Gemeinde ein Diffusionsmodell geschätzt. In Karte 10 sind die Gemeinden jeder RK hervorgehoben, für die signifikante Modellschätzungen auf dem Niveau von 5% erreicht werden konnten, d.h. nur Gemeinden, bei denen sowohl der Innovationskoeffizient, als auch der Imitationskoeffizient ein Signifikanzniveau von 5% erreichen, gehen in die Auswertung ein. Somit werden die Diffusionskurven von 319 (32%) der 1103 Gemeinden analysiert (s. Abb. 33).

Abb. 33: Anzahl der in die Auswertung eingehenden Gemeinden der einzelnen RK



Quelle: WiMi BW (2010)

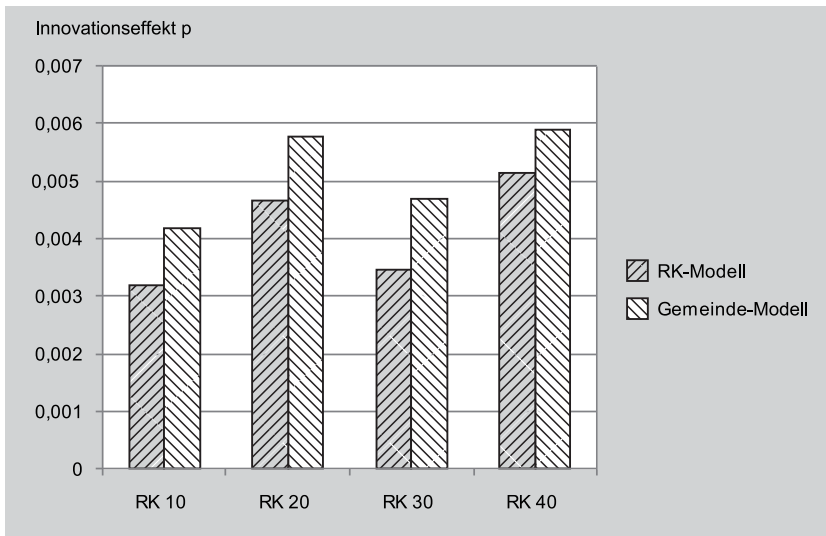
Karte 10: Gemeinden mit signifikanten und nicht signifikanten Modellschätzungen. RK im Vergleich.



Modellschätzungen sind nicht signifikant, wenn die Zeitreihe zu kurz ist, da eine Schätzung in der Regel nur möglich ist, wenn mindestens neun Datenpunkte vorliegen (d.h. die Diffusion muss spätestens 2001 beginnen). Ein weiterer Grund liegt in den starken Schwankungen der Neuinstallationen in einzelnen Gemeinden: In vielen Gemeinden steigt die Anzahl an neuen PV-Anlagen nicht kontinuierlich von 2000 bis 2009 an, so dass die Diffusion nicht mittels des Bass-Modells beschrieben werden kann. Die Adoptions- und Diffusionskurve eines signifikanten und nicht-signifikanten Gemeinde-Modells ist in Abb. 43 und Abb. 44 (ANHANG 5) dargestellt.

In Abb. 34 ist der Innovationseffekt der vier RK dargestellt, wobei der  $p$ -Wert der RK-Modelle (vgl. Abschnitt 8.2.1.1) jeweils dem Median- $p$ -Wert<sup>27</sup> der signifikant geschätzten Gemeinde-Modelle einer RK gegenübergestellt ist. Es zeigt sich, dass der Innovationseffekt deutlich zwischen den RK schwankt; im RK-Modell liegen die  $p$ -Werte zwischen 0,003 und 0,005, der Median der  $p$ -Werte der Gemeinde-Modelle schwankt zwischen 0,004 und 0,006. Die Ergebnisse des U-Tests zeigen, dass sich die  $p$ -Werte der Gemeinden jedoch nur zwischen RK 10 und RK 20 sowie RK 10 und RK 40 signifikant unterscheiden (vgl. ANHANG 5, Tab. 32).

Abb. 34: Vergleich der Innovationseffekte  $p$  zwischen den vier RK



Quelle: Eigene Berechnung

Ausgehend von der Diffusionstheorie wurde angenommen, dass der Innovationseffekt in Städten höher ist als im ländlichen Raum. Diese Annahme bestätigt sich jedoch nicht, da der Innovationseffekt innerhalb der städtischen und ländlichen RK schwankt. RK 10 und RK 30 weisen ähnlich niedrige  $p$ -Werte auf. Der niedrige

<sup>27</sup> Zum Vergleich der RK wurde der Median und nicht der Mittelwert gewählt, weil  $p$  und  $q$  keine Normalverteilung über die Gemeinden einer RK aufweisen.



$p$ -Wert in RK 10 könnte darauf zurückzuführen sein, dass in städtischen Räumen seltener Change Agents vorhanden waren, die besonders in der Innovationsphase von Bedeutung sind, um den Diffusionsprozess anzustoßen. Hinzu kommt, dass in der Stadt häufiger zur Miete gewohnt wird und somit seltener die Möglichkeit zur Installation einer PV-Anlage auf dem eigenen Hausdach besteht.

Deutlich höhere Innovationskoeffizienten sind dagegen in RK 20 und RK 40 zu finden. RK 20 umfasst die Gemeinden des suburbanen Raums, d.h. den Speckgürtel um die Städte, in dem oft wohlhabendere Haushalte mit relativ hohem Einkommen und hohen Bildungsabschlüssen wohnen, die in der Diffusionstheorie als innovationsfreudiger bezeichnet werden. Gemeinden der RK 40 sind dagegen stark landwirtschaftlich geprägt. Wie sich bereits in den Experteninterviews herausstellte, sind die Landwirte im Bereich der PV als Innovatoren aufgetreten. Sie haben die hohen Renditechancen durch die EEG-Vergütung frühzeitig erkannt und die ihnen zur Verfügung stehenden großen Dachflächen genutzt (vgl. Abschnitt 2.2 und 7.1.2). Zudem zeigte sich in der stark ländlich geprägten Hot Spot-Region Heilbronn-Franken, dass dort verschiedene Change Agents vorhanden waren, die den Diffusionsprozess maßgeblich vorangetrieben haben (vgl. Abschnitt 7.1.3).

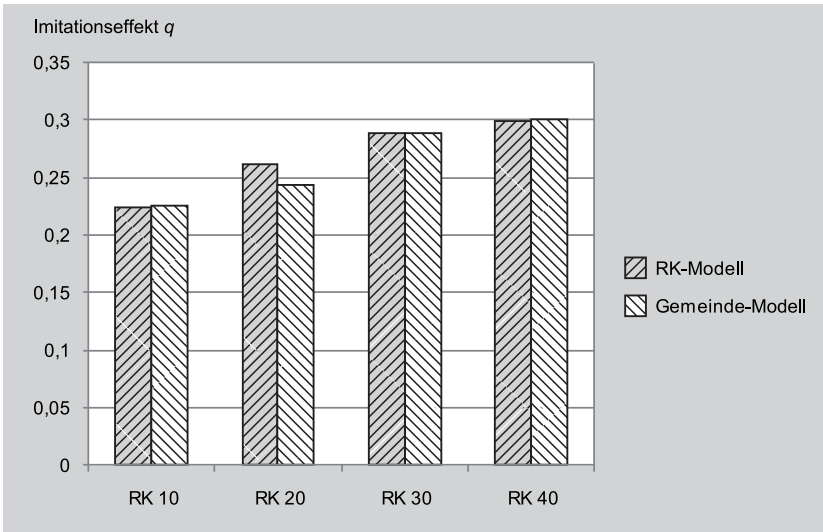
Der vergleichsweise niedrige  $p$ -Wert der Gemeinden der RK 30 ist schwer zu erklären, da die Haushalte dieser Gemeinden ähnlich gute Voraussetzungen haben wie in der ländlichen RK 40. Der Unterschied im Innovationseffekt liegt vermutlich an der geringeren Anzahl an Landwirten.

In Abb. 35 ist der Imitationseffekt dargestellt, wobei auch hier die Ergebnisse der RK-Modelle den Medianen der signifikanten Gemeinde-Schätzungen gegenübergestellt sind. In beiden Modellen liegt der Imitationseffekt zwischen 0,22 und 0,3. Anders als beim Innovationseffekt wird hier jedoch ein deutlicher Trend sichtbar: der Imitationseffekt steigt von der Stadt zum Land an. Auch der U-Test zeigt, dass signifikante Unterschiede im  $q$ -Wert zwischen den städtischen und ländlichen Gemeinden vorliegen (vgl. ANHANG 5, Tab. 33). Dieses Ergebnis bestätigt die Hypothese, dass ein stärkeres Imitationsverhalten in ländlichen Gemeinden besteht. Wie zu Anfang des Kapitels 8.2.1 angenommen, ist dies wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass auf dem Land das Verhalten der Bewohner innerhalb einer Gemeinde stärker beobachtet wird. Der Kauf einer PV-Anlage wird in den ländlichen Gemeinden also vermutlich häufiger durch die Wahrnehmung von PV-Anlagen in der Nachbarschaft angestoßen. Die beste Überzeugung bietet das Beispiel einer gut funktionierenden Anlage auf dem Hausdach des Nachbarn (vgl. Abschnitt 7.1.4).

## 8.2.2 Typisierung der Gemeinden nach Innovations- und Imitationseffekt

Im vorangegangenen Abschnitt 8.2.1 wurde deutlich, dass sich die RK im Innovations- und Imitationseffekt unterscheiden. Die Siedlungsstruktur hat also Einfluss auf den Diffusionsverlauf in den Gemeinden. Die Frage ist nun, ob die Gemeinden auch anhand des Innovations- und Imitationskoeffizienten typisiert werden können: Durch welche Eigenschaften zeichnen sich Gemeinden aus, die einen hohen Innovations- oder Imitationseffekt aufweisen?

Abb. 35: Vergleich der Imitationseffekte  $q$  zwischen den vier RK



Quelle: Eigene Berechnung

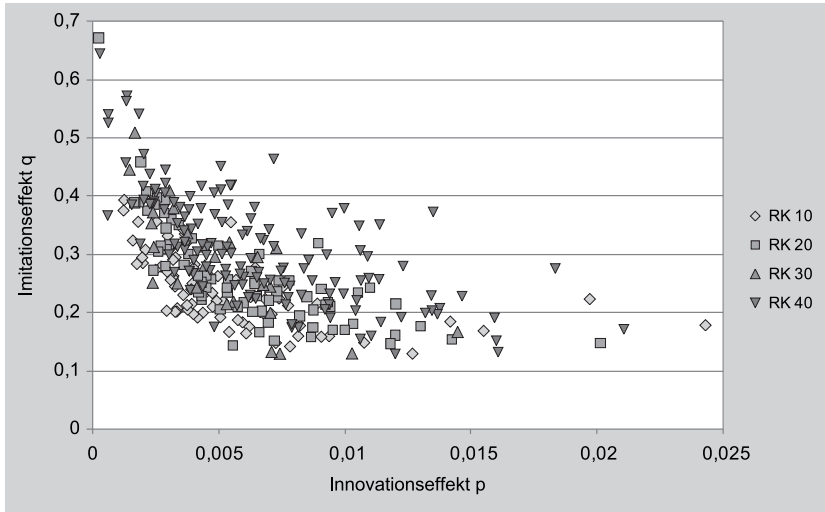
Zwischen Innovations- und Imitationseffekt besteht ein negativer Zusammenhang. Der Korrelationskoeffizient nach Spearman ist hoch signifikant ( $\alpha = 0,01$ ) und weist eine Korrelation von  $-0,649$  auf<sup>28</sup>. Das bedeutet, je höher der Innovationskoeffizient  $p$ , desto niedriger der Imitationskoeffizient  $q$ . In innovativen Gemeinden wird also tendenziell weniger imitiert bzw. Gemeinden, die einen ausgeprägten Imitationseffekt aufweisen, sind meist weniger innovativ. Der Zusammenhang wird in Abb. 36 veranschaulicht.  $p$  und  $q$  werden gegenübergestellt, wobei zwischen den vier RK unterschieden wird. Wie auch bereits durch Abb. 34 und in Abschnitt 8.2.1.2 deutlich wurde, liegen die Werte der Gemeinden der RK 40 meist über den restlichen Gemeinden, da sowohl Innovations- als auch Imitationskoeffizienten überdurchschnittlich hoch ausgeprägt sind.

Um Gemeinden nun anhand des Innovations- und Imitationseffekts zu charakterisieren, wurde eine Regressionsanalyse durchgeführt. Ziel war zu überprüfen, ob die Höhe von  $p$  und  $q$  durch die Siedlungsstruktur (EZFH/EW und LW/EW) als auch durch sozioökonomische Variablen (Familienstruktur, Bildung und Einkommen<sup>29</sup>) erklärt werden können. Da sowohl  $p$  als auch  $q$  räumlich autokorreliert sind (Moran's I von  $0,223$  bzw.  $0,267$ ), wurde wie in Abschnitt 6.4.2 das Spatial Lag Model berechnet. Die Modellschätzungen führen jedoch zu keinen befriedigenden Ergebnissen, da weder  $p$  noch  $q$  durch die oben aufgeführten Variablen erklärt werden können.

28 Der Korrelationskoeffizient nach Spearman wurde verwendet, da  $p$  und  $q$  nicht normalverteilt sind (vgl. KS-Test und Korrelationskoeffizienten in ANHANG 5, Tab. 34 und Tab. 35).

29 Familienstruktur: Familien/EW, Bildung: Anteil an sozialversicherungspflichtig Beschäftigten mit FH- oder Uniabschluss, Einkommen: Einkünfte/Steuerpflichtige (StALa BW 2010).

Abb. 36: Zusammenhang zwischen Innovations- und Imitationseffekt. Vergleich zwischen Gemeinden der unterschiedlichen RK



Quelle: Eigene Berechnung

Im  $p$ -Modell ist allein der Regressionskoeffizient der Familienstruktur signifikant ( $\alpha = 0,01$ ), im  $q$ -Modell erreicht kein Regressionskoeffizient ein Signifikanzniveau von 0,05 (vgl. ANHANG 5, Tab. 32 und Tab. 33).

Die Ursache für die mangelnde Erklärungskraft der Modelle könnte einerseits darin liegen, dass die Variablen nur den Zustand von 2009 wiedergeben und nicht geeignet sind, die Diffusionskoeffizienten, welche die PV-Entwicklung von 2000 bis 2009 beschreiben, zu erklären. So kann der Innovationseffekt bspw. nicht mehr durch die Bildungs- und Einkommensverhältnisse von 2009 erklärt werden. Zum anderen ist die Diffusion von PV-Anlagen ein sozialer Prozess, der durch eine Vielzahl von Einflussfaktoren getrieben wird, die nicht quantitativ untersucht werden können. Wie sich durch die Experteninterviews zeigte, hängt die Innovationskraft einer Gemeinde stark davon ab, ob Change Agents in einer Region vorhanden sind, wie aktive PV-Unternehmer, Bürgermeister, Maschinenringe, Energieagenturen, Solarvereine etc., die die Diffusion vor Ort anstoßen und vorantreiben (vgl. Abschnitt 2.2.1 und 7.1.3). Der Imitationseffekt wird durch kognitive Prozesse gesteuert, durch die Abwägung des Nutzens einer PV-Anlage auf dem eigenen Hausdach, aber unter Umständen auch durch nicht rational begründbare Faktoren, die schwer messbar sind (vgl. Abschnitt 7.1.3 und 7.1.4). Eine einfache Typisierung der Gemeinden anhand des Innovations- und Imitationskoeffizienten mit Hilfe von sozioökonomischen Daten ist deshalb nicht möglich.

## 8.3 Räumlicher Nachbarschaftseffekt zwischen den Gemeinden

In Abschnitt 8.2 wurde das Bass-Modell für die Gemeinden BWs berechnet und der Innovations- und Imitationseffekt innerhalb der einzelnen Gemeinden untersucht. Es ist jedoch bisher keine Aussage darüber möglich, ob Wechselwirkungen im Imitationsverhalten auch zwischen den Gemeinden bestehen. In diesem Abschnitt wird nun untersucht, ob ein Nachbarschaftseffekt *zwischen* den Gemeinden in der Diffusion von PV-Anlagen existiert, d.h. ob eine hohe Anzahl an PV-Installationen in einer Gemeinde Auswirkungen auf die Anzahl der Neuinstallationen im Folgejahr in den angrenzenden Gemeinden hat.

Im ersten Schritt wird eine theoretische Erweiterung des Bass-Modells vorgeschlagen, die darauf abzielt, den Imitationseffekt *innerhalb* einer Gemeinde um einen Nachbarschaftseffekt *zwischen* Gemeinden zu ergänzen (8.3.1). Im zweiten Schritt wird der Einfluss des Nachbarschaftseffekts mit Hilfe der Ergebnisse der Clusteranalyse aus Abschnitt 6.3.2.2 untersucht (8.3.2). Die Bedeutung des Nachbarschaftseffekts für die Entstehung räumlicher Unterschiede in der PV-Nutzung wird schließlich anhand des Vergleichs von Hot Spot-Gemeinden mit den übrigen Gemeinden des ländlichen Raums erläutert (Abschnitt 8.3.3).

### 8.3.1 Lösungsansatz zur Modellierung des Nachbarschaftseffekts zwischen Gemeinden

Die räumliche Autokorrelation von PV-Anlagen und die damit verbundene Entstehung von Hot und Cold Spots der PV-Nutzung zeigen, dass Nachbarschafts-Wechselwirkungen zwischen den Gemeinden bestehen (vgl. Abschnitt 6.3.2). Der signifikante Spatial Lag im räumlichen Regressionsmodell weist zudem auf einen räumlichen Diffusionsprozess auf Gemeindeebene hin (vgl. Abschnitt 6.4.2). Die Frage ist nun, wie der Nachbarschaftseffekt zwischen Gemeinden in das Bass-Modell integriert werden kann. Eine Lösungsmöglichkeit wird in Gleichung 8.5 vorgestellt.

$$n_{i,t} = \frac{dN_{i,t}}{dt} = p_i * (M_i - N_{i,t}) + q_i * \frac{N_{i,t}}{M_i} * (M_i - N_{i,t}) + c_i * \sum_{j=1}^k W_{ij} \frac{N_{j,t}}{M_j} * (M_i - N_{i,t}) \quad (8.5)$$

Die ersten zwei Summanden entsprechen dem bekannten Bass-Modell, der dritte Summand beschreibt den Nachbarschaftseffekt zwischen den Gemeinden.  $W_{ij}$  stellt die Nachbarschaftsmatrix dar, die angibt, ob Gemeinde  $i$  mit Gemeinde  $j$  benachbart ist (vgl. Abschnitt 6.3.1.1).  $k$  ist die Anzahl an Gemeinden.  $N_{j,t}$  ist die kumulierte Anzahl an PV-Anlagen pro EW in der Nachbargemeinde  $j$  im Jahr  $t$ .  $M_j$  ist das Marktpotential der Nachbargemeinde  $j$ .  $c_i$  gibt die Stärke des Nachbarschaftseffekts an, d.h. den Imitationskoeffizienten bezogen auf die Anzahl an PV-Anlagen in den

Nachbargemeinden. Die Anzahl an Neuinstallationen  $n_{i,t}$  in einer Gemeinde werden nun zusätzlich (über den Koeffizienten  $c_i$ ) durch die Anzahl an PV-Anlagen in den Nachbargemeinden bestimmt.

Die Gleichung 8.5 stellt ein gekoppeltes System von  $k$  nichtlinearen Differentialgleichungen dar. Der Kopplungsterm  $c_i * \sum_{j=1}^k W_{ij} \frac{N_{j,t}}{M_j} * (M_i - N_{i,t})$  erschwert die Lösung der Differentialgleichung im Vergleich zum normalen Bass-Modell. Eine exakte Lösung der Gleichung 8.5 ist deshalb nicht bekannt.

Unter der Annahme, dass  $c_i \ll q_i$  kann die Differentialgleichung störungstheoretisch genähert werden. Diese Annahme ist gerechtfertigt, da davon ausgegangen werden kann, dass der Imitationseffekt *innerhalb* einer Gemeinde größer ist, als *zwischen* den Gemeinden. Eine störungstheoretische Näherung bedeutet, dass die Lösung in Ordnungen des Parameters  $c_i$  entwickelt wird (vgl. COHEN-TANNOUJJI et al. 2008). Wegen der schwachen Kopplung  $c_i$  zwischen den Nachbargemeinden wird die PV-Diffusion immer noch gut beschrieben, wenn die Störungsreihe nach der ersten Ordnung in  $c$  abgebrochen wird.

Die Wechselwirkungen zwischen den Nachbargemeinden in erster Ordnung in  $c_i$  wird durch folgende Differentialgleichung beschrieben (Gleichung 8.6).

$$\begin{aligned}
 n^{(1)}_{i,t} &= \frac{dN^{(1)}_{i,t}}{dt} & (8.6) \\
 &= p_i * (M_i - N^{(1)}_{i,t}) + q_i * \frac{N^{(1)}_{i,t}}{M_i} * (M_i - N^{(1)}_{i,t}) + c_i * \sum_{j=1}^k W_{ij} \frac{N^{(0)}_{j,t}}{M_j} * (M_i - N^{(1)}_{i,t})
 \end{aligned}$$

Die hochgestellte „(1)“ steht dafür, dass es sich bei dieser Gleichung um die genäherte Lösung zur ersten Ordnung in  $c_i$  handelt.  $N^{(0)}$  beschreibt die Lösung des ungekoppelten Bass-Modells (nullter Ordnung in  $c_i$ ) der Nachbargemeinde. In dieser Näherung wird die Gemeinde  $i$  über den Parameter  $c_i$  von ihren Nachbargemeinden beeinflusst. Die Nachbargemeinden verhalten sich jedoch nach dem ungekoppelten Bass-Modell. Wechselwirkungen höherer Ordnung in  $c_i$ , d.h. der Einfluss von den Nachbarn der Nachbarn, werden damit nicht berücksichtigt.

Gleichung 8.7 ist nun ein System von ungekoppelten Differentialgleichungen, die die Lösung des Bass-Modells mit  $N^{(0)}_{j,t}$  als „Quellterm“ enthalten. Ein solches System kann numerisch gelöst und geschätzt werden. Aufgrund des Terms  $N^{(0)}_{j,t}$  ist die analytische Lösung jedoch kompliziert.

Für die Modellierung der PV-Diffusion wird von der Verwendung des in Gleichung 8.6 beschriebenen Modells abgesehen, da die Zeitreihen von maximal zehn PV-Werten der Gemeinden (von 2000 bis 2009) zu kurz sind und zudem zu starke Schwankungen aufweisen, um drei Parameter ( $p$ ,  $q$  und  $c$ ) signifikant zu schätzen. Bei der Bestimmung des Marktpotentials wurde bereits gezeigt, dass es nicht möglich ist, drei Parameter ( $p$ ,  $q$  und  $M$ ) anhand der verfügbaren Daten zu schätzen. Auch für Gleichung 8.6 wird deshalb davon ausgegangen, dass eine Schätzung der drei Parameter ( $p$ ,  $q$  und  $c$ ) mit den zur Verfügung stehenden PV-Daten nicht möglich ist.

Das Vorhandensein der PV-Cluster zeigt, dass sich benachbarte Gemeinden ähnlich verhalten (vgl. Abschnitt 6.3.2.2). Es gilt also  $\frac{N_i}{M_i} - \frac{N_j}{M_j} \ll \frac{N_i}{M_i}$ , wobei  $i$  und  $j$  Nachbargemeinden sind. Aus diesem Grund ist es möglich, Gleichung 8.5 wie folgt zu vereinfachen:

$$\begin{aligned} n_{i,t} = \frac{dN_{i,t}}{dt} &\approx p_i * (M_i - N_{i,t}) + q_i * \frac{N_{i,t}}{M_i} * (M_i - N_{i,t}) + c_i * \sum_{j=1}^k W_{ij} \frac{N_{i,t}}{M_i} * (M_i - N_{i,t}) \\ &= p_i * (M_i - N_{i,t}) + \left( q_i + c_i * \sum_{j=1}^k W_{ij} \right) * \frac{N_{i,t}}{M_i} * (M_i - N_{i,t}) \end{aligned} \quad (8.7)$$

Die Näherung der Gleichung 8.7 zeigt, dass ein Nachbarschaftseffekt zwischen den Gemeinden einen erhöhten Imitationsparameter zur Folge hat, der sich aus dem Term  $q_i + c_i * \sum_{j=1}^k W_{ij}$  zusammensetzt. Wenn Term  $q_i + c_i * \sum_{j=1}^k W_{ij}$  groß ist, kann davon ausgegangen werden, dass ein Nachbarschaftseffekt vorhanden ist, da der Imitationseffekt  $q_i$  durch einen Nachbarschaftseffekt  $c_i$  zwischen den Gemeinden ergänzt wird.

Basierend auf diesen Überlegungen wird in den folgenden zwei Abschnitten untersucht, inwiefern die Clusterbildung von PV-Anlagen Ausdruck des Nachbarschaftseffekts zwischen Gemeinden ist.

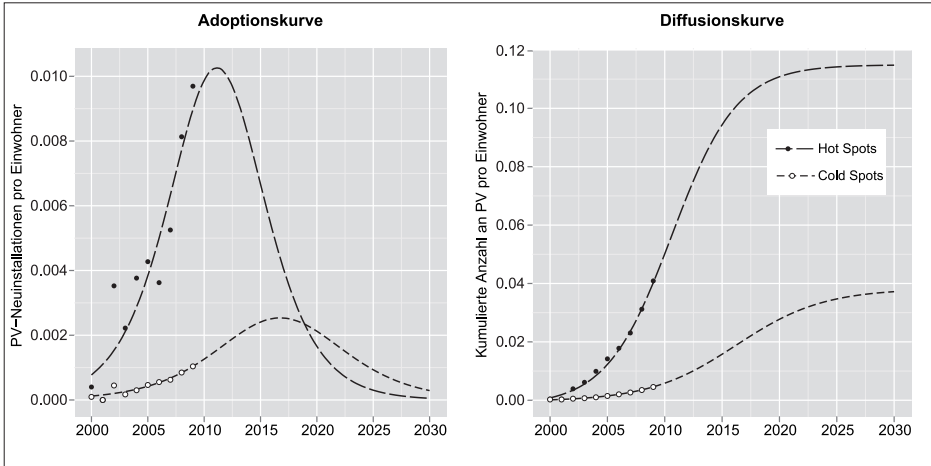
### 8.3.2 Hot Spots und Cold Spots im Vergleich

Ziel dieses Kapitels ist, zu untersuchen, ob ein Nachbarschaftseffekt zwischen Gemeinden bei der PV-Diffusion existiert. Hierzu werden Hot Spot (HS)-Gemeinden mit Cold Spot (CS)-Gemeinden verglichen<sup>30</sup>. Wenn der Imitationseffekt in HS-Gemeinden höher ist als in CS-Gemeinden, bedeutet dies, dass die Nachbarschaft zu anderen Gemeinden mit einer hohen Anzahl an PV-Anlagen förderlich ist für die schnelle Diffusion von PV-Anlagen.

Genauso wie beim Vergleich der RK wurde zuerst je ein Modell für HS und CS geschätzt und die Adoptions- und Diffusionskurven verglichen (im Folgenden als „Cluster-Modelle“ bezeichnet). Abb. 37 zeigt, dass das Marktpotential in den HS fast drei Mal so hoch liegt, wie in den CS (ca. 0,12 vs. 0,04). Bei Betrachtung der Adoptionskurven wird deutlich, dass in den HS der Wendepunkt im Jahr 2009 fast erreicht ist, d.h. die Gemeinden der HS befinden sich im Durchschnitt bereits am Ende des „Early Majority“-Stadiums. Die Modellschätzung kommt zu dem Ergebnis, dass ab 2011 in den HS die Anzahl an Neuinstallationen wieder zurückgeht. In den CS wird der Wendepunkt erst ab ca. 2017 erreicht. Die Diffusionskurve der CS zeigt, dass die Gemeinden der CS sich erst am Ende des „Early Adopter“-Stadiums befinden und die Diffusion dort wesentlich langsamer vorangeht.

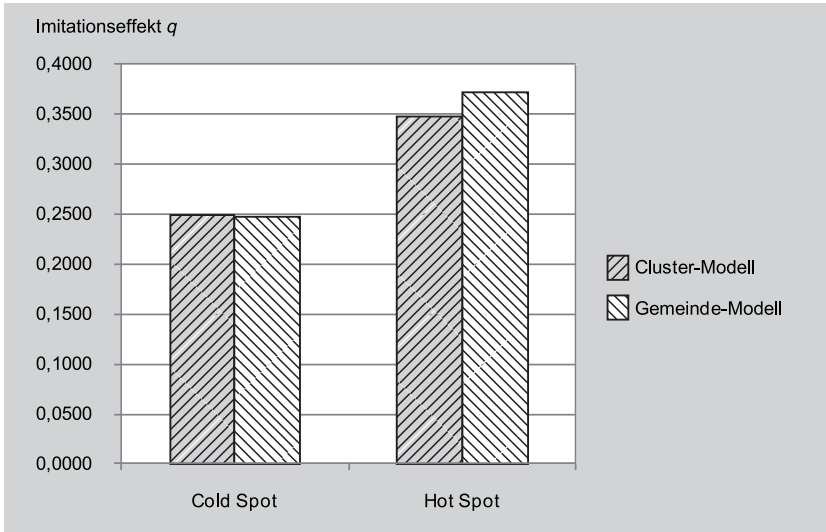
<sup>30</sup> Ergebnisse der LISA-Statistik Kapitel 6.3.2.2

Abb. 37: Adoptions- und Diffusionskurven der Hot und Cold Spots



Quelle: Eigene Berechnung

Abb. 38: Vergleich der Imitationseffekte  $p$  zwischen Hot und Cold Spots



Quelle: Eigene Berechnung

Die Unterschiede in den Diffusionskurven spiegeln sich auch in der Ausprägung von Innovations- und Imitationskoeffizient wider. Auch hier werden wie beim RK-Vergleich zur Auswertung der Schätzungen die Ergebnisse der Gemeinde-Modelle hinzugezogen. Karte 11 zeigt, für welche HS- und CS-Gemeinden signifikante Modell-schätzungen auf dem Signifikanzniveau von 5% vorliegen. Von den 139 HS-Gemeinden gehen 31 (22 %) in die Auswertung ein, von den 149 CS-Gemeinden 42 (28 %).

Karte 11: Gemeinden mit signifikanten und nicht signifikanten Modellschätzungen. HS und CS im Vergleich.

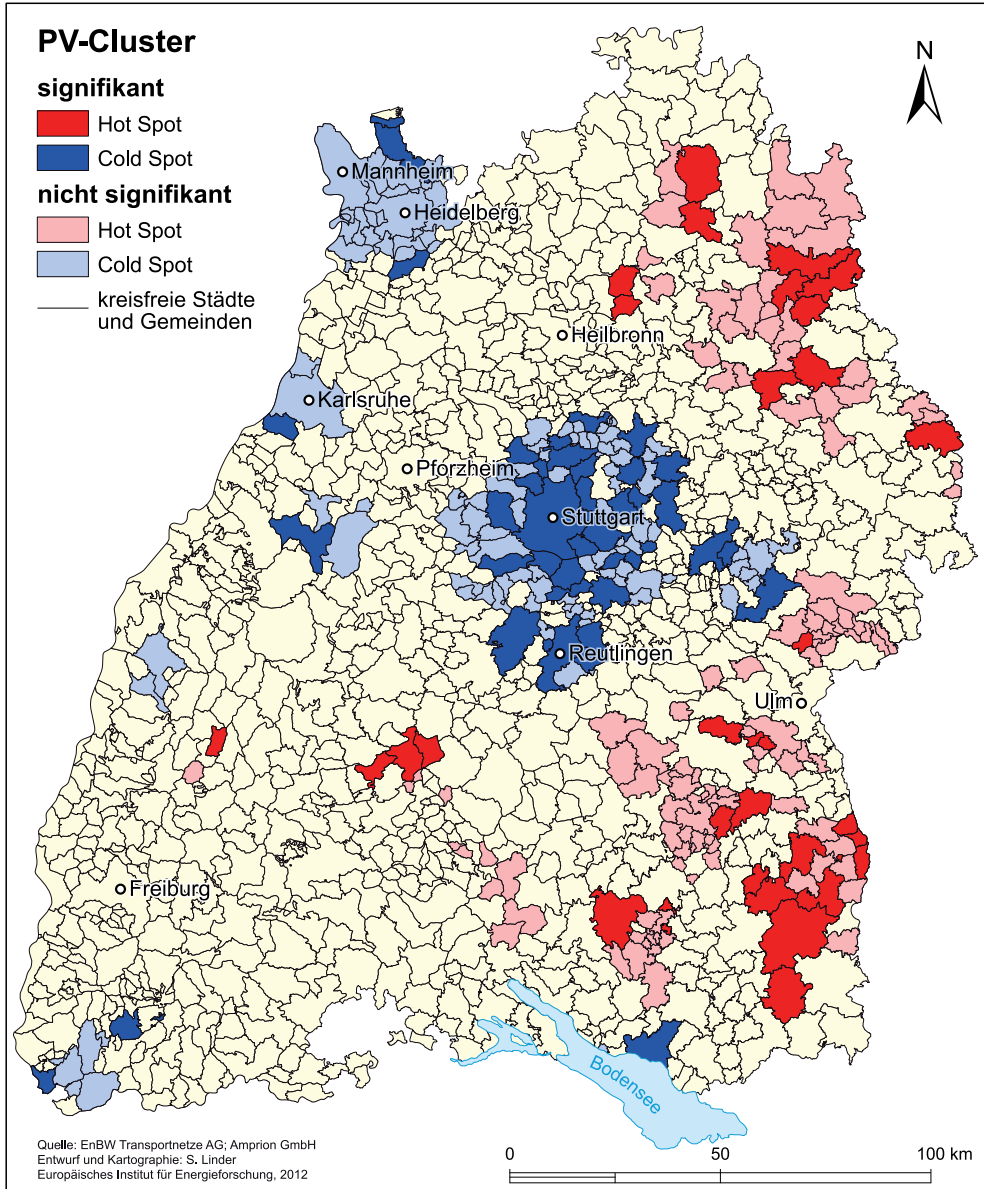
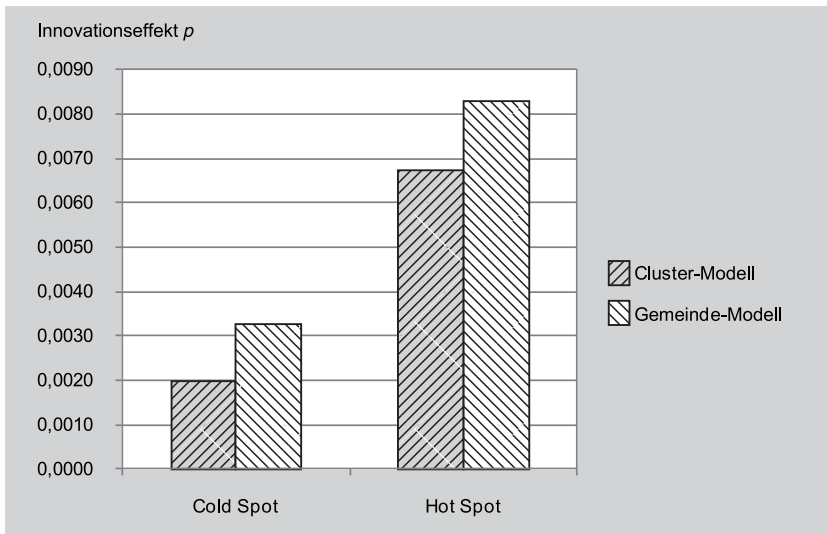




Abb. 38 zeigt, dass der Imitationseffekt in den HS ca. 1,5-mal so hoch liegt wie in den CS, sowohl im aggregierten Cluster-Modell als auch beim Vergleich der Mediane der  $q$ -Werte der signifikanten Gemeinden. Der U-Test ist auf dem Niveau von 0,01 signifikant (HS:  $q = 0,37$  vs CS:  $q = 0,25$ ). Die Lage einer Gemeinde innerhalb eines HS führt also zu einem höheren Imitationseffekt und weist darauf hin, dass ein Nachbarschaftseffekt der PV-Diffusion vorhanden ist. Das bedeutet, dass die Imitation von PV-Anlagen vermutlich nicht nur durch die persönliche Kommunikation mit den direkten Nachbarn innerhalb einer Gemeinde beeinflusst wird, sondern auch durch die Wahrnehmung von PV-Anlagen und den Informationsaustausch mit den Nachbargemeinden. In HS-Gemeinden werden mehr PV-Anlagen wahrgenommen, da diese Gemeinden von Gemeinden umgeben sind, die auch überdurchschnittlich viele PV-Anlagen pro EW aufweisen, was offensichtlich die Nachahmung fördert.

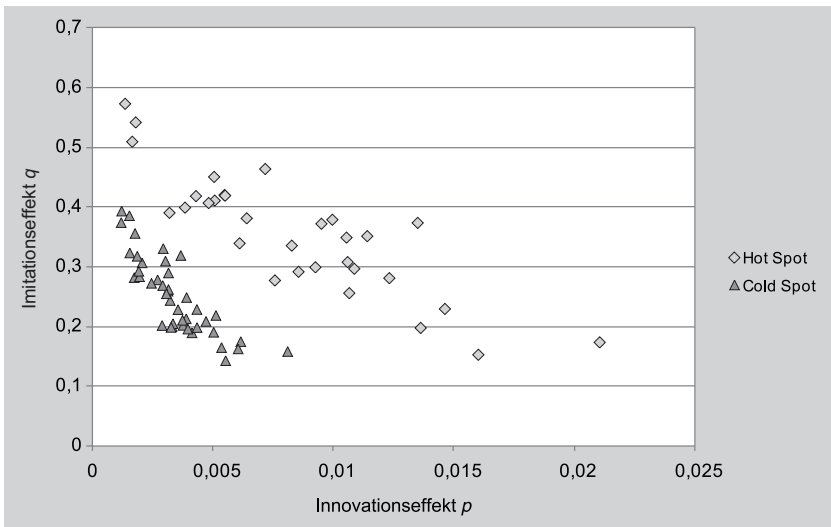
Ein Vergleich der  $p$ -Werte zwischen HS und CS zeigt, dass die Unterschiede in der Diffusion auch durch Unterschiede im Innovationseffekt bedingt sind. HS-Gemeinden weisen einen 2,5-mal so hohen Innovationseffekt auf als CS-Gemeinden (HS:  $p = 0,008$  vs. CS:  $p = 0,003$  mit  $\alpha = 0,001$ ) (vgl. Abb. 39). HS-Gemeinden sind demnach auch Orte, in denen eine hohe Innovationsbereitschaft vorhanden ist und in denen die PV-Diffusion angestoßen wurde. Eine Ursache ist sicherlich, dass HS-Gemeinden zu 95% im ländlichen Raum (RK 40) liegen, in dem durch die Siedlungsstruktur günstige Voraussetzungen für die Installation von PV gegeben sind. Der hohe Innovationseffekt lässt sich dort zum Teil mit der hohen Anzahl an Landwirten erklären, die häufig als Innovatoren auftraten und zahlreich in PV investiert haben. Darüber hinaus sind vermutlich weitere Faktoren, wie das Vorhandensein von Change Agents in den HS-Gemeinden, für einen hohen Innovationseffekt verantwortlich (vgl. Abschnitt 7.1.3).

Abb. 39: Vergleich der Innovationseffekte  $p$  zwischen Hot und Cold Spots



Quelle: Eigene Berechnung

Abb. 40: Zusammenhang zwischen Innovations- und Imitationseffekt. Vergleich zwischen Hot Spot- und Cold Spot-Gemeinden



Quelle: Eigene Berechnung

In Abb. 40 ist der Zusammenhang zwischen Innovations- und Imitationseffekt für HS- und CS-Gemeinden der signifikanten Modelle dargestellt. Ähnlich wie bei den Gemeinden der RK-Analyse zeigt sich auch hier ein negativer Zusammenhang zwischen  $p$  und  $q$ : je höher der Innovationseffekt, desto niedriger ist der Imitationseffekt. Wie bereits aus den U-Tests dieses Kapitels hervorging, liegen die Innovations- und Imitationseffekte der HS-Gemeinden im Durchschnitt über denen der CS-Gemeinden. Unter den HS-Gemeinden gibt es ein paar Gemeinden, die sich durch einen besonders hohen Innovations- jedoch niedrigen Imitationseffekt auszeichnen. Diese Gemeinden waren vermutlich die Keimzellen eines Clusters, in denen früh in PV investiert wurde und die die Diffusion in der Region angestoßen haben. Das andere Extrem bilden HS-Gemeinden mit überdurchschnittlich hohen Imitationseffekten, die für ein schnelles Wachstum der Cluster sorgen. PV-Anlagen entstanden in diesen Gemeinden weniger durch innovatives Verhalten, sondern fast ausschließlich durch Nachahmung von PV-Besitzern in der eigenen und den Nachbargemeinden.

### 8.3.3 Vergleich der Hot Spot-Gemeinden mit den übrigen Gemeinden des ländlichen Raums

Im vorigen Abschnitt wurde der Nachbarschaftseffekt im Vergleich zwischen HS- und CS-Gemeinden untersucht. Innovations- und Imitationseffekt spielen in HS jeweils eine größere Rolle als in CS, führen damit zu einer schnelleren Diffusion von PV-Anlagen und durch ein höheres Marktpotential auch zu einer intensiveren PV-

Nutzung. Die Ursache für die Unterschiede im Diffusionsverlauf könnte aber auch in unterschiedlichen Voraussetzungen für die Diffusion in städtischen und ländlichen Räumen liegen, wie sich dies bereits in Abschnitt 8.2.1 in den RK-Modellen abzeichnete.

HS-Gemeinden mit signifikanten Modellschätzungen liegen alle in der ländlichen RK 40. Interessant ist deshalb, die Diffusionsmodelle der HS-Gemeinden mit den Modellen der übrigen Gemeinden der RK 40 zu vergleichen. Unterschiede im Innovations- und Imitationseffekt können dann nicht mehr auf die Unterschiede in der Siedlungsstruktur zurückgeführt werden. Die Frage ist also, warum sich einzelne Gemeinden innerhalb des ländlichen Raums (RK 40) zu HS clustern.

Werden die Diffusionsmodelle der HS-Gemeinden allen anderen Gemeinden der RK 40 gegenübergestellt, so zeigt sich, dass auch hier Innovations- und Imitationseffekt in HS signifikant höher liegen. Obwohl eine ähnliche Siedlungsstruktur besteht, sind HS-Gemeinden innovativer (HS:  $p = 0,008$  vs. RK 40:  $p = 0,005$  mit  $\alpha = 0,01$ ). In der HS-Region müssen also weitere begünstigende Faktoren vorliegen, die neben der hohen Anzahl an Landwirten die Innovativität in der Gemeinde beeinflusst haben, wie dies bereits in der Region Heilbronn-Franken durch die Experteninterviews herausgestellt wurde (vgl. Abschnitt 7.1.3). Zudem liegt der Imitationseffekt in den HS-Gemeinden im Vergleich zu den restlichen RK 40-Gemeinden deutlich höher (HS:  $q=0,37$  vs. RK 40  $q=0,28$  mit  $\alpha = 0,01$ ). Trotz gleicher Siedlungsstruktur wird in HS-Gemeinden mehr imitiert. Dies weist darauf hin, dass die PV-Diffusion nicht nur durch die Anzahl an PV-Anlagen in der eigenen Gemeinde beeinflusst wird, sondern auch durch die überdurchschnittlich hohe PV-Nutzung in den Nachbargemeinden (vgl. Abschnitt 8.3.1). Damit kann der Rückschluss gezogen werden, dass der Nachbarschaftseffekt zwischen den Gemeinden dazu beiträgt, dass sich HS der PV-Nutzung ausbilden.

PV-Cluster entstehen also einerseits durch günstige Voraussetzungen wie die Siedlungsstruktur und innovative Personen oder Institutionen in der Region (Landwirte, Bürgermeister, Energieagenturen, Maschinenringe, Solarvereine etc.), die einen hohen Innovationseffekt und damit ein schnelles Wachstum der PV-Nutzung in den Anfangsjahren bewirken. In den Folgejahren kommt es durch den Imitationseffekt zu positiven Rückkoppelungen: EW der PV-Gemeinden werden durch die hohe Anzahl an PV-Anlagen in der eigenen Gemeinde und in den Nachbargemeinden dazu ange-regt, sich mit der Technologie auseinanderzusetzen. Durch die Wahrnehmung einer Vielzahl an Anlagen und durch die Möglichkeit des persönlichen Informationsaustausches werden sie zur Imitation, d.h. zum Kauf einer eigenen PV-Anlage angestoßen. Imitationseffekte innerhalb und Nachbarschaftseffekte zwischen Gemeinden führen also dazu, dass die PV-Diffusion in den HS-Gemeinden schneller voranschreitet, das Marktpotential früher als in anderen Gemeinden ausgeschöpft wird und HS-Cluster der PV-Nutzung entstehen.

## 8.4 Fazit

In diesem Kapitel wurde gezeigt, dass sich die RK im Diffusionsverlauf unterscheiden. Die Hypothesen zum Innovations- und Imitationseffekt bestätigen sich jedoch nur zum Teil (vgl. Abschnitt 8.2.1). Die Annahme, dass der Innovationseffekt von der Stadt zum Land abnimmt, ist differenzierter zu betrachten: städtische Gemeinden und ländliche Verdichtungsbereiche (RK 10 und RK 30) weisen niedrigere, suburbane Gemeinden und der ländliche Raum (RK 20 und 40) weisen dagegen höhere Innovationseffekte auf. Beim Imitationseffekt bestätigt sich die Annahme, dass die Bedeutung der Imitation von den städtischen RKs zu den ländlichen ansteigt. Die Ergebnisse der RK-Analysen zeigen, dass die Höhe der PV-Nutzung in Zusammenhang steht mit den Unterschieden im Diffusionsverlauf. Eine Typisierung der Gemeinden anhand des Innovations- und Imitationseffekts und sozioökonomischer Daten ist jedoch nicht möglich (vgl. Abschnitt 8.2.2). Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass weitere lokale Faktoren wie das Vorhandensein von Change Agents, die nicht quantitativ untersucht werden können, für die räumlichen Unterschiede verantwortlich sind.

Ein Nachbarschaftseffekt der PV-Diffusion zwischen Gemeinden liegt vor, da der Imitationseffekt in HS-Gemeinden nicht nur im Vergleich zu CS-Gemeinden signifikant höher liegt, sondern auch im Vergleich zu den Gemeinden des ländlichen Raums (RK 40), der alle HS-Gemeinden angehören (vgl. Abschnitt 8.3.2 und 8.3.3). Es zeigt sich also, dass die Lage einer Gemeinde in einem HS zu einem höheren Imitationseffekt führt, da die Bewohner der HS-Gemeinde nicht nur durch die PV-Anlagen in der eigenen Gemeinde, sondern auch durch die hohe Anzahl an PV-Anlagen in den Nachbargemeinden beeinflusst werden. Neben dem Imitationseffekt spielt allerdings auch der Innovationseffekt für die Ausprägung von HS eine Rolle: HS entstehen durch eine überdurchschnittlich hohe Innovationsbereitschaft in einer Region und entwickeln sich zu PV-Clustern durch die überdurchschnittlich starke Ausprägung von Imitations- und Nachbarschaftseffekten.

## 9 Synthese

In dieser Arbeit wurde die räumliche Diffusion von PV-Anlagen bis 30 kWp in den Gemeinden Baden-Württembergs (BW) untersucht. Den Analyserahmen bildeten folgende Forschungsfragen:

- Wie sind PV-Anlagen in den Gemeinden BWs räumlich verteilt und liegen signifikante Unterschiede in der PV-Nutzung vor?
- Was sind die Ursachen für die räumlichen Unterschiede in der Diffusion von PV-Anlagen?
- Wie unterscheiden sich die Gemeinden in der PV-Diffusion?
- Welche Bedeutung hat der Nachbarschaftseffekt für die räumliche Diffusion von PV-Anlagen?

Durch die Analyse der räumlichen Autokorrelation konnte gezeigt werden, dass in BW Regionen mit über- und unterdurchschnittlicher PV-Nutzung bestehen und sich bis zum Jahr 2009 Hot Spots (HS) und Cold Spots (CS) der PV-Nutzung ausgebildet haben. HS-Gemeinden liegen zu 95% im ländlichen Raum (Raumkategorie 40), CS-Gemeinden dagegen zu 85% in den Verdichtungsräumen (Raumkategorie 10) (vgl. Abschnitt 6.3.2.2). Durch die räumliche Regressionsanalyse wurde deutlich, dass die Ursachen für die Unterschiede in der PV-Nutzung zum einen in der Siedlungsstruktur und dem sozialen Gefüge der Gemeinde liegen: Gemeinden mit einem hohen Anteil an EZFH und EZFH-Neubauten, sowie einer hohen Anzahl an Viehbetrieben pro EW und einem hohen Anteil an Familien weisen mehr PV-Anlagen pro EW auf. Zum anderen wird durch die räumliche Regression gezeigt, dass ein räumlicher Nachbarschaftseffekt bei der Diffusion von PV-Anlagen besteht, da der Spatial Lag Parameter hoch signifikant ist (vgl. Abschnitt 6.4.2.2). Die Globalstrahlung eignet sich nicht als Differenzierungsmerkmal, da die Unterschiede in BW zu gering sind und meist von lokalklimatischen Bedingungen überdeckt werden (vgl. Abschnitte 6.4.2.2 und 7.1.3).

In der Fallstudie in der Region Heilbronn-Franken wird die Bedeutung der Landwirte für die PV-Diffusion deutlich, die häufig die Rolle von Innovatoren einnehmen und durch die Installation von großen, gut sichtbaren Dachanlagen die PV-Diffusion vorantreiben (vgl. Abschnitt 7.1.2). Durch die Haushaltsbefragung wurde bestätigt, dass die meisten PV-Eigentümer eher in Familien leben und über Hauseigentum verfügen (vgl. Abschnitt 7.2.3). Wie aus den Experteninterviews hervorging, spielt neben sozioökonomischen Faktoren auch das Vorhandensein von Change Agents eine entscheidende Rolle für die PV-Diffusion, sowie die Netzwerke dieser Akteure innerhalb einer Gemeinde oder Region. Die PV-Diffusion wurde dann entscheidend vorangetrieben, wenn in den Gemeinden aktive Bürgermeister, Solarvereine, PV-Unternehmer oder Elektroinstallateure vorhanden waren. Auf regionaler Ebene nahmen häufig Maschinenringe und Energieagenturen die Rolle von Change Agents ein (vgl. Abschnitt 7.1.3). Auch in der Haushaltsbefragung zeigte sich, dass in Creglingen, einer Gemeinde mit einer überdurchschnittlich hohen PV-Nutzung, der Solarverein und ein aktiver Elektroinstallateur für die schnelle PV-Diffusion verantwortlich waren (vgl. Abschnitt 7.2.4).

Nach der Einschätzung der Experten spielt der Nachbarschaftseffekt für die PV-Diffusion eine Rolle, sowohl über die direkte Kommunikation mit PV-Eigentümern als auch über die Sichtbarkeit der Anlagen. Einerseits wirkt sich Mundpropaganda positiv auf die Kaufentscheidung aus, andererseits funktioniert häufig auch das Prinzip „Sehen und Nachmachen“, da die Beobachtung einer Vielzahl von PV-Anlagen im Umfeld zeigt, dass die Technologie funktioniert. Schließlich spielen auch der Neidfaktor und das soziale Prestige, das mit einer umweltfreundlichen, gut sichtbaren PV-Installation auf dem Hausdach einhergeht, eine Rolle (vgl. Abschnitt 7.1.4).

Mit Hilfe der Modellierung der Diffusion konnten die räumlichen Unterschiede in der PV-Diffusion aufgedeckt werden. Die Gemeinden der ländlichen Räume der Raumkategorie 40 (RK 40) weisen das höchste Marktpotenzial auf, die städtischen Gemeinden (RK 10) das niedrigste. In den Gemeinden der RK 40 ist die Diffusion im Vergleich zu den übrigen Gemeinden am weitesten fortgeschritten, so dass sich die Diffusion bereits am Ende des Early Majority-Stadiums befindet und damit fast den Wendepunkt erreicht hat. Die Gemeinden der RK 10 sind erst am Ende des Early Adopter-Stadiums angelangt, d.h. es sind meist erst ca. 15 bis 20 % des Marktpotenzials ausgeschöpft (vgl. Abschnitt 8.2.1.1). Ein Vergleich der Innovationseffekte zwischen den einzelnen Raumkategorien zeigt, dass dieser im suburbanen Raum (RK 20) und im ländlichen Raum (RK 40) höher liegt als in der Stadt (RK 10) und den ländlichen Verdichtungsräumen (RK 30). Dies kann sowohl an unterschiedlichen siedlungsstrukturellen Voraussetzungen, als auch an der höheren Innovativität von Landwirten und Haushalten im suburbanen Raum liegen. Der Imitationseffekt steigt von den städtischen zu den ländlichen Gemeinden an. Ursache hierfür ist vermutlich ein stärkeres Kommunikationsverhalten und eine stärkere Beobachtung des Verhaltens der Nachbarn auf dem Land (vgl. Abschnitt 8.2.1.2).

Die Analyse der Diffusion in den HS-Gemeinden zeigt, dass ein Nachbarschaftseffekt der PV-Diffusion *zwischen* den Gemeinden existiert, da der Imitationseffekt in den HS-Gemeinden höher liegt als in den übrigen Gemeinden des ländlichen Raums. Trotz gleicher Siedlungsstruktur liegen also Unterschiede im Imitationseffekt vor. Aus diesem Grund kann davon ausgegangen werden, dass die Lage einer Gemeinde *innerhalb* eines PV-Clusters den Imitationseffekt erhöht, da nicht nur eine Vielzahl an Anlagen in der eigenen Gemeinde, sondern auch in den Nachbargemeinden wahrgenommen wird (vgl. Abschnitt 8.3.3). HS-Gemeinden heben sich zudem durch einen höheren Innovationseffekt von den übrigen Gemeinden des ländlichen Raums (RK 40) und den CS-Gemeinden ab. Ursache für die schnelle PV-Diffusion könnte demnach auch die höhere Innovativität dieser Gemeinden sein, ausgelöst durch eine höhere Anzahl an Landwirten und dem Vorhandensein von Change Agents, die den Diffusionsprozess häufig initiiert und beschleunigt haben (vgl. Abschnitt 8.3.2 und 8.3.3).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass in BW signifikante Unterschiede in der Anzahl an PV-Anlagen pro EW auf Gemeinde-Ebene bestehen und dass sich HS- und CS-Regionen der PV-Nutzung herausgebildet haben. Die Unterschiede in der räumlichen Diffusion von PV-Anlagen liegen zum einen in Unterschieden in der Siedlungsstruktur und dem Vorhandensein von Innovatoren und Change Agents, was sich im Diffusionsmodell durch den Innovationseffekt bemerkbar macht. Zum anderen zeigt das höhere Imitationsverhalten in HS-Gemeinden, dass Imitation nicht nur innerhalb einer Gemeinde stattfindet, sondern dass auch ein Nachbarschaftseffekt der PV-Diffusion *zwischen* Gemeinden existiert.

# 10 Diskussion

## 10.1 Datenqualität

Als Datengrundlage für die Analyse der PV-Diffusion in Kapitel 6, 7 und 8 dienten die EEG-Anlagenstammdaten aller PV-Anlagen bis 30 kWp von 1990 bis 2009. Da die PV-Anlagen erst seit dem EEG 2000 einheitlich erfasst werden, ist es möglich, dass der Datensatz bis 1999 unvollständig ist. Auf die Qualität der Analyse-Ergebnisse hat dies jedoch nur einen geringfügigen Einfluss, da die PV-Diffusion erst ab dem Jahr 2000 untersucht wurde.

Sozioökonomische Daten des Statistischen Landesamtes Baden-Württemberg (BW) wurden für die räumliche Regression in Kapitel 6, für die Auswahl der Gemeinden für die Haushaltsbefragung in Kapitel 7 und für die Bestimmung des Marktpotentials in Kapitel 8 verwendet. Die Qualität der Daten des Statistischen Landesamtes BW richtet sich nach den Qualitätsstandards der amtlichen Statistik des Bundes und der Länder (STATISTISCHE ÄMTER DES BUNDES UND DER LÄNDER 2006). Für die räumliche Regressionsanalyse wurden außerdem Daten der infas geodaten GmbH hinzugezogen, die nicht beim Statistischen Landesamt BW verfügbar waren. Die infas geodaten stammen von Hausbegehungen und wurden auf Gemeinde-Ebene aggregiert, so dass der Schätzfehler als gering betrachtet werden kann.

Schließlich wurden mit den Experteninterviews und der Haushaltsbefragung zusätzlich Daten für die Arbeit erhoben. Die Qualität dieser Daten wird im Zusammenhang mit der Methodik im folgenden Abschnitt 10.2 diskutiert.

## 10.2 Methodik

Die Arbeit gliedert sich in drei Analyse-Kapitel, deren Methodik nun der Reihenfolge nach diskutiert wird.

In *Kapitel 6* wurden die räumlichen Unterschiede der PV-Nutzung in den Gemeinden BWs anhand der PV-Daten von 2009 aufgezeigt und mit Hilfe von statistischen Daten auf Gemeindeebene die Ursachen für die räumlichen Unterschiede untersucht. Um zu beweisen, dass die räumlichen Unterschiede in der PV-Nutzung statistisch signifikant sind, wurde eine räumliche Autokorrelationsanalyse durchgeführt. Damit konnte gezeigt werden, in welchen Gemeinden über- und unterdurchschnittlich viele PV-Anlagen pro EW bestehen. Durch die Verortung der PV-Cluster war es anschließend möglich, HS- und CS-Regionen im Detail zu untersuchen (vgl. Kapitel 7 und 8).

Bei der Analyse der räumlichen Autokorrelation ist zu beachten, dass die W-Matrizen distanzbasiert berechnet wurden. Neben distanzbasierten Verfahren existieren auch Ansätze, die andere räumliche Zusammenhänge wie die Reisezeiten zwischen Regionen berücksichtigen (PATACCHINI 2008). Eine weitere Möglichkeit ist – aufbauend auf Konzepten der Verkehrsmodellierung (ORTÚZAR und WILLUMSEN

2010) – die Interaktion zwischen Gemeinden zu modellieren. So könnten die *W*-Matrizen auf Basis des Mobilitätsverhaltens berechnet werden, indem die Verkehrsströme zwischen Gemeinden (insbesondere Pendlerströme) berücksichtigt werden. Das räumliche Zusammenspiel der Diffusion von Technologien und Verkehrsströmen wurde bisher jedoch kaum erforscht und stellt eine nicht triviale Modell-Erweiterung dar.

Im zweiten Teil des Kapitels 6 wurde untersucht, welche Faktoren die räumliche Verteilung der PV-Anlagen beeinflussen. Die räumliche Regressionsanalyse bietet die Möglichkeit, neben sozioökonomischen Variablen und Variablen zur Gebäudestruktur auch die Distanz zwischen den Gemeinden und damit den Einfluss der Nachbarschaft zu berücksichtigen. Somit konnte gezeigt werden, dass nicht allein die räumliche Verteilung exogener Faktoren zur Clusterung von PV-Anlagen führt, sondern die Clusterbildung auch durch Nachbarschaftsbeziehungen hervorgerufen wird. Dies wird anhand des signifikanten Spatial Lag Parameters deutlich.

Bei der Interpretation der Ergebnisse ist auf den räumlichen Untersuchungsmaßstab zu achten. Aggregierte Daten stellen immer Summen- oder Durchschnittswerte dar, die womöglich die wahren Zusammenhänge auf Individualebene verdecken. Dieses Phänomen wird auch als „Modifiable Areal Unit Problem“ (MAUP) bezeichnet, d.h. das Aggregationsniveau sowie die Form der Datenaggregation bestimmen Art und Stärke des Zusammenhangs (OPENSHAW 1984). Die Regressionsanalyse lässt deshalb nur Aussagen über die Zusammenhänge auf Gemeindeebene zu. Es können jedoch keine Rückschlüsse auf die Individualebene gezogen werden. Ein ökologischer Fehlschluss („ecological fallacy“) liegt vor, wenn ein Phänomen auf aggregierter Ebene beobachtet wurde, und zur Erklärung eines Zusammenhangs zwischen Individuen verwendet wird (ROBINSON 1950). Die Beobachtung des Nachbarschaftseffekts auf Gemeindeebene ermöglicht also keine Aussage über die Interaktion einzelner Personen oder Haushalte. Die Analysen zeigen jedoch, dass die Gemeindeebene ein räumlicher Maßstab ist, auf dem bereits Ursachen für die räumlichen Unterschiede der PV-Nutzung aufgedeckt werden können.

In *Kapitel 7* wurde der Untersuchungsmaßstab von der Gemeindeebene auf die Individualebene gelegt, um detaillierte Informationen über die Wirkungszusammenhänge im PV-Diffusionsprozess zu erhalten. Die quantitativen Analysen des Kapitels 6 wurden somit durch die Erkenntnisse aus Experteninterviews und einer Haushaltsbefragung ergänzt. Aufgrund von Zeit- und Budgetrestriktionen wurden nur 16 Interviews durchgeführt, es konnte jedoch das gesamte Spektrum der Akteure abgedeckt werden. Aus den Experteninterviews wurden wesentliche Erkenntnisse über die Rolle der Change Agents und Innovatoren für den PV-Diffusionsprozess gewonnen. Zudem wurde die Bedeutung von Akteursnetzwerken und des Nachbarschaftseffekts zwischen einzelnen Privathaushalten und Landwirten für die PV-Diffusion herausgestellt. Die Ergebnisse der anschließenden Haushaltsbefragung zeigten, warum sich zwei Gemeinden (Creglingen und Dörzbach), die ähnlich gute Voraussetzungen für die Installation von PV-Anlagen aufweisen, trotzdem in der Anzahl an PV-Anlagen pro EW unterscheiden.

Wie bereits in Abschnitt 10.1 erwähnt, ist bei der Interpretation der Ergebnisse der Haushaltsbefragung zu berücksichtigen, dass die Rücklaufquote insgesamt nur 10% betrug. Die Ergebnisse sind aufgrund der unterschiedlichen Teilnahmequoten



der Bevölkerungsgruppen deshalb möglicherweise leicht verzerrt. Mit 246 zurückgesendeten Fragebögen war die Anzahl groß genug, um statistische Auswertungen durchzuführen. Aufgrund der höheren Rücklaufquote der PV-Eigentümer sind die Antworten dieser Gruppe für die Grundgesamtheit der PV-Eigentümer in den beiden Gemeinden aussagekräftiger als die der Nicht-Eigentümer. Die unterschiedliche Anzahl an Haushalten in den beiden Gemeinden bedingt zudem, dass in Dörzbach weniger Haushalte an der Befragung teilnahmen und somit die Fallzahlen bei einzelnen Antworten relativ klein waren.

Durch die Befragung konnten zwar räumliche Unterschiede aufgedeckt werden, der raum-zeitliche Effekt der Diffusion (Nachbarschaftseffekt) konnte jedoch nicht erfasst werden. Um die Ursache-Wirkungs-Beziehungen zu untersuchen, d.h. in wie weit bestehende Anlagen über die Sichtbarkeit oder die Kommunikation mit den PV-Eigentümern tatsächlich eine höhere Anzahl an PV-Anlagen im Umfeld verursachen, müsste eine Panel-Befragung durchgeführt werden. Dies war jedoch aus zeitlichen Gründen im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich. Abschließend kann festgehalten werden, dass sich durch die Haushaltsbefragung einige Ergebnisse der Regression (Einfluss von EZFH, Viehbetrieben und Familien) sowie der Interviews bestätigt haben, und darüber hinaus weitere Informationen über die Einflussfaktoren auf die Diffusion, wie die Bedeutung von Hauseigentum oder Umweltbewusstsein, gewonnen werden konnten.

In *Kapitel 8* wurde die Diffusion von PV-Anlagen aggregiert über die Raumkategorien und Cluster (RK- bzw. Cluster-Modelle) und für die einzelnen Gemeinden modelliert (Gemeinde-Modelle). Durch die Modellierung konnten die Ergebnisse des Kapitels 6 um eine zeitlich differenzierte Betrachtung ergänzt werden. Nachdem in Kapitel 6 allein der aktuelle Stand der PV-Nutzung in 2009 analysiert wurde, wurde in Kapitel 8 die zeitliche Dynamik der Diffusion untersucht. Gleichzeitig wurden die qualitativen Aussagen der Interviews über die PV-Diffusion (vgl. Abschnitt 7.1) um quantitative Ergebnisse erweitert. Es konnte gezeigt werden, welchen Einfluss Unterschiede in der Siedlungsstruktur auf die PV-Diffusion haben und damit wie sich die Gemeinden der RK im Innovations- und Imitationseffekt unterscheiden. Zudem ermöglichte die Modellierung der Diffusion den Nachbarschaftseffekt zwischen Gemeinden genauer zu untersuchen, indem Innovations- und Imitationseffekt zwischen Hot Spots (HS) den übrigen Gemeinden des ländlichen Raums (RK 40) gegenübergestellt wurden.

Wie bereits in Abschnitt 4.5 aufgelistet, liegen dem Bass-Modell einige vereinfachende Annahmen zugrunde, die auch für das PV-Diffusionsmodell gelten. Durch das Bass-Modell werden alle Einflussfaktoren auf die PV-Diffusion im Innovations- und Imitationseffekt zusammengefasst, so dass nicht differenziert werden kann, welche Faktoren die Innovation oder Imitation beeinflussen. Ziel der Modellierung ist jedoch, wesentliche Aspekte klarer hervortreten zu lassen, wobei die Realität bewusst vereinfacht wird. Um den Diffusionsverlauf in den einzelnen Gemeinden zu erklären, kommt es nicht darauf an, alle dahinter liegenden Einflussfaktoren in einem Modell zu berücksichtigen. Je weniger Parameter das Modell besitzt, desto weniger anfällig ist es für Manipulation. Räumliche Abhängigkeiten bei der Diffusion wurden aufgrund der Komplexität des Ansatzes (vgl. Abschnitt 8.3.1) nicht explizit in das

PV-Diffusionsmodell aufgenommen. Rückschlüsse über räumliche Zusammenhänge können jedoch über den Vergleich der einzelnen Gemeinde-Modelle gezogen werden.

In Abschnitt 8.1.3 wurde zur Bestimmung des Marktpotentials  $M$  (einem Inputparameter des Diffusionsmodells) bereits darauf hingewiesen, dass die Modellierung von  $M$  nicht möglich ist, wenn der Wendepunkt der Diffusion noch nicht erreicht ist. Das Marktpotential wurde daraufhin extern bestimmt. Es ist jedoch schwierig, eine eindeutige Sättigungsgrenze festzulegen, da die Preise von PV-Systemen in Zukunft vermutlich weiter fallen, was zu einer Erhöhung von  $M$  führt. Dem steht die Begrenzung des Zubaus durch das EEG gegenüber, das eine flexible Anpassung der Vergütungssätze vorsieht. Mit der EEG-Novelle 2012 wurde ein sog. „atmender Deckel“ eingeführt, der den maximalen Zubau pro Jahr begrenzt. Das PV-Marktpotential kann also je nach Marktpreisen und gesetzlichen Rahmenbedingungen höher oder niedriger ausfallen.

Abschließend kann festgehalten werden, dass durch die Kombination quantitativer und qualitativer Methoden die Fragestellungen beantwortet werden konnten. Wie die Ergebnisse der Arbeit zu bewerten sind, wird im folgenden Kapitel beschrieben.

## 10.3 Ergebnisse

In dieser Arbeit konnte erstens gezeigt werden, dass signifikante räumliche Unterschiede in der PV-Nutzung auf Gemeindeebene in BW bestehen. Zweitens wurden die Hot Spots (HS) und Cold Spots (CS) der PV-Anlagen bis 30 kWp verortet. Die PV-Nutzungsunterschiede wurden damit zum ersten Mal quantitativ auf Gemeindeebene in BW untersucht.

Des Weiteren wurde der Einfluss der Siedlungsstruktur (EZFH, EZFH-Neubauten, Viehbetriebe), des Sozialgefüges (Familien) und des räumlichen Nachbarschaftseffekts quantifiziert. DEWALD und TRUFFER (2012) stellten nur die Vermutung auf, dass die Siedlungsstruktur Einfluss auf die regionale Verteilung der PV-Anlagen hat. Durch die Regressionsanalyse in der vorliegenden Studie konnte der Zusammenhang quantitativ bestätigt werden: Je höher der Anteil an EZFH, EZFH-Neubauten und Viehbetrieben, desto höher ist die Anzahl an PV-Anlagen pro EW.

Zudem zeigte sich die Bedeutung der Innovatoren und Change Agents für die dynamische Entwicklung der PV-Diffusion in BW. Auch DEWALD und TRUFFER (2012) und MAUTZ et al. (2008) kommen zu dem Schluss, dass regionale Unterschiede in der PV-Nutzung auf die Unterschiede in der Verteilung von Solarinitiativen zurückzuführen sind. Solarinitiativen sind zwar ein guter Indikator für die Diffusion von PV-Anlagen, können die räumlichen Unterschiede jedoch nicht allein erklären. Durch die Experteninterviews stellte sich heraus, dass die Landwirte als Innovatoren sowie neben den Solarinitiativen auch weitere Change Agents wie aktive Bürgermeister, PV-Unternehmer, Elektroinstallateure und auf regionaler Ebene Energieagenturen und die Maschinenringe den PV-Diffusionsprozess entscheidend beeinflusst haben. Die Erkenntnisse von DEWALD und TRUFFER (2012) auf Ebene der Bundesländer werden

zudem erweitert durch eine räumlich differenziertere Untersuchung auf Gemeindeebene in BW.

Durch die Modellierung der PV-Diffusion auf Gemeindeebene konnte gezeigt werden, dass die Diffusion in den Raumkategorien unterschiedlich verläuft. Die Siedlungsstruktur wirkt sich also auf den Innovations- und Imitationseffekt aus. Der Imitationseffekt steigt von städtischen zu ländlichen Gemeinden an. Damit bestätigt sich die Annahme von MAUTZ et al. (2008), die argumentieren, dass der Diffusionsmechanismus im dörflichen Umfeld aufgrund stärkerer Sozialbeziehungen und häufigeren „face-to-face“-Kontakten besser funktioniert.

Ein Vergleich der Diffusionsmodelle der HS-Gemeinden mit den übrigen Gemeinden des ländlichen Raum (RK 40) erlaubt, Rückschlüsse auf die Bedeutung des Nachbarschaftseffekts für die PV-Diffusion zu ziehen. HS-Gemeinden weisen einen höheren Imitationseffekt auf, was darauf zurückzuführen ist, dass sie nicht nur von der Anzahl an PV-Anlagen in der eigenen Gemeinde beeinflusst werden, sondern auch durch die Beobachtung einer Vielzahl an Anlagen in den Nachbargemeinden. Damit bestätigen sich die Ergebnisse von BOLLINGER und GILLINGHAM (2010) sowie RODE und WEBER (2012), die bereits für Kalifornien bzw. Deutschland aufgezeigt haben, dass ein Nachbarschaftseffekt der PV-Diffusion existiert. Der Nachbarschaftseffekt kann jedoch nicht allein zur Erklärung der räumlichen Unterschiede in der PV-Diffusion herangezogen werden. Wesentlichen Einfluss auf die räumliche Verteilung von PV-Anlagen haben auch die Siedlungsstruktur und das Vorhandensein von Change Agents.

Trotz moderner Kommunikationsnetze und der zunehmenden Mobilität in der Bevölkerung spielen also die lokalen Voraussetzungen für die Diffusion von sichtbaren Technologien wie z.B. der PV weiterhin eine zentrale Rolle. Informationen können zwar auch über moderne Massenmedien gewonnen werden, für die Überzeugung von der Funktionsfähigkeit einer PV-Anlage sind jedoch die Wahrnehmung der Technologie und der persönliche Austausch innerhalb des lokalen Umfelds entscheidend.

## 11 Schlussbetrachtungen und Ausblick

Die PV ist durch den enormen Zuwachs an Anlagen in den letzten Jahren und die dafür aufgewendeten staatlichen Fördermittel häufig in der politischen Diskussion. Wesentliche Ursache für das schnelle Wachstum seit 2000 ist die gesetzlich garantierte Einspeisevergütung durch das EEG. Preisentwicklungen von PV-Systemen und Veränderungen der Einspeisevergütung durch das EEG – wie kürzlich mit der EEG-Novelle 2012 – haben auf PV-Investoren in ganz Deutschland den gleichen Einfluss. Diese Arbeit liefert einen wissenschaftlichen Beitrag zur Erörterung der Frage, wie es trotz gleicher Förderbedingungen zur Ausbildung räumlicher Unterschiede in der PV-Nutzung in BW kommen konnte.

Dort, wo die siedlungsstrukturellen Voraussetzungen durch eine hohe Anzahl an EZFH und landwirtschaftlichen Betrieben gegeben sind, hat die Anzahl an PV-Anlagen pro EW stark zugenommen. Zugleich waren aber auch – besonders in den Anfangsjahren – die Initiative und das Engagement von Innovatoren und Change Agents entscheidend dafür, dass sich in einigen Gemeinden die PV-Anlagen schneller verbreitet haben. Für die Diffusion in den Folgejahren spielte auch der Nachbarschaftseffekt eine zentrale Rolle: eine hohe Anzahl an PV-Anlagen auf den umliegenden Gebäuden und in den angrenzenden Gemeinden fördert die Kommunikation und die Wahrnehmung der Technologie und trägt somit dazu bei, dass weitere Haushalte von der Anschaffung einer PV-Anlage überzeugt werden.

Daraus kann abgeleitet werden, dass das lokale Umfeld, trotz zunehmender Bedeutung der modernen Kommunikationsmittel wie Mobiltelefon und Internet, weiterhin entscheidend ist für die Diffusion von sichtbaren Technologien. Um die weitere Diffusion von PV-Anlagen zu fördern, sind deshalb Marketingkonzepte sinnvoll, die den Nachbarschaftseffekt berücksichtigen. Informationsveranstaltungen von Energieagenturen oder PV-Installateuren, die gezielt in Stadtvierteln oder Ortsteilen abgehalten werden, in denen bisher nur wenige PV-Anlagen existieren, erscheinen hierbei als zielführend. Des Weiteren könnten PV-Eigentümer dazu motiviert werden, von den Erfahrungen der PV-Anlage zu berichten, sowohl vom Planungsprozess als auch vom Betrieb, dem Wartungsaufwand und der Rendite der Anlage. Die Einbeziehung von PV-Eigentümern und der umliegenden Haushalte ermöglicht, dass nützliche Informationen und Erfahrungen weitergegeben werden. Durch die räumliche Nähe kann auch in Zukunft ein schneller und unkomplizierter Austausch erfolgen. Die Ergebnisse dieser Arbeit bieten somit Ansatzpunkte für das Marketing von PV-Anlagen sowie für die Ausarbeitung räumlich differenzierter Absatzstrategien.

Gleichzeitig geben die Ergebnisse Hilfestellungen für die Prognose der räumlichen Diffusion von PV-Anlagen. So sind die Kenntnisse über die zukünftige räumliche Verteilung von PV-Anlagen zum einen entscheidend für Energieversorger, Netzbetreiber und Kommunen bei der Planung der nötigen Energieinfrastrukturen. Zum anderen können durch räumlich differenzierte Prognosen neue Absatzmärkte für PV-Unternehmer und PV-Installateure aufgezeigt werden.

Ansatzpunkte für die zukünftige Forschung bieten weiterführende Untersuchungen zum Nachbarschaftseffekt. Dieser wurde in der Arbeit auf Individual- und

Gemeindeebene untersucht, die Grenzlage zu Bayern oder anderen (Bundes-)Ländern wurde jedoch nicht berücksichtigt. Interessant wäre, in einem nächsten Schritt zu erforschen, inwieweit die PV-Diffusion in den grenznahen Gemeinden auch durch die PV-Entwicklung und Aktivitäten regionaler Initiativen in den angrenzenden (Bundes-)Ländern beeinflusst wird. Auch die Konkurrenz zu anderen EE-Technologien bietet interessante Forschungsfragen: Entscheiden sich Haushalte aufgrund der relativ hohen Kosten für EE-Anlagen meist nur für eine Technologie? Steht damit die Investition privater Haushalte in PV-Anlagen z.B. im Oberrheingraben in Konkurrenz zur oberflächennahen Geothermie oder im Schwarzwald aufgrund der hohen Verfügbarkeit und traditionellen Nutzung von Holz in Konkurrenz zu Pelletheizungen?

Eine spannende Fragestellung ist auch, inwiefern die Ergebnisse der PV-Diffusion auf andere EE-Technologien übertragbar sind. Der Nachbarschaftseffekt der Diffusion wird aufgrund der mangelnden Sichtbarkeit von bspw. Pelletheizungen oder Wärmepumpen vermutlich eine wesentlich geringere Rolle für die Diffusion dieser EE-Technologien spielen.

Schließlich könnte auch der in 8.3.1 aufgestellte Ansatz zur Modellierung des Nachbarschaftseffekts weiterverfolgt werden, wenn die PV-Diffusion in den nächsten Jahren den Wendepunkt erreicht hat und längere Zeitreihen von PV-Daten zur Verfügung stehen. Einen interessanten Ansatz bietet auch die agentenbasierte Modellierung, anhand derer Nachbarschaftsbeziehungen zwischen Haushalten modelliert und das Zusammenspiel verschiedener Akteure untersucht werden könnte. Eine weitere Möglichkeit stellt die System Dynamics Modellierung dar, mit Hilfe derer bereits die räumliche Diffusion von Elektroautos unter Berücksichtigung eines Nachbarschaftseffekts untersucht wurde (LINDER und WIRGES 2011).

Die Nutzung erneuerbarer Energien steckt weltweit gesehen noch im Early-Adopter Stadium. Die Modellierung der räumlichen Diffusion von PV-Anlagen stellt deshalb eine interessante Möglichkeit dar, die Einflussfaktoren auf die räumliche Verbreitung der Technologie zu verstehen und Szenarien für die zukünftige Entwicklung zu entwerfen.

# Zusammenfassung

Seit dem Jahr 2000 ist die Anzahl an installierten Photovoltaik-Anlagen in Deutschland – dank günstiger politischer Rahmenbedingungen – rasant von 76 MWp in 2000 auf 24.820 MWp in 2011 gestiegen. Trotz bundesweit einheitlicher finanzieller Förderbedingungen durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz existieren jedoch räumliche Unterschiede in der Anzahl an installierten Photovoltaik-Anlagen pro Einwohner, sowohl auf Ebene der Bundesländer, als auch zwischen einzelnen Gemeinden einer Region.

In der vorliegenden Arbeit wird die räumliche Diffusion von Photovoltaik-Anlagen in Baden-Württemberg untersucht. Ziel ist zum einen die Ursachen für die räumlichen Unterschiede in der Photovoltaik-Diffusion aufzudecken. Zum anderen ist das Ziel zu überprüfen, ob ein Nachbarschaftseffekt der Photovoltaik-Diffusion existiert. Dies wird mit Hilfe quantitativer und qualitativer Methoden untersucht.

Mit Hilfe der räumlichen Autokorrelationsanalyse wird gezeigt, dass sich die Anzahl an Photovoltaik-Anlagen pro Einwohner in den Gemeinden Baden-Württembergs signifikant unterscheidet. Es existieren Cluster von Gemeinden mit besonders hoher Photovoltaik-Nutzung (Hot Spots) und Cluster von Gemeinden mit besonders niedriger Photovoltaik-Nutzung (Cold Spots). Hot Spot-Gemeinden befinden sich zu 95% im ländlichen Raum und Cold Spot-Gemeinden zu 85% im Verdichtungsraum.

Die Ergebnisse der räumlichen Regressionsanalyse und der Fallstudie in der Region Heilbronn-Franken zeigen, dass die Unterschiede in der Dichte der Photovoltaik-Anlagen pro Einwohner erstens auf Unterschiede in der Siedlungsstruktur zurückzuführen sind (Anteil an Ein- und Zweifamilienhäusern, Anteil an Neubauten, Anzahl an Viehbetrieben pro Einwohner), zweitens auf Unterschiede im Sozialgefüge (Anteil an Familien) sowie drittens auf den Nachbarschaftseffekt der Diffusion.

Aus den Experteninterviews geht hervor, dass zudem weitere lokale Voraussetzungen gegeben sein müssen, damit es zu einer schnellen Photovoltaik-Diffusion kommt. Eine wichtige Rolle spielen die Landwirte, die häufig als Innovatoren auftraten, sowie sog. Change Agents, die den Diffusionsprozess anstoßen und bewusst fördern. Zu letzteren zählen auf lokaler Ebene aktive Bürgermeister, Solarvereine, Photovoltaik-Unternehmer oder Elektroinstallateure, auf regionaler Ebene Maschinenringe und Energieagenturen.

Die Modellierung und Analyse der Photovoltaik-Diffusion in den einzelnen Gemeinden von 2000 bis 2030 zeigt für das Jahr 2009, dass die Gemeinden einer Raumkategorie unterschiedliche Diffusionsprofile aufweisen. Je ländlicher eine Gemeinde ist, desto weiter ist tendenziell der Diffusionsprozess fortgeschritten: In Gemeinden des ländlichen Raums befindet sich die Photovoltaik-Diffusion meist bereits im Early Majority-Stadium, in Gemeinden des Verdichtungsraums ist die Photovoltaik-Diffusion dagegen überwiegend erst am Ende des Early Adopter-Stadiums angelangt. Der Innovationseffekt, der angibt, wie stark die Anzahl an Photovoltaik-Anlagen unabhängig von den bereits installierten Anlagen zunimmt, ist im suburbanen Raum und im ländlichen Raum am höchsten. Der Imitationseffekt, der angibt, wie stark die

Zunahme neu installierter Photovoltaik-Anlagen von bestehenden Anlagen in einer Gemeinde abhängt, steigt dagegen von der Stadt zum Land an.

Durch den Vergleich der Hot Spot-Gemeinden mit den übrigen Gemeinden des ländlichen Raums wird deutlich, dass die Imitation in den Hot Spot-Gemeinden höher liegt. Dies lässt darauf schließen, dass ein Nachbarschaftseffekt der Photovoltaik-Diffusion zwischen den Gemeinden existiert, da die Lage innerhalb eines Hot Spots zu einer erhöhten Wahrnehmung von Photovoltaik-Anlagen und einem häufigeren Austausch mit Photovoltaik-Besitzern führt und damit die Photovoltaik-Diffusion fördert.

Vor dem Hintergrund des Klimawandels und der knapper werdenden fossilen Ressourcen gilt in Deutschland das Ziel, die Nutzung erneuerbarer Energien und damit auch der Photovoltaik weiter voranzutreiben. Diese Arbeit zeigt, dass lokale Einflussfaktoren entscheidend für das Entstehen räumlicher Unterschiede in der Photovoltaik-Nutzung sind. Die Kenntnisse dieser Unterschiede, deren Ursachen sowie die Bedeutung des Nachbarschaftseffekts können eine Grundlage für gezielte Förderung oder Marketingmaßnahmen zur weiteren Diffusion von Photovoltaik-Anlagen bieten.

## Summary

Since 2000, the number of photovoltaic systems installed in Germany has significantly increased from 76 MWp to 24,820 MWp in 2011. This can be attributed to a favourable policy framework. Despite a nationally uniform financial incentive scheme supported by the Renewable Energies Act (EEG), spatial differences in the number of photovoltaic systems installed per capita can be observed between the federal states as well as among individual municipalities.

This study analyses the spatial diffusion of photovoltaic installations in the German federal state of Baden-Württemberg. The first aim of the study is to identify the reasons for spatial differences in diffusion. The second aim is to examine whether there is a neighbourhood effect in the spatial diffusion of photovoltaic installations. The study is based on quantitative and qualitative methods.

The analysis of spatial autocorrelation shows that the number of photovoltaic installations per capita differs significantly among the municipalities in Baden-Württemberg. The analysis reveals the presence of clusters of municipalities with above average photovoltaic development (Hot Spots) and below average photovoltaic development (Cold Spots). The results show that 95 % of the Hot Spot municipalities are located in rural areas while 85 % of the Cold Spot municipalities are found in urban agglomerations.

Both the results of the spatial regression analysis and the case study of the region Heilbronn-Franken, indicate that differences in the density of photovoltaic installations per capita arise for three main reasons: firstly, because of differences in the settlement structure (percentage of detached and semi-detached houses, percentage of new houses, percentage of livestock farms), secondly, because of differences in the social structure (percentage of families), and thirdly, because of the neighbourhood effect of diffusion.

Expert interviews identified that additional local conditions play an important role in promoting the diffusion of photovoltaic installations. Particularly farmers play a crucial role in the diffusion as they often act as innovators. The photovoltaic diffusion process is often triggered and promoted by change agents. On a local level, change agents are active mayors, solar initiatives, photovoltaic entrepreneurs or electricians. On a regional level, these are machinery rings or energy agencies.

The results of the model for the analysis (from 2000 to 2030) of the diffusion of photovoltaic installations in the municipalities show that in 2009 municipalities of different spatial categories display different diffusion profiles. The more rural a municipality is, the more advanced the diffusion process: municipalities in rural areas have mostly reached the point of inflection of the diffusion curve and adopters now belong to the Early Majority. Municipalities in urban areas still belong to the Early Adopters. The coefficient of innovation indicating the extent at which the number of photovoltaic installations increases independently from other installations, is highest in suburban and rural areas. The coefficient of imitation indicating the strength of



dependence in the development of new photovoltaic installations from existing ones, increases from urban to rural areas.

The comparison of Hot Spot municipalities with the remaining municipalities of the rural areas shows that the coefficient of imitation is higher in Hot Spot municipalities. Thus, one can conclude that there is a neighbourhood effect in the diffusion of photovoltaic installations among municipalities. The position within a Hot Spot advances the perception of photovoltaic installations and increases interaction and communication among photovoltaic owners promoting the diffusion of the technology.

In the context of climate change and the limited availability of fossil fuels, the use of renewable energies e.g. photovoltaic installations should be further encouraged in Germany. This study shows that local conditions significantly impact the development of spatial differences in the use of photovoltaic technology. Understanding the reasons for these spatial differences and the neighbourhood effect can help to define well-directed incentives and to develop marketing strategies to further promote the diffusion of photovoltaic installations.

# Literaturverzeichnis

- AEE (2012). „föederal erneuerbar. Bundesländer mit neuer Energie.“ Agentur für Erneuerbare Energien. URL: <http://www.foederal-erneuerbar.de/landesinfo/bundesland/D/kategorie/solar> (Abrufdatum 5.7.2012)
- ALDSTADT, J. (2010). Spatial Clustering. *Handbook of Applied Spatial Analysis: Software Tools, Methods and Applications*. M. M. Fischer and A. Getis. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag: 279-300.
- ALLAWAY, A. W., D. BERKOWITZ und G. D'SOUZA (2003). "Spatial diffusion of a new loyalty program through a retail market." *Journal of Retailing* 79(3): 137-151.
- AMMON, M. und H. UHLEMANN (2009). Endbericht zur Branchenanalyse „Photovoltaik in Baden-Württemberg“. Erstellt im Auftrag des Wirtschaftsministeriums Baden-Württemberg. Bonn, EuPD Research.
- AMPRION GMBH (2011). „EEG-Anlagendaten.“  
URL: <http://www.amprion.net/eeg-anlagenstammdaten-aktuell> (Abrufdatum 27.1.2011)
- ANSELIN, L. (1988). *Spatial Econometrics: Methods and Models*. Dordrecht, The Netherlands, Kluwer Academic Publisher.
- ANSELIN, L. (1992). SpaceStat tutorial, Regional Research Institute. West Virginia University, Morantown, WV.
- ANSELIN, L. (1995). Local Indicators of Spatial Association - LISA. Regional Research Institute, West Virginia University. Research Paper 9331.
- ANSELIN, L. (2002). "Under the hood. Issues in the specification and interpretation of spatial regression models." *Agricultural Economics* 27(3): 247-267.
- ANSELIN, L. (2005). Exploring Spatial Data with GeoDa: A workbook. Spatial Analysis Laboratory, Department of Geography, University of Illinois: 244.
- ANSELIN, L. und A. K. BERA (1998). Spatial dependence in linear regression models with an introduction to spatial econometrics. *Handbook of applied economic statistics*. A. Ullah and D. E. A. Giles. New York, Marcel Dekker: 625.
- ANSELIN, L., J. L. GALLO und H. JAYET (2008). Spatial Panel Econometrics. The Econometrics of Panel Data. L. Mátyás and P. Sevestre, Springer Berlin Heidelberg. 46: 625-660.
- AVINOAM, M. (1982). "A spatial-humanistic perspective of innovation diffusion processes." *Geoforum* 13(1): 57-68.
- BACKHAUS, K. (1999). *Industriegütermarketing*. 6. Auflage. München, Franz Vahlen.
- BACKHAUS, K., B. ERICHSON, W. PLINKE und R. WEIBER (2008). *Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung*. Berlin Heidelberg, Springer Verlag.
- BAILEY, N. T. J. (1957). *Mathematical Theory of Epidemics*. New York, Hafner Publishing Company.
- BAILEY, T. C. und A. C. GATRELL (1995). *Interactive spatial data analysis*. Essex, England, Longman Scientific & Medical.
- BAPTISTA, R. (2000). "Do innovations diffuse faster within geographical clusters?" *International Journal of Industrial Organization* 18: 515-535.
- BARRETO, L. und R. KEMP (2008). "Inclusion of technology diffusion in energy-systems models: some gaps and needs." *Journal of Cleaner Production* 16: 95-101.

- BASS, F. M. (1969). "A new product growth for model consumer durables." *Management Science* 15(5): 215-227.
- BASS, F. M. (2004). "Comments on "A New Product Growth for Model Consumer Durables": The Bass Model." *Management Science* 50(12): 1833-1840.
- BATES, D. M. (1992). Nonlinear models. *Statistical models in S. J. M. Chambers and T. J. Hastie*. Boca Raton, Florida, CRC Press LLC: 421-454.
- BATES, D. M. und D. G. WATTS (1988). *Nonlinear regression analysis and its application*. Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons.
- BATLEY, S. L., P. D. FLEMING und P. URWIN (2000). "Willingness to Pay for Renewable Energy: Implications for UK Green Tariff Offerings." *Indoor and Built Environment* 9(3-4): 157-170.
- BEISE, M. (2004). The international adoption of photovoltaic energy conversion. Is Japan a lead market, Research Institute for economics and business administration (RIEB), Kobe University.
- BEN MAALA, M. und P. L. KUNSCH (2008). "Simulation of micro-CHP diffusion by means of System Dynamics." *Energy Policy* 36: 2308-2319.
- BERGER, W. (2001). "Catalysts for the diffusion of photovoltaics - A review of selected programmes." *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 9(2): 145-160.
- BKG (2007). VG250 - Verwaltungsgrenzen 1 : 250.000. Frankfurt, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie.
- BMW (2012). Energiedaten: Zahlen und Fakten, nationale und internationale Entwicklung. Berlin, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Referat III C 3.
- BOLLINGER, B. und K. GILLINGHAM (2010). Environmental preferences and peer effects in the diffusion of solar photovoltaic panels. Stanford University.
- BOOTS, B. (2002). "Local measures of spatial association." *Ecoscience* 9(2): 168-176.
- BORTZ, J. und C. SCHUSTER (2010). *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler*. Berlin Heidelberg, Springer.
- BRAUN-THÜRMAN, H. (2005). *Innovation*. Bielefeld.
- BROCKHOFF, K. (1999). Kapitel 2: Grundbegriffe. *Forschung und Entwicklung. Planung und Kontrolle*. München, Oldenburg Verlag: 27-47.
- BROWN, L. A. (1979). „Innovation diffusion: a new perspective.“ *Studies in the diffusion of Innovation, Dis. Paper 60, The Ohio State University, Dept. of Geography*.
- BROWN, L. A. (1981). *Innovation Diffusion. A new perspective*. London, Methuen & Co. Ltd.
- BROWN, L. A. (2009). Diffusion. *International Encyclopedia of Human Geography*, Ohio State University.
- BSW-SOLAR (2009). Förderung von Solaranlagen in Deutschland. Bundesverband Solarwirtschaft e.V. Berlin.
- BSW-SOLAR (2012). Jobmotor Solarstrom. Beschäftigung durch Photovoltaik-Technologie in Deutschland 2011. Infographik, Bundesverband Solarwirtschaft e.V.
- BSW-SOLAR (2012a). Kosten und Förderung von Solarstrom seit 2008 halbiert. Infographik, Bundesverband Solarwirtschaft e.V.
- BSW-SOLAR (2012b). Statistische Zahlen der deutschen Solarstrombranche (Photovoltaik), Bundesverband Solarwirtschaft e.V.
- BUNDESNETZAGENTUR (2011). EEG-Statistikbericht 2009. Bonn.
- BUNDESREGIERUNG DEUTSCHLAND (2010). Nationaler Aktionsplan für erneuerbare Energie

gemäß der Richtlinie 2009/28/EG zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen.

- CAIRD, S. und R. ROY (2010). "Adoption and use of household microgeneration heat technologies." *Low Carbon Economy* 1(2): 61-70.
- CASE, A. (1992). "Neighborhood influence and technological change." *Regional Science and Urban Economics* 22(3): 491-508.
- CHAIKAEW, N., N. TRIPATHI und M. SOURIS (2009). "Exploring spatial patterns and hotspots of diarrhea in Chiang Mai, Thailand." *International Journal of Health Geographics* 8(1): 36.
- CHOU, Y. (1995). Spatial pattern and spatial autocorrelation. *Spatial Information Theory A Theoretical Basis for GIS*. A. Frank and W. Kuhn, Springer Berlin / Heidelberg. 988: 365-376.
- CLAUDY, M. C., C. MICHELSEN und A. O'DRISCOLL (2011). "The diffusion of microgeneration technologies – assessing the influence of perceived product characteristics on home owners' willingness to pay." *Energy Policy* 39(3): 1459-1469.
- CLIFF, A. D. und J. K. ORD (1973). *Spatial Autocorrelation*. London, Pion Limited.
- CLIFF, A. D. und J. K. ORD (1981). *Spatial Processes*. London, UK.
- COENEN, L., R. RAVEN und G. VERBONG (2010). "Local niche experimentation in energy transitions: A theoretical and empirical exploration of proximity advantages and disadvantages." *Technology in Society* 32(4): 295-302.
- COHEN-TANNOUJJI, C., B. DIU und F. LALOE (2008). Stationäre Störungstheorie. *Quantenmechanik. Band 2*. Berlin, Walter de Gruyter GmbH & Co. KG.
- COHEN, Y. S. (1972). "Diffusion of an innovation in an urban system. The spread of planned regional shopping centers in the United States 1949-1968." *Res. Paper 140. The University of Chicago, Dept. of Geography*.
- COOKE, P., M. GOMEZ URANGA und G. ETXEBARRIA (1997). "Regional innovation systems: Institutional and organisational dimensions." *Research Policy* 26(4-5): 475-491.
- CORSTEN, H., R. GÖSSINGERN und H. SCHNEIDER (2005). „Diffusion von Innovationen. Makro- und mikroökonomische Modelle.“ *Schriften zum Produktionsmanagement, Lehrstuhl für Produktionswirtschaft, Universität Kaiserslautern*.
- CRACOLICI, M., M. CUFFARO und P. NIJKAMP (2009). "A spatial analysis on Italian unemployment differences." *Statistical Methods & Applications* 18(2): 275-291.
- CRACOLICI, M. und T. UBERTI (2009). "Geographical distribution of crime in Italian provinces: a spatial econometric analysis." *Jahrbuch für Regionalwissenschaft* 29(1): 1-28.
- DALLA VALLE, A. und C. FURLAN (2011). "Forecasting accuracy of wind power technology diffusion models across countries." *International Journal of Forecasting* 27(2): 592-601.
- DAVELAAR, E. und P. NIJKAMP (1997). Spatial Dispersion of Technological Innovation: A Review. *Innovative Behaviour in Space and Time*. C. S. Bertuglia, S. Lombardo and P. Nijkamp. Berlin, Springer-Verlag: 17-40.
- DEWALD, U. (2007). „Innovationssystem Photovoltaik in Deutschland.“ *FVS. BSW-Solar Themen* 2007: 6.
- DEWALD, U. und B. TRUFFER (2012). "The local sources of market formation: explaining regional growth differentials in German photovoltaic markets." *European Planning Studies* 20(3): 397-420.

- DING, L., K. E. HAYNES und H. LI (2010). "Modeling the Spatial Diffusion of Mobile Telecommunications in China." *The Professional Geographer* 62(2): 248-263.
- DINICA, V. (2006). "Support systems for the diffusion of renewable energy technologies - an investor perspective." *Energy Policy* 34(4): 461-480.
- DOLOREUX, D. und S. PARTO (2005). "Regional innovation systems: Current discourse and unresolved issues." *Technology in Society* 27(2): 133-153.
- DURHAM, C. A., B. G. COLBY und M. LONGSTRETH (1988). "The Impact of State Tax Credits and Energy Prices on Adoption of Solar Energy Systems." *Land Economics* 64(4): 347-355.
- DWD (2010). „Globalstrahlungsdaten für Deutschland.“ Deutscher Wetterdienst. URL: [http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?\\_nfpb=true&\\_pageLabel=\\_dwdwww\\_klima\\_umwelt\\_klimadaten\\_deutschland&T169000347481244102247200gsbDocumentPath=Navigation%2FOeffentlichkeit%2FKlima\\_\\_Umwelt%2FKlimagutachten%2FSolarenergie%2FDownload\\_\\_node.html%3F\\_\\_nnn%3Dtrue](http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=_dwdwww_klima_umwelt_klimadaten_deutschland&T169000347481244102247200gsbDocumentPath=Navigation%2FOeffentlichkeit%2FKlima__Umwelt%2FKlimagutachten%2FSolarenergie%2FDownload__node.html%3F__nnn%3Dtrue) (Abrufdatum April 2010)
- DWD (2011). Globalstrahlung in der Bundesrepublik Deutschland. Mittlere Jahressummen, Zeitraum: 1981-2010, Deutscher Wetterdienst.
- EASINGWOOD, C., V. MAHAJAN und E. MULLER (1981). "A nonsymmetric responding logistic model for forecasting technological substitution." *Technological Forecasting & Social Change* 20: 199-213.
- EEG (2000). Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (EEG). Deutscher Bundestag: 6.
- EEG (2004). Gesetz zur Neuregelung des Rechts der Erneuerbaren Energien im Strombereich (EEG). Deutscher Bundestag: 13.
- EEG (2009). Gesetz zur Neuregelung des Rechts der Erneuerbaren Energien im Strombereich und zur Änderung damit zusammenhängender Vorschriften (EEG). Deutscher Bundestag: 27.
- EEG (2012). Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (EEG). Deutscher Bundestag: 81.
- EK, K. (2005). "Public and private attitudes towards "green" electricity: the case of Swedish wind power." *Energy Policy* 33(13): 1677-1689.
- ENBW TRANSPORTNETZE AG (2011). „EEG-Anlagendaten.“ URL: <http://www.enbw-transportnetze.de/eeg-and-kwk-g/eeg-anlagendaten/> (Abrufdatum 27.1.2011)
- ENERGY MAP (2011). „EEG-Anlagendaten.“ URL: <http://energymap.info/download.html> (Abrufdatum 27.1.2011)
- ESRI® ARCMAP TM 9.3.1 (2010). Copyright © 1999-2009 ESRI Inc. All Rights Reserved.
- EU-KOMMISSION (2012). „Eurostat. Systematik der Gebietseinheiten für die Statistik.“ URL: [http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/nuts\\_nomenclature/introduction](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/nuts_nomenclature/introduction)
- EUROOBSERV'ER (2012). «Photovoltaic Barometer.» *le journal du photovoltaïque* 7: 108-131.
- FABER, A., M. VALENTE und P. JANSSEN (2010). "Exploring domestic micro-cogeneration in the Netherlands: An agent-based demand model for technology diffusion." *Energy Policy* 38(6): 2763-2775.
- FAHL, U., M. FRONDEL und A. LÖSCHEL (2010). Die Entwicklung der Energiemärkte bis 2030. Energieprognose 2009. Untersuchung im Auftrag des Bundeswirtschaftsministeriums (BMWi). Berlin, IER, RWI, ZEW.

- FAIERS, A. und C. NEAME (2006). "Consumer attitudes towards domestic solar power systems." *Energy Policy* 34: 1797-1806.
- FANTAPIÉ ALTOBELLI, C. (1991). *Die Diffusion neuer Kommunikationstechniken in der Bundesrepublik Deutschland. Erklärung, Prognose und marketinspolitische Implikationen.* Heidelberg, Physika-Verlag.
- FELTEN, C. (2001). *Adoption und Diffusion von Innovationen. Ein mikroökonomisches Modell.* Wiesbaden, Gabler.
- FISCHER, C. (2004). Who uses innovative energy technologies, when, and why? The case of fuel cell MicroCHP, Forschungsstelle für Umweltpolitik, FU Berlin: 18.
- FLICK, U. (2009). *Qualitative Sozialforschung. Eine Einführung.* Reinbek bei Hamburg, Rowohlt Taschenbuch Verlag.
- FORTIN, M.-J. und M. DALE (2007). *Spatial Analysis. A Guide for Ecologists.* Cambridge, Cambridge University Press.
- FOTHERINGHAM, A. S., M. CHARLTON und C. BRUNSDON (1996). "The geography of parameter space: an investigation of spatial non-stationarity." *International Journal of Geographical Information Systems* 10(5): 605 - 627.
- FOURT, L. A. und J. W. WOODLOCK (1960). "Early prediction of market success for new grocery products." *Journal of Marketing* 25: 31-38.
- FRATESI, U. (2007). "The spatial diffusion of innovations and the evolution of regional disparities." *Investigaciones Regionales* 11: 131-160.
- FRENKEL, A. und D. SHEFER (1997). Technological Innovation and Diffusion Models: A Review. *Innovative Behaviour in Space and Time.* C. S. Bertuglia, S. Lombardo and P. Nijakamp. Berlin, Springer-Verlag: 41-63.
- GATIGNON, H. und T. S. ROBERTSON (1985). "A Propositional Inventory for New Diffusion Research." *The Journal of Consumer Research* 11(4): 849-867.
- GEARY, R. C. (1954). "The Contiguity Ratio and Statistical Mapping." *The Incorporated Statistician* 5(3): 115-146.
- GEROSKI, P. A. (2000). "Models of technology diffusion." *Research Policy* 29(4-5): 603-625.
- GETIS, A. (2007). "Reflections on spatial autocorrelation." *Regional Science and Urban Economics* 37(4): 491-496.
- GETIS, A. (2009). "Spatial Weights Matrices." *Geographical Analysis* 41(4): 404-410.
- GETIS, A. und J. K. ORD (1992). "The analysis of spatial association by use of distance statistics." *Geographical Analysis* 24: 189-206.
- GETIS, A. und J. K. ORD (1996). Local spatial statistics: an overview. *Spatial Analysis: Modelling in a GIS environment.* P. A. Longley and M. Batty. New York, John Wiley & Sons, Inc.: 261-278.
- GETIS, A. und J. K. ORD (2010). The Analysis of Spatial Association by Use of Distance Statistics. *Perspectives on Spatial Data Analysis.* L. Anselin and S. J. Rey. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag.
- GIERL, H. (1987). *Die Erklärung der Diffusion technischer Produkte.* Berlin, Duncker und Humblot.
- GÖBEL, F. (2009). *Soziale Netzwerke und Innovationen. Der Einfluss nachfrageseitiger Netzwerkstrukturen auf die Adoptionsentscheidung.* München, FGM-Verlag.
- GOMPERTZ, B. (1825). "On the nature of the function expressive of the law of human mortality, and on a new mode of determining the value of life contingencies." *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*: 513-583.

- GOODCHILD, M. F. (1986). *Spatial Autocorrelation*. Norwich, Geo Books.
- GOULD, P. (1975). *Spatial diffusion: the spread of ideas and innovations in geographic space*. New York, Learning resources in international studies.
- GREENHALGH, T., G. ROBERT, P. BATE, F. MACFARLANE und O. KYRIAKIDOU (2005). *Diffusion of Innovations in Health Service Organisations - A systematic literature review*. Oxford, Blackwell Publishing Ltd.
- GRIFFITH, D. A. (1987). *Spatial Autocorrelation. A primer*. New York, Department of Geography, State University of New York.
- GRIFFITH, D. A. (2009). *Spatial Autocorrelation*. University of Texas at Dallas, Richardson, TX, USA, Elsevier Inc.
- GUIDOLIN, M. und C. MORTARINO (2010). "Cross-country diffusion of photovoltaic systems: Modelling choices and forecasts for national adoption patterns." *Technological Forecasting and Social Change* 77(2): 279-296.
- HÄGERSTRAND, T. (1952). "The propagation of innovation waves." *Lund Studies in Geography Ser.B.(No. 4)*.
- HÄGERSTRAND, T. (1967). *Innovation diffusion as a spatial process*. Chicago, The University of Chicago Press.
- HAGGETT, P. (1991). *Geographie: Eine moderne Synthese*. Stuttgart, Ulmer.
- HAMAOKA, Y. (2009). Spatial diffusion of innovation. A spatial panel analysis of electronic toll collecting transponders in Japan. *Kyoto global COE discussion paper series, DP2009-017*.
- HANSON, C. E. und W. F. WIECZOREK (2002). "Alcohol mortality: a comparison of spatial clustering methods." *Social Science & Medicine* 55(5): 791-802.
- HAUSCHILDT, J. und S. SALOMO (2011). *Innovationsmanagement*. München, Vahlen Verlag.
- HAYNES, K. E., V. MAHAJAN und G. M. WHITE (1977). "Innovation diffusion: A deterministic model of space-time integration with physical analog." *Socio-Economic Planning Sciences* 11(1): 25-29.
- HELM, R. (2001). *Planung und Vermarktung von Innovationen. Die Präferenz der Konsumenten für verschiedene Innovationsumfänge unter Berücksichtigung des optimalen Simultaneitätsniveaus und marktbezogener Einflussfaktoren*. Stuttgart, Schäffer-Poeschel Verlag.
- HENSEL, M. und J. WIRSAM (2008). *Diffusion von Innovationen. Das Beispiel Voice over IP.*, Gabler.
- HESSE, H.-W. (1987). *Kommunikation und Diffusion von Produktinnovationen im Konsumgüterbereich*. Berlin, Duncker & Humblot.
- HETTNER, A. (1929). *Der Gang der Kultur über die Erde*. Berlin-Leipzig, Teubner.
- HOFFMANN, U. (2008). „Damals war’s. Ein Rückblick auf die Entwicklung der Photovoltaik in Deutschland.“ *Sonnenenergie* November-Dezember 2008: 38-39.
- HÜBNER, G. und G. FELSER (2001). *Für Solarenergie - Konsumenten- und Umweltpsychologie strategisch anwenden*. Heidelberg, Asanger Verlag.
- HÜSER, G. (2005). *Medienumbrüche im Kontext des technologischen Wandels*. Aachen, Shaker Verlag.
- INFAS (2010). Variablenbeschreibung mikrogeographische Daten (Hausebene, Straße, Straßenabschnitte, KBA-Zellen). München, Bonn, infas geodaten GmbH.
- JACOBSSON, S., B. A. ANDERSSON und L. BANGENS (2002) Transforming the energy system - the evolution of the German technological system for solar cells. *Electronic working paper series* 84, 41

- JACOBSSON, S. und A. JOHNSON (2000). "The diffusion of renewable energy technology: an analytical framework and key issues for research." *Energy Policy* 28: 625-640.
- JACOBSSON, S. und V. LAUBER (2006). "The politics and policy of energy system transformation - explaining the German diffusion of renewable energy technology." *Energy Policy* 34: 256-276.
- JACOBSSON, S., B. A. SANDÉN und L. BANGENS (2004). "Transforming the energy system - the evolution of the German technological system for solar cells." *Technology Analysis & Strategic Management* 16(1): 3-30.
- JAFFE, A. B. und R. N. STAVINS (1995). "Dynamic incentives of environmental regulations: the effects of alternative policy instruments on technology diffusion." *Journal of Environmental Economics and Management* 29: 43-63.
- JAGER, W. (2006). "Stimulating the diffusion of photovoltaic systems: A behavioural perspective." *Energy Policy* 34: 1935-1943.
- KAAS, K. P. (1973). *Diffusion und Marketing. Das Konsumentenverhalten bei der Einführung neuer Produkte*. Stuttgart, Carl Ernst Poeschel Verlag.
- KALTSCHMITT, M., W. STREICHER und A. WIESE (2006). *Photovoltaische Stromerzeugung. Erneuerbare Energien. Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag: 197-275.
- KEIRSTEAD, J. (2007). "Behavioural responses to photovoltaic systems in the UK domestic sector." *Energy Policy* 35(8): 4128-4141.
- KIM, J., E. ELLIOTT und D.-M. WANG (2003). "A spatial analysis of county-level outcomes in US Presidential elections: 1988-2000." *Electoral Studies* 22(4): 741-761.
- KLOPHAU, R. (1995). *Marktausbreitung neuer Konsumgüter. Verhaltenswissenschaftliche Grundlagen, Modellbildung und Simulation*. Wiesbaden, Gabler.
- KRISHNER-IYER, P. V. A. (1949). "The first and second moments of some probability distributions arising from points on a lattice, and their applications." *Biometrics* 36(1-2): 135-141.
- KROEBER, A. L. (1948). *Anthropology*. New York.
- KRUIJSEN, J. (1999). *Photovoltaic technology diffusion*, Technical University Delft: 210.
- KRUSCHE, H. und B. JOERGES (1982). *Alternative Energietechnologien für private Haushalte. Die Diffusion von Sonnenkollektoren. Verbraucherverhalten und Umweltbelastung. Materialien zu einer verbraucherorientierten Umweltpolitik*. B. Joerges. Frankfurt, Campus-Verlag.
- LABAY, D. G. und T. C. KINNEAR (1981). "Exploring the Consumer Decision Process in the Adoption of Solar Energy Systems." *Journal of Consumer Research* 8(3): 271-278.
- LAL, V. B., KARMESHU und S. PURI (1998). "Travelling Wave Solutions in Innovation Diffusion." *Socio-Economic Planning Sciences* 32(3): 233-238.
- LANDESVERBAND DER MASCHINENRINGE BW (2011). „Was ist ein Maschinenring?“. URL: [http://www.mr-bw.de/index.php?option=com\\_content&view=article&id=73&Itemid=91](http://www.mr-bw.de/index.php?option=com_content&view=article&id=73&Itemid=91) (Abrufdatum 22.12.2011)
- LEONARD-BARTON, D. (1981). *The diffusion of active residential solar energy equipment in California. Marketing solar energy innovations*. A. Shama. New York, Praeger.
- LESAGE, J. und K. R. PACE (2004). *Spatial and spatiotemporal econometrics*. Oxford, Elsevier.
- LESAGE, J. und K. R. PACE (2009). *Introduction to Spatial Econometrics*. Boca Raton, FL, Taylor and Francis Group, LLC.



- LEWANDOWSKI, R. (1974). *Prognose- und Informationssysteme und ihre Anwendungen (1.Bd)*. Berlin, Springer.
- LIEHR, M. (2005). *Die Adoption von Kritische-Masse-Systemen. Das Problem der individuellen Krischen Masse*. Wiesbaden, Deutscher Universitäts-Verlag.
- LINDER, S. und J. WIRGES (2011). Spatial diffusion of electric vehicles in the German metropolitan region of Stuttgart. *ERSA Congress 2011 - New Challenges for European Regions and Urban Areas in a Globalised World*. 30th August - 3rd September 2011, Barcelona, Spain.
- LUND, P. (2006). "Market penetration rates of new energy technologies." *Energy Policy* 34(17): 3317-3326.
- LÜTHJE, C. (2008). Adoption von Innovationen. *Handbuch Marktforschung*. A. Herrmann, C. Homburg and M. Klarmann. Wiesbaden, Gabler: 1041-1047.
- MADDALENA, L. und R. PADALINO (2008). The diffusion of photovoltaic systems in Italy, Department of Economics, Mathematics and Statistics, University of Foggia, Italy.
- MADLENER, R. (2006). „Diffusion innovativer Energietechnologien aus der Sicht der Ökonomie.“ *Die Volkswirtschaft. Das Magazin für Wirtschaftspolitik* 3: 30-35.
- MADLENER, R. (2007). „Innovation diffusion, public policy, and local initiative: The case of wood-fuelled district heating systems in Austria.“ *Energy Policy* 35: 1992-2008.
- MADLENER, R. und M. BACHHIESL (2007). "Socio-economic drivers of large urban biomass cogeneration: Sustainable energy supply for Austria's capital Vienna." *Energy Policy* 35: 1075-1087.
- MADLENER, R. und C. SCHMID (2003). "Adoption and diffusion of decentralised energy conversion technologies: the success of engine co-generation in Germany." *Energy and Environment* 14(3): 627-662.
- MADLENER, R. und C. SCHMID (2009). "Spatial diffusion of biogas technology in Switzerland: A GIS-based multi-agent simulation approach." *International Journal of Environment and Pollution* 39(1-2/2009): 28-43.
- MADLENER, R. und S. VÖGTLI (2008). "Diffusion of bioenergy in urban areas: A socio-economic analysis of the Swiss wood-fired cogeneration plant in Basel." *Biomass and Bioenergy* 32: 815-828.
- MAHAJAN, V., C. H. MASON und V. SRINIVASAN (1986). An evaluation of estimation procedures for new product diffusion models. *Innovation diffusion models of new product acceptance*. V. Mahajan and Y. Wind. Cambridge, Ballinger.
- MAHAJAN, V. und E. MULLER (1979). "Innovation diffusion and new product growth models in marketing." *Journal of Marketing* 43(4): 55-68.
- MAHAJAN, V., E. MULLER und F. M. BASS (1990). "New product diffusion models in marketing: a review and directions for research." *Journal of Marketing* 54: 1-26.
- MAHAJAN, V., E. MULLER und Y. WIND (2000). *New-product diffusion models*. Norwell, Massachusetts, Kluwer Academic Publishers.
- MAHAJAN, V. und R. A. PETERSON (1979). "Integrating time and space in technological substitution models." *Technological Forecasting and Social Change* 14(3): 231-241.
- MAHAJAN, V. und R. A. PETERSON (1985). *Models for innovation diffusion*. Newbury Park, Sage Publications.
- MAHAJAN, V. und Y. WIND (1986). Innovation diffusion models of new product acceptance: a reexamination. *Innovation diffusion models of new product acceptance*. V. Mahajan and Y. Wind. Cambridge, Ballinger Publishing Company: 3-26.

- MALCZEWSKI, J. (2010). "Exploring spatial autocorrelation of life expectancy in Poland with global and local statistics." *GeoJournal* 75(1): 79-92.
- MANSFIELD, E. (1961). "Technical change and the rate of imitation." *Econometrica* 29: 741-766.
- MAUTZ, R., A. BYZIO und W. ROSENBAUM (2008). Auf dem Weg zur Energiewende. Die Entwicklung der Stromproduktion aus erneuerbaren Energien in Deutschland. Göttingen, Soziologisches Forschungsinstitut Göttingen (SOFI): 179.
- MEADE, N. und T. ISLAM (2006). "Modelling and forecasting the diffusion of innovation - A 25-year review." *International Journal of Forecasting* 22: 519-545.
- MEIER KRUKER, V. und J. RAUH (2005). *Arbeitsmethoden in der Humangeographie*. Darmstadt, Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- MENANTEAU, P. (2000). "Learning from variety and competition between technological options for generation photovoltaic electricity." *Technological Forecasting & Social Change* 63: 63-80.
- MENANTEAU, P. und H. LEFEBVRE (2000). "Competing technologies and the diffusion of innovations: the emergence of energy-efficient lamps in the residential sector." *Research Policy* 29: 375-389.
- MESSNER, S. F. und L. ANSELIN (2004). Spatial analysis of homicide with areal data. *Spatially integrated social science*. M. F. Goodchild and D. G. Janelle. Oxford, University Press.
- MÉSZÁROS, J., N. SOLYMOSSI und F. SPEISER (2007). "Spatial distribution of political parties in Hungary 1990-2006." *Political Geography* 26(7): 804-823.
- MILLER, D. S. und J. STERMAN (2007). "New venture commercialization of clean energy technologies." *The 25th International Conference of the System Dynamics Society*, Boston, Massachusetts, USA.
- MITCHELL, A. (2005). *The ESRI Guide to GIS Analysis*. Redlands, California, ESRI Press.
- MORAN, P. A. P. (1948). "The Interpretation of Statistical Maps." *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)* 10(2): 243-251.
- MORRILL, R. L. (1968). "Waves of spatial diffusion." *Journal of Regional Science* 8(1): 1-18.
- MORRILL, R. L. (1970). "The Shape of Diffusion in Space and Time." *Economic Geography* 46: 259-268.
- MOSER, P., S. BENZ, C. HOPPENBROCK, L. KUCHARCZAK, C. ROSE und S. SCHÄFER (2009). Schriftliche Befragung von Erneuerbare-Energie-Regionen in Deutschland. Regionale Ziele, Aktivitäten und Einschätzungen in Bezug auf 100% Erneuerbare Energie in Regionen. *Arbeitsmaterialien 100EE Nr.1*. deENet. Kassel, Kompetenznetzwerk Dezentrale Energietechnologien (deNET), Universität Kassel.
- MVI BW (2012). „Landesentwicklungsplan Baden-Württemberg.“ Stuttgart, Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg.  
URL: <http://www.mvi.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/100661/> (Abrufdatum 16.7.2012)
- MVI BW (2012a). „Geoportal Raumordnung Baden-Württemberg.“ Stuttgart, Ministerium für Verkehr und Infrastruktur, Abteilung Infrastruktur - Planen und Bauen.  
URL: <http://www.geoportal-raumordnung-bw.de/metadaten/land-baden-w%C3%BCrttemberg-0800-raumkategorien-8111> (Abrufdatum 16.7.2012)
- NAKHAPAKORN, K. und S. JIRAKAJOHNKOOL (2006). "Temporal and Spatial Autocorrelation Statistics of Dengue Fever." *Dengue Bulletin* 30: 177-183.

- NEIJ, L. (1997). "Use of experience curves to analyse the prospects of renewable energy technology." *Energy Policy* 23(13): 1099-1107.
- NEMET, G. F. (2006). Behind the learning curve: quantifying the sources of cost reductions in photovoltaics, University of California, Berkely.
- NYBLOM, J., S. BORGATTI, J. ROSLAKKA und M. A. SALO (2003). "Statistical analysis of network data - an application to diffusion of innovation." *Social Networks* 25(2): 175-195.
- NYRUD, A. Q., A. ROOS und J. B. SANDE (2008). "Residential bioenergy heating: A study of consumer perceptions of improved woodstoves." *Energy Policy* 36(8): 3169-3176.
- OPENGEODA 0.9.8.14 (2009). GeoDa Center for Geospatial Analysis and Computation and Arizona Board of Regents. All Rights Reserved.
- OPENGEODA 1.0.1 (2011). GeoDa Center for Geospatial Analysis and Computation and Arizona Board of Regents. All Rights Reserved.
- OPENSHAW, S. (1984). The modifiable areal unit problem. *Concepts and techniques in modern geography* (Vol. 38). London, England, Geobooks.
- ORD, J. K. und A. GETIS (1995). "Local spatial autocorrelation statistics: distributional issues and an application." *Geographical Analysis* 27(4): 286-306.
- ORD, J. K. und A. GETIS (2001). "Testing for local spatial autocorrelation in the presence of global autocorrelation." *Journal of Regional Science* 41(3): 441-432.
- ORTÚZAR, J. D. D. und L. G. WILLUMSEN (2010). *Modelling Transport*. Chichester, United Kingdom, John Wiley & Sons.
- OSEI, F. und A. DUKER (2008). "Spatial and demographic patterns of Cholera in Ashanti region - Ghana." *International Journal of Health Geographics* 7(1): 44.
- OVERMARS, K. P., G. H. J. DE KONING und A. VELDKAMP (2003). "Spatial autocorrelation in multi-scale land use models." *Ecological Modelling* 164(2-3): 257-270.
- PATACCHINI, E. (2008). "Local analysis of economic disparities in Italy: a spatial statistics approach." *Statistical Methods & Applications* 17(1): 85-112.
- PEARL, R. (1925). *Studies in Human Biology*. Baltimore, Williams and Wilkins.
- PETERSON, R. A. und V. MAHAJAN (1978). Multi-product growth models. *Research in Marketing*. J. Sheth. Greenwich, JAI Press.
- PING, J. L., C. J. GREEN, R. E. ZARTMAN und K. F. BRONSON (2004). "Exploring spatial dependence of cotton yield using global and local autocorrelation statistics." *Field Crops Research* 89(2-3): 219-236.
- POPONI, D. (2003). "Analysis of diffusion paths for photovoltaic technology based on experience curves." *Solar Energy* 74: 331-340.
- POULIOU, T. und S. J. ELLIOTT (2009). "An exploratory spatial analysis of overweight and obesity in Canada." *Preventive Medicine* 48(4): 362-367.
- PUTSIS, W. P. und V. SRINIVASAN (2000). Estimation techniques for macro diffusion models. *New-product diffusion models*. V. Mahajan, E. Muller and Y. Wind. Norwell, Massachusetts, Kluwer Academic Publisher: 263-294.
- QUASCHNING, V. (2000). Systemtechnik einer klimaverträglichen Elektrizitätsversorgung in Deutschland für das 21. Jahrhundert. Düsseldorf.
- QUASCHNING, V. (2011). Photovoltaik. *Regenerative Energiesysteme. Technologie - Berechnung - Simulation*. München, Carl Hanser Verlag. 7. aktualisierte Auflage: 164-238.
- QUASCHNING, V. (2012). „Vergütung für Strom aus Photovoltaikanlagen nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG).“ URL: <http://www.volker-quaschning.de/datserv/EEG-PV/index.php> (Abrufdatum 5.7.2012)

- RAMIREZ-ROSADO, I. J., L. A. FERNANDEZ-JIMENEZ, C. MONTEIRO, E. GARCIA-GARRIDO und P. ZORZANO-SANTAMARIA (2011). "Spatial long-term forecasting of small power photovoltaic systems expansion." *Renewable Energy* 36(12): 3499-3506.
- RAO, K. U. und V. V. N. KISHORE (2010). "A review of technology diffusion models with special reference to renewable energy technologies." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14(3): 1070-1078.
- ROBINSON, W. S. (1950). "Ecological correlations and the behavior of individuals." *American Sociological Review* 15: 351-357.
- RODE, J. und A. WEBER (2012). Does localized imitation drive technology adoption? A case study on solar cells in Germany. TU Darmstadt, Graduate School of Urban Studies.
- ROGERS, E. M. (1962). *Diffusion of Innovations*. New York.
- ROGERS, E. M. (2003). *Diffusion of Innovations*. New York.
- ROLOFF, N., U. LEHR und W. KREWITT (2007). "Success determinants for technological innovations in the energy sector - the case of photovoltaics." *New methods for energy market modelling*, Karlsruhe.
- ROSENBERG, M. S., R. R. SOKAL, N. L. ODEN und D. DIGIOVANNI (1999). "Spatial autocorrelation of cancer in Western Europe." *European Journal of Epidemiology* 15(1): 15-22.
- ROTH, G. (1993). *Die Diffusion integrativer Software-Systeme. Marketingrelevante Besonderheiten von Software und deren empirische Beschreibung im Rahmen eines Segmentierungsansatzes auf Basis der innerbetrieblichen Diffusion*. Berlin, Duncker & Humblot GmbH.
- ROTHFIELD, E. (2010). Solar Photovoltaic Installation in California: Understanding the Likelihood of Adoption Given Incentives, Electricity Pricing and Consumer Characteristics. *Economic Department*. Durham, North Carolina, Duke University: 45.
- RUCKSTUHL, A. (2008). Einführung in die nichtlineare Regression. Zürich, IDP Institut für Datenanalyse und Prozessdesign, ZHAW.
- RYAN, B. und N. C. GROSS (1943). "The diffusion of hybrid seed corn in two Iowa communities." *Rural Sociology* 7: 15-24.
- SAUER, C. O. (1925). "The morphology of landscape." *University of California Publications in Geography* 2: 19-54.
- SAUTER, R. und J. WATSON (2007). "Strategies for the deployment of micro-generation: Implications for social acceptance." *Energy Policy* 35(5): 2770-2779.
- SCARPA, R. und K. WILLIS (2010). "Willingness-to-pay for renewable energy: Primary and discretionary choice of British households' for micro-generation technologies." *Energy Economics* 32(1): 129-136.
- SHELLY, C. (2010). "Testing residential solar thermal adoption." *Environment and Behavior* 42(2): 151-170.
- SCHLABBACH, J. (2008). *Netzgekoppelte Photovoltaikanlagen*. Frankfurt am Main, VDE Verlag GmbH, VDEW Energieverlag GmbH.
- SCHMALEN, H. (1992). *Kommunikationspolitik. Werbepolitik*. Stuttgart, Kohlhammer.
- SCHMALEN, H., F.-M. BINNINGER und H. PECHTL (1993). „Diffusionsmodelle als Entscheidungshilfe zur Planung absatzpolitischer Maßnahmen bei Neuprodukteinführungen.“ *Die Betriebswirtschaft (DBW)* 53(4): 513-527.
- SCHMITTLIN, D. C. und V. MAHAJAN (1982). „Maximum likelihood estimation for an innovation diffusion model of new product acceptance.“ *Marketing Science* 1(1): 57-78.

- SCHNELL, R., P. B. HILL und E. ESSER (2005). *Methoden der empirischen Sozialforschung*. München, Oldenburg Wissenschaftsverlag GmbH.
- SCHUMPETER, J. A. (1939). *Business Cycles. A Theoretical, Historical and Statistical Analysis of the Capitalist Process*. New York, McGraw-Hill Book Company, inc.
- SCHWARZ, N. und A. ERNST (2008). „Die Adoption von technischen Umweltinnovationen: Das Beispiel Trinkwasser.“ *Umweltpsychologie* 12(1): 28-48.
- SCHWARZ, N. und A. ERNST (2009). „Agent-based modeling of the diffusion of environmental innovations -- An empirical approach.“ *Technological Forecasting and Social Change* 76(4): 497-511.
- SEMAAN, S., M. STERNBERG, A. ZAIDI und S. O. ARAL (2007). „Social capital and rates of gonorrhoea and syphilis in the United States: Spatial regression analyses of state-level associations.“ *Social Science & Medicine* 64(11): 2324-2341.
- SHINOHARA, K. und H. OKUDA (2010). „Dynamic Innovation Diffusion Modelling.“ *Computational Economics* 35(1): 51-62.
- SIDIRAS, D. K. und E. G. KOUKIOS (2004). „Solar systems diffusion in local markets.“ *Energy Policy* 32(18): 2007-2018.
- SOLARSERVER (2012). „Solarstrom: Netzgekoppelte Photovoltaikanlagen.“ URL: <http://www.solarserver.de/wissen/basiswissen/netzgekoppelte-photovoltaikanlagen.html> (Abrufdatum 2.7.2012)
- SOPHA, B. M., C. A. KLÖCKNER und E. G. HERTWICH (2011). „Adopters and non-adopters of wood pellet heating in Norwegian households.“ *Biomass and Bioenergy* 35(1): 652-662.
- SPECHT, G., C. BECKMANN und J. AMELINGMEYER (2002). *F&E-Management. Kompetenz im Innovationsmanagement*. Stuttgart, Schäffer-Poeschel Verlag.
- SPEITH, C. (1999). *Investitionsgütermarketing bei Krische-Masse-Systemen. Das Beispiel der Telekommunikationssysteme*. Wiesbaden, Deutscher Universitäts-Verlag.
- SRINIVASAN, V. und C. H. MASON (1986). „Non-linear least squares estimation of new product diffusion models.“ *Marketing Science* 5(2): 169-175.
- STAISS, F. (2007). *Jahrbuch Erneuerbare Energien 2007*. Radebeul, Biebertein, VERLAG & AGENTUR.
- STALA BW (2010). *Sozioökonomische Daten auf Gemeindeebene. Gebietsstand 2009. Kostenpflichtige Datenanfrage*. Stuttgart, Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, Referat 61.
- STATISTISCHE ÄMTER DES BUNDES UND DER LÄNDER (2006). *Qualitätsstandards der amtlichen Statistik*. Wiesbaden, Statistisches Bundesamt.
- STATISTISCHE ÄMTER DES BUNDES UND DER LÄNDER (2011). *Statistik lokal. Daten für die Gemeinden, kreisfreien Städte und Kreise Deutschlands. Gebietsstand 31.12.2009. Ausgabe 2011*.
- STEIN, F. (2011). *Diffusion von Photovoltaik-Anlagen in Baden-Württemberg: Räumliche Unterschiede in der Nutzungsintensität von Photovoltaik-Dachanlagen - untersucht in der Region Heilbronn-Franken. Insitut für Geographie und Geologie, Universität Würzburg*.
- STONEMAN, P. (2002). *The economics of technological diffusion*. Oxford, Malden, Blackwell Publisher Ltd.
- STONEMAN, P. und P. DIEDEREN (1994). „Technology Diffusion and Public Policy.“ *The Economic Journal* 105: 918-930.

- SULTAN, F., J. U. FARLEY und D. R. LEHMANN (1990). "A Meta-Analysis of Applications of Diffusion Models." *Journal of Marketing Research* 27(1): 70-77.
- SVENSSON, S. (1942). "Bygd och yttcrvarld. Studier over forhllandet meUan nyheter och tradition." *Nordisk Museets handl.* 15.
- TAN, S.-Y. und R. HAINING (2009). An Urban Study of Crime and Health Using an Exploratory Spatial Data Analysis Approach. *Computational Science and Its Applications – ICCSA 2009*. O. Gervasi, D. Taniar, B. Murgante et al, Springer Berlin / Heidelberg. 5592: 269-284.
- TAPANINEN, A., M. SEPPÄNEN und S. MÄKINEN (2009). "Characteristics of innovation in adoption a renewable residential energy system." *Journal of Systems and Information Technology* 11(4): 347-366.
- THE R FOUNDATION FOR STATISTICAL COMPUTING (2011). RStudio, Version 0.95.258.
- TOBLER, W. R. (1970). "A computer movie simulating urban growth in the Detroit region." *Economic Geography* 46(2): 234-240.
- TSOUTSOS, T. D. und Y. A. STAMBOULIS (2005). "The sustainable diffusion of renewable energy technologies as an example of an innovation-focused policy." *Technovation* 25: 753-761.
- URBAN, D. und J. MAYERL (2011). *Regressionsanalyse: Theorie, Technik und Anwendung*. Wiesbaden, Verlag für Sozialwissenschaften.
- VAN DER ZWAAN, B. und A. RABL (2004). "The learning potential of photovoltaics: implications for energy policy." *Energy Policy* 32(13): 1545-1554.
- VERDOLINI, E. und M. GALEOTTI (2010). "At home and abroad: an empirical analysis of innovation and diffusion in energy-efficient technologies." *Fondazione Eni Enrico Mattei Working Papers*. Working Paper 387.
- VOLLMER, R., U. KUNERT, J. KLOAS und H. KUHFIELD (2004). *Mobilität in Deutschland, Ergebnisbericht*. Berlin, infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW).
- WANG, L. und R. C. READY (2005). Spatial econometric approaches to estimating hedonic property value models. *American Agricultural Economics Association Annual Meeting*. Providence, Rhode Island.
- WARD, M. D. und K. S. GLEDITSCH (2008). *Spatial Regression Models*. Thousand Oaks, California, Sage Publications, Inc.
- WEIBER, R. (1992). *Diffusion von Telekommunikation. Problem der Kritischen Masse*. Wiesbaden, Gabler.
- WiMi BW (2002). *Landesentwicklungsplan Baden-Württemberg (LEP)*. Stuttgart, Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg.
- WINDHORST, H.-W. (1979). „Die sozialgeographische Analyse raum-zeitlicher Diffusionsprozesse auf der Basis der Adopterkategorien von Innovationen.“ *Zeitschrift für Agrargeschichte und Agrarsoziologie* 27: 244-266.
- WINDHORST, H.-W. (1983). *Geographische Innovations- und Diffusionsforschung*. Darmstadt, Wiss. Buchges.
- WOERSDORFER, J. S. und W. KAUS (2011). "Will nonowners follow pioneer consumers in the adoption of solar thermal systems? Empirical evidence for northwestern Germany." *Ecological Economics* 70(12): 2282-2291.
- WULDER, M. A., J. C. WHITE, N. C. COOPS, T. NELSON und B. BOOTS (2007). "Using local

- spatial autocorrelation to compare outputs from a forest growth model." *Ecological Modelling* 209(2-4): 264-276.
- WÜSTENHAGEN, R. und M. BILHARZ (2006). "Green energy market development in Germany: effective public policy and emerging customer demand." *Energy Policy* 34(13): 1681-1696.
- XIAOFENG, H. und H. HE (2008). "Real Estate Price Impact Factors Analysis Based on Spatial Econometrics." *Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2008. WiCOM '08. 4th International Conference on*.
- YESHIWONDIM, A., S. GOPAL, A. HAILEMARIAM, D. DENGELA und H. PATEL (2009). "Spatial analysis of malaria incidence at the village level in areas with unstable transmission in Ethiopia." *International Journal of Health Geographics* 8(1): 5.
- ZAHNAN, S., S. D. BRODY, A. VEDLITZ, M. G. LACY und C. L. SCHELLY (2008). "Greening Local Energy: Explaining the Geographic Distribution of Household Solar Energy Use in the United States." *Journal of the American Planning Association* 74(4): 419-434.
- ZARNIKAU, J. (2003). "Consumer demand for 'green power' and energy efficiency." *Energy Policy* 31(15): 1661-1672.
- ZHANG, Y., J. SONG und S. HAMORI (2011). "Impact of subsidy policies on diffusion of photovoltaic power generation." *Energy Policy* 39(4): 1958-1964.

# Anhang 1: Deskriptive Statistik der PV-Daten

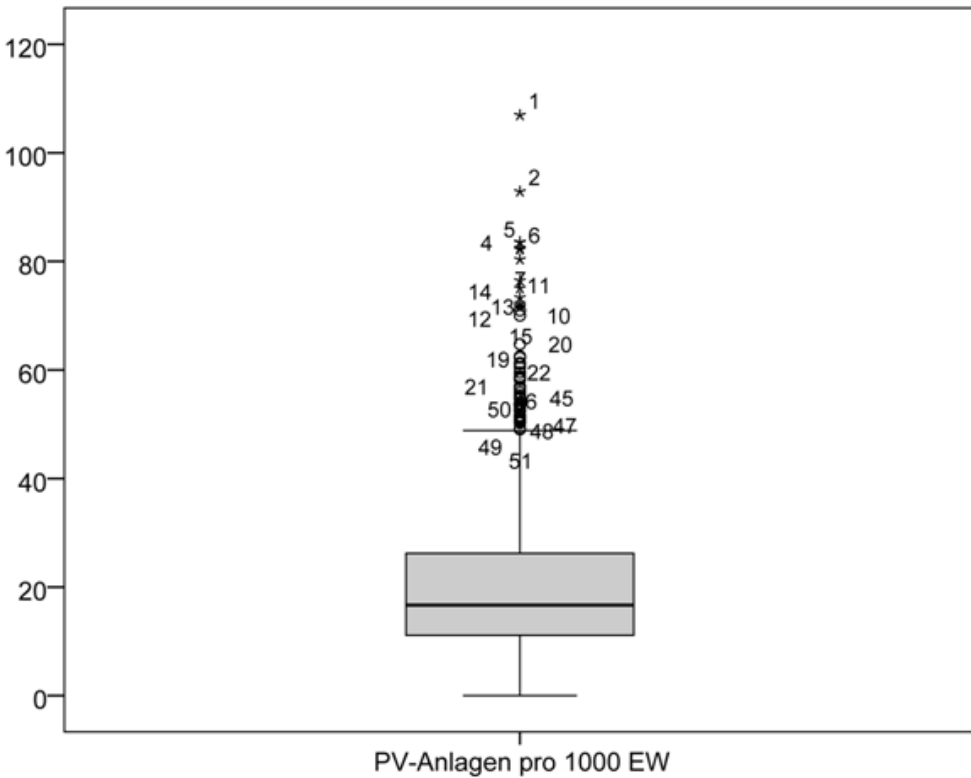
Tab. 9: Test auf Normalverteilung der PV-Anlagen/1000 EW

|                        | Kolmogorov-Smirnova |      |      | Shapiro-Wilk |      |      |
|------------------------|---------------------|------|------|--------------|------|------|
|                        | Statistic           | df   | Sig. | Statistic    | df   | Sig. |
| PV-Anlagen pro 1000 EW | ,138                | 1104 | ,000 | ,856         | 1104 | ,000 |

a. Lilliefors Significance Correction

Quelle: Eigene Berechnung

Abb. 41: Boxplot zur Analyse der Extremwerte der PV-Anlagen/1000 EW



Quelle: Eigene Berechnung



Tab. 10: Extremwerte der PV-Anlagen/1000 EW in den Gemeinden BWs

| Gemeinde       | AGS     | EW   | PV-Anlagen | Leistung (kW <sub>p</sub> ) | erste Inbetriebnahme | PV pro 1000 EW |
|----------------|---------|------|------------|-----------------------------|----------------------|----------------|
| Tiefenbach     | 8426118 | 505  | 54         | 756                         | 2002                 | 107            |
| Emeringen      | 8425035 | 140  | 13         | 259                         | 2002                 | 93             |
| Betzenweiler   | 8426020 | 730  | 61         | 825                         | 2002                 | 84             |
| Buchheim       | 8327008 | 647  | 54         | 692                         | 2004                 | 83             |
| Braunsbach     | 8127009 | 2390 | 197        | 2814                        | 2001                 | 82             |
| Wolpertshausen | 8127099 | 2020 | 166        | 2073                        | 1995                 | 82             |
| Königsheim     | 8327029 | 560  | 45         | 523                         | 2002                 | 80             |
| Ballendorf     | 8425013 | 654  | 50         | 677                         | 2002                 | 76             |
| Mehrstetten    | 8415048 | 1439 | 108        | 1286                        | 2000                 | 75             |
| Zwiefalten     | 8415085 | 2141 | 157        | 1606                        | 2001                 | 73             |
| Renquishausen  | 8327041 | 748  | 54         | 623                         | 2003                 | 72             |
| Riedhausen     | 8436067 | 641  | 46         | 598                         | 2001                 | 72             |
| Dürnau         | 8426036 | 461  | 33         | 395                         | 2000                 | 72             |

Quelle: EnBW Transportnetze AG, Amprion GmbH

Tab. 11: Korrelation zwischen PV/EW und RK

| Rangkorrelation nach Spearman |                         |        |        |
|-------------------------------|-------------------------|--------|--------|
|                               |                         | PV/EW  | RK     |
| PV/EW                         | Korrelationskoeffizient | 1,000  | ,608** |
|                               | Sig. (2-seitig)         |        | ,000   |
|                               | N                       | 1103   | 1103   |
| RK                            | Korrelationskoeffizient | ,608** | 1,000  |
|                               | Sig. (2-seitig)         | ,000   |        |
|                               | N                       | 1103   | 1103   |

\*\* . Die Korrelation ist auf dem 0,01 Niveau signifikant (zweiseitig).

Quelle: Eigene Berechnung

## Anhang 2: Analyse der räumlichen Autokorrelation

Tab. 12: HH-Cluster der LISA-Statistik mit Bonferroni-Korrektur

| Landkreis       | Gemeinde                 | AGS      | EW   | PV-<br>Anlagen | PV/EW   | ln (PV/EW) |
|-----------------|--------------------------|----------|------|----------------|---------|------------|
| Alb-Donau-Kreis | Emeringen                | 08425035 | 140  | 9              | 0,06429 | 4,16334    |
| Alb-Donau-Kreis | Ballendorf               | 08425013 | 654  | 36             | 0,05505 | 4,00817    |
| Alb-Donau-Kreis | Obermarchtal             | 08425090 | 1279 | 64             | 0,05004 | 3,91280    |
| Alb-Donau-Kreis | Breitingen               | 08425024 | 261  | 13             | 0,04981 | 3,90818    |
| Alb-Donau-Kreis | Holz Kirch               | 08425062 | 273  | 13             | 0,04762 | 3,86323    |
| Alb-Donau-Kreis | Börslingen               | 08425022 | 163  | 7              | 0,04294 | 3,75992    |
| Alb-Donau-Kreis | Unterwachingen           | 08425125 | 188  | 8              | 0,04255 | 3,75075    |
| Alb-Donau-Kreis | Emeringen                | 08425036 | 831  | 34             | 0,04091 | 3,71149    |
| Alb-Donau-Kreis | Neesstetten              | 08425083 | 806  | 31             | 0,03846 | 3,64966    |
| Alb-Donau-Kreis | Lauterach                | 08425073 | 601  | 21             | 0,03494 | 3,55368    |
| Alb-Donau-Kreis | Westerstetten            | 08425135 | 2178 | 76             | 0,03489 | 3,55233    |
| Alb-Donau-Kreis | Setzingen                | 08425112 | 631  | 21             | 0,03328 | 3,50497    |
| Alb-Donau-Kreis | Altheim (Alb)            | 08425005 | 1804 | 60             | 0,03326 | 3,50434    |
| Alb-Donau-Kreis | Oberstadion              | 08425091 | 1601 | 47             | 0,02936 | 3,37952    |
| Alb-Donau-Kreis | Öllingen                 | 08425092 | 513  | 15             | 0,02924 | 3,37553    |
| Alb-Donau-Kreis | Bernstadt                | 08425019 | 2020 | 48             | 0,02376 | 3,16810    |
| Biberach        | Tiefenbach               | 08426118 | 505  | 34             | 0,06733 | 4,20956    |
| Biberach        | Betzenweiler             | 08426020 | 730  | 41             | 0,05616 | 4,02828    |
| Biberach        | Steinhausen a. d. Rottum | 08426113 | 1946 | 98             | 0,05036 | 3,91919    |
| Biberach        | Moosburg                 | 08426078 | 187  | 9              | 0,04813 | 3,87387    |
| Biberach        | Alleshausen              | 08426005 | 512  | 22             | 0,04297 | 3,76047    |
| Biberach        | Erlenmoos                | 08426043 | 1670 | 69             | 0,04132 | 3,72128    |
| Biberach        | Attenweiler              | 08426011 | 1719 | 71             | 0,04130 | 3,72094    |
| Biberach        | Berkheim                 | 08426019 | 2652 | 106            | 0,03997 | 3,68813    |
| Biberach        | Kirchdorf an der Iller   | 08426066 | 3564 | 123            | 0,03451 | 3,54130    |
| Biberach        | Rot an der Rot           | 08426100 | 4413 | 147            | 0,03331 | 3,50588    |
| Biberach        | Uttenweiler              | 08426124 | 3638 | 118            | 0,03244 | 3,47925    |
| Biberach        | Unlingen                 | 08426121 | 2445 | 78             | 0,03190 | 3,46266    |
| Biberach        | Tannheim                 | 08426117 | 2384 | 73             | 0,03062 | 3,42168    |
| Biberach        | Dürmentingen             | 08426035 | 2556 | 67             | 0,02621 | 3,26625    |
| Ravensburg      | Riedhausen               | 08436067 | 641  | 35             | 0,05460 | 4,00007    |
| Ravensburg      | Unterswaldhausen         | 08436077 | 302  | 13             | 0,04305 | 3,76228    |
| Ravensburg      | Guggenhausen             | 08436040 | 197  | 8              | 0,04061 | 3,70399    |
| Ravensburg      | Wilhelmsdorf             | 08436083 | 4813 | 183            | 0,03802 | 3,63817    |
| Ravensburg      | Eichstegen               | 08436027 | 524  | 17             | 0,03244 | 3,47948    |
| Ravensburg      | Hof Kirch                | 08436047 | 720  | 20             | 0,02778 | 3,32424    |
| Reutlingen      | Zwiefalten               | 08415085 | 2141 | 135            | 0,06305 | 4,14400    |
| Reutlingen      | Pfronstetten             | 08415058 | 1550 | 75             | 0,04839 | 3,87923    |
| Reutlingen      | Hayingen                 | 08415034 | 2209 | 90             | 0,04074 | 3,70727    |
| Schwäbisch-Hall | Braunsbach               | 08127009 | 2390 | 149            | 0,06234 | 4,13265    |
| Schwäbisch-Hall | Wolpertshausen           | 08127099 | 2020 | 120            | 0,05941 | 4,08439    |
| Schwäbisch-Hall | Rot am See               | 08127071 | 5175 | 248            | 0,04792 | 3,86959    |
| Schwäbisch-Hall | Langenburg               | 08127047 | 1808 | 86             | 0,04757 | 3,86213    |
| Schwäbisch-Hall | Blaufelden               | 08127008 | 5360 | 223            | 0,04160 | 3,72821    |
| Schwäbisch-Hall | Untermünkheim            | 08127086 | 2997 | 106            | 0,03537 | 3,56583    |
| Schwäbisch-Hall | Ilshofen                 | 08127043 | 6071 | 212            | 0,03492 | 3,55306    |
| Schwäbisch-Hall | Gerabronn                | 08127032 | 4484 | 138            | 0,03078 | 3,42674    |

Tab. 13: LL-Cluster der LISA-Statistik mit Bonferroni-Korrektur

| Landkreis       | Gemeinde                | AGS      | EW     | PV-<br>Anlagen | PV/EW   | ln (PV/EW) |
|-----------------|-------------------------|----------|--------|----------------|---------|------------|
| Böblingen       | Grafenau                | 08115054 | 6579   | 41             | 0,00623 | 1,82969    |
| Böblingen       | Holzgerlingen           | 08115024 | 12252  | 73             | 0,00596 | 1,78477    |
| Böblingen       | Waldenbuch              | 08115048 | 8588   | 47             | 0,00547 | 1,69978    |
| Böblingen       | Renningen               | 08115041 | 17235  | 81             | 0,00470 | 1,54751    |
| Böblingen       | Schönaich               | 08115044 | 9876   | 44             | 0,00446 | 1,49408    |
| Böblingen       | Magstadt                | 08115029 | 8874   | 31             | 0,00349 | 1,25086    |
| Böblingen       | Böblingen               | 08115003 | 46269  | 160            | 0,00346 | 1,24070    |
| Böblingen       | Leonberg                | 08115028 | 45587  | 155            | 0,00340 | 1,22380    |
| Böblingen       | Steinenbronn            | 08115046 | 6034   | 20             | 0,00331 | 1,19832    |
| Böblingen       | Sindelfingen            | 08115045 | 60745  | 179            | 0,00295 | 1,08070    |
| Esslingen       | Köngen                  | 08116035 | 9633   | 70             | 0,00727 | 1,98330    |
| Esslingen       | Deizisau                | 08116014 | 6550   | 43             | 0,00656 | 1,88174    |
| Esslingen       | Baltmannsweiler         | 08116007 | 5528   | 33             | 0,00597 | 1,78668    |
| Esslingen       | Wendlingen am Neckar    | 08116071 | 15804  | 75             | 0,00475 | 1,55723    |
| Esslingen       | Filderstadt             | 08116077 | 43824  | 205            | 0,00468 | 1,54283    |
| Esslingen       | Denkendorf              | 08116015 | 10493  | 45             | 0,00429 | 1,45595    |
| Esslingen       | Reichenbach an der Fils | 08116058 | 7964   | 33             | 0,00414 | 1,42158    |
| Esslingen       | Plochingen              | 08116056 | 14325  | 58             | 0,00405 | 1,39844    |
| Esslingen       | Ostfildern              | 08116080 | 34687  | 140            | 0,00404 | 1,39528    |
| Esslingen       | Leinfelden-Echterdingen | 08116078 | 36808  | 148            | 0,00402 | 1,39150    |
| Esslingen       | Altbach                 | 08116004 | 5745   | 22             | 0,00383 | 1,34271    |
| Esslingen       | Wernau (Neckar)         | 08116072 | 12328  | 47             | 0,00381 | 1,33827    |
| Esslingen       | Neuhausen a. d. Fildern | 08116047 | 11450  | 40             | 0,00349 | 1,25089    |
| Esslingen       | Esslingen am Neckar     | 08116019 | 91758  | 236            | 0,00257 | 0,94468    |
| Heidelberg      | Heidelberg              | 08221000 | 144634 | 200            | 0,00138 | 0,32411    |
| Ludwigsburg     | Asperg                  | 8118003  | 12991  | 43             | 0,00331 | 1,19694    |
| Ludwigsburg     | Affalterbach            | 08118001 | 4619   | 36             | 0,00779 | 2,05334    |
| Ludwigsburg     | Erdmannshausen          | 8118014  | 4795   | 34             | 0,00709 | 1,95879    |
| Ludwigsburg     | Pleidelsheim            | 08118063 | 6239   | 40             | 0,00641 | 1,85806    |
| Ludwigsburg     | Tamm                    | 08118071 | 12160  | 72             | 0,00592 | 1,77851    |
| Ludwigsburg     | Marbach am Neckar       | 08118049 | 15627  | 92             | 0,00589 | 1,77279    |
| Ludwigsburg     | Markgröningen           | 08118050 | 14483  | 80             | 0,00552 | 1,70905    |
| Ludwigsburg     | Murr                    | 08118054 | 6153   | 32             | 0,00520 | 1,64880    |
| Ludwigsburg     | Freiberg am Neckar      | 08118078 | 15661  | 81             | 0,00517 | 1,64328    |
| Ludwigsburg     | Möglingen               | 08118051 | 10342  | 51             | 0,00493 | 1,59561    |
| Ludwigsburg     | Kornthal-Münchingen     | 8118080  | 18303  | 89             | 0,00486 | 1,58157    |
| Ludwigsburg     | Schwieberdingen         | 08118067 | 11010  | 53             | 0,00481 | 1,57149    |
| Ludwigsburg     | Ditzingen               | 08118011 | 24245  | 113            | 0,00466 | 1,53918    |
| Ludwigsburg     | Bietigheim-Bissingen    | 08118079 | 42259  | 184            | 0,00435 | 1,47112    |
| Ludwigsburg     | Remseck am Neckar       | 08118081 | 22598  | 85             | 0,00376 | 1,32479    |
| Ludwigsburg     | Gerlingen               | 08118019 | 18873  | 58             | 0,00307 | 1,12271    |
| Ludwigsburg     | Ludwigsburg             | 08118048 | 87280  | 177            | 0,00203 | 0,70703    |
| Ludwigsburg     | Kornwestheim            | 08118046 | 30823  | 42             | 0,00136 | 0,30941    |
| Mannheim        | Mannheim                | 08222000 | 307914 | 457            | 0,00148 | 0,39486    |
| Rems-Murr-Kreis | Allmersbach im Tal      | 08119003 | 4827   | 36             | 0,00746 | 2,00929    |
| Rems-Murr-Kreis | Backnang                | 08119008 | 35661  | 164            | 0,00460 | 1,52581    |
| Rems-Murr-Kreis | Schwaikheim             | 08119068 | 9381   | 48             | 0,00512 | 1,63251    |

|                    |                      |          |        |     |         |          |
|--------------------|----------------------|----------|--------|-----|---------|----------|
| Rems-Murr-Kreis    | Korb                 | 08119041 | 10399  | 51  | 0,00490 | 1,59012  |
| Rems-Murr-Kreis    | Kernen im Remstal    | 08119093 | 15293  | 74  | 0,00484 | 1,57667  |
| Rems-Murr-Kreis    | Leutenbach           | 08119042 | 10756  | 47  | 0,00437 | 1,47468  |
| Rems-Murr-Kreis    | Winnenden            | 08119085 | 27747  | 107 | 0,00386 | 1,34970  |
| Rems-Murr-Kreis    | Fellbach             | 8119020  | 44101  | 119 | 0,00270 | 0,99264  |
| Rems-Murr-Kreis    | Waiblingen           | 08119079 | 52932  | 1   | 0,00002 | -3,96901 |
| Rhein-Neckar-Kreis | Wilhelmsfeld         | 08226099 | 3304   | 24  | 0,00726 | 1,98292  |
| Rhein-Neckar-Kreis | Schriesheim          | 08226082 | 14647  | 104 | 0,00710 | 1,96016  |
| Rhein-Neckar-Kreis | Edingen-Neckarhausen | 08226105 | 14023  | 83  | 0,00592 | 1,77814  |
| Rhein-Neckar-Kreis | Hockenheim           | 08226032 | 20824  | 115 | 0,00552 | 1,70883  |
| Rhein-Neckar-Kreis | Plankstadt           | 08226063 | 9607   | 53  | 0,00552 | 1,70780  |
| Rhein-Neckar-Kreis | Wiesloch             | 08226098 | 25899  | 139 | 0,00537 | 1,68027  |
| Rhein-Neckar-Kreis | Nußloch              | 08226060 | 10768  | 54  | 0,00501 | 1,61241  |
| Rhein-Neckar-Kreis | Brühl                | 08226009 | 14363  | 69  | 0,00480 | 1,56945  |
| Rhein-Neckar-Kreis | Bammental            | 08226006 | 6521   | 28  | 0,00429 | 1,45718  |
| Rhein-Neckar-Kreis | Eppelheim            | 08226018 | 14436  | 59  | 0,00409 | 1,40781  |
| Rhein-Neckar-Kreis | Weinheim             | 08226096 | 43544  | 178 | 0,00409 | 1,40801  |
| Rhein-Neckar-Kreis | Schönau              | 08226080 | 4709   | 18  | 0,00382 | 1,34090  |
| Rhein-Neckar-Kreis | Heddesheim           | 08226028 | 11604  | 43  | 0,00371 | 1,30985  |
| Rhein-Neckar-Kreis | Ladenburg            | 08226038 | 11428  | 41  | 0,00359 | 1,27751  |
| Rhein-Neckar-Kreis | Oftersheim           | 08226062 | 10392  | 36  | 0,00346 | 1,24248  |
| Rhein-Neckar-Kreis | Neckargemünd         | 08226056 | 14112  | 43  | 0,00305 | 1,11417  |
| Rhein-Neckar-Kreis | Schwetzingen         | 08226084 | 22269  | 67  | 0,00301 | 1,10150  |
| Rhein-Neckar-Kreis | Sandhausen           | 08226076 | 14279  | 42  | 0,00294 | 1,07888  |
| Rhein-Neckar-Kreis | Ilvesheim            | 08226036 | 7639   | 22  | 0,00288 | 1,05778  |
| Rhein-Neckar-Kreis | Dossenheim           | 08226012 | 11850  | 34  | 0,00287 | 1,05403  |
| Rhein-Neckar-Kreis | Leimen               | 08226041 | 27090  | 57  | 0,00210 | 0,74389  |
| Stuttgart          | Stuttgart            | 08111000 | 593923 | 842 | 0,00142 | 0,34903  |

Quelle: EnBW Transportnetze AG, Amprion GmbH

# Anhang 3: Räumliche Regressionsanalyse

Tab. 14: Korrelationsmatrix der Variablen der Regressionsanalyse

|        |                         | PV/EW  | GLOST  | EZFH   | EZFH01 | VIEH   | FAM    |
|--------|-------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| PV/EW  | Korrelationskoeffizient | 1      | ,140** | ,691** | ,632** | ,681** | ,705** |
|        | Sig. (2-seitig)         |        | ,000   | ,000   | ,000   | ,000   | ,000   |
|        | N                       | 1103   | 1103   | 1103   | 1103   | 1103   | 1103   |
| GLOST  | Korrelationskoeffizient | ,140** | 1      | 0,042  | ,171** | ,251** | ,123** |
|        | Sig. (2-seitig)         | ,000   |        | ,164   | ,000   | ,000   | ,000   |
|        | N                       | 1103   | 1103   | 1103   | 1103   | 1103   | 1103   |
| EZFH   | Korrelationskoeffizient | ,691** | 0,042  | 1      | ,693** | ,500** | ,760** |
|        | Sig. (2-seitig)         | ,000   | ,164   |        | ,000   | ,000   | ,000   |
|        | N                       | 1103   | 1103   | 1103   | 1103   | 1103   | 1103   |
| EZFH01 | Korrelationskoeffizient | ,632** | ,171** | ,693** | 1      | ,539** | ,682** |
|        | Sig. (2-seitig)         | ,000   | ,000   | ,000   |        | ,000   | ,000   |
|        | N                       | 1103   | 1103   | 1103   | 1103   | 1103   | 1103   |
| VIEH   | Korrelationskoeffizient | ,681** | ,251** | ,500** | ,539** | 1      | ,689** |
|        | Sig. (2-seitig)         | ,000   | ,000   | ,000   | ,000   |        | ,000   |
|        | N                       | 1103   | 1103   | 1103   | 1103   | 1103   | 1103   |
| FAM    | Korrelationskoeffizient | ,705** | ,123** | ,760** | ,682** | ,689** | 1      |
|        | Sig. (2-seitig)         | ,000   | ,000   | ,000   | ,000   | ,000   |        |
|        | N                       | 1103   | 1103   | 1103   | 1103   | 1103   | 1103   |

\*\* Die Korrelation ist auf dem 0,01 Niveau signifikant (zweiseitig).

Quelle: Eigene Berechnung

Tab. 15: Ergebnisse der OLS-Schätzung (Modell 1 mit Globalstrahlung)

| Data set              | PV_GeoDa |                         |          |
|-----------------------|----------|-------------------------|----------|
| Dependent Variable:   | PV/EW    | Number of Observations: | 1103     |
| Mean dependent var:   | -4,09079 | Number of Variables:    | 6        |
| S.D. dependent var:   | 0,649159 | Degrees of Freedom:     | 1097     |
| R-squared:            | 0,627224 | F-statistic             | 369,157  |
| Adjusted R-squared    | 0,625525 | Prob(F-statistic)       | 0        |
| Sum squared residual: | 173,271  | Log likelihood          | -544,301 |
| Sigma-square          | 0,15795  | Akaike info criterion   | 1100,6   |
| S.E. of regression    | 0,397429 | Schwarz criterion       | 1130,64  |
| Sigma-square ML       | 0,157091 |                         |          |
| S.E of regression ML: | 0,396347 |                         |          |

| Variable | Coefficient | Std. Error | t-Statistic | Probability |
|----------|-------------|------------|-------------|-------------|
| CONSTANT | -7,80111    | 0,70791    | -11,01985   | 0,00000     |
| GLOST    | 0,00095     | 0,00057    | 1,66597     | 0,09600     |
| EZFH     | 3,49823     | 0,24673    | 14,17859    | 0,00000     |
| EZFH01   | 5,75298     | 1,21044    | 4,75279     | 0,00000     |
| VIEH     | 0,15291     | 0,01198    | 12,76718    | 0,00000     |
| FAM      | 2,50571     | 0,59748    | 4,19379     | 0,00003     |

#### REGRESSION DIAGNOSTICS

MULTICOLLINEARITY CONDITION NUMBER : 187,86903

TEST ON NORMALITY OF ERRORS

| TEST        | DF | VALUE     | PROB    |
|-------------|----|-----------|---------|
| Jarque-Bera | 2  | 793,53840 | 0,00000 |

#### DIAGNOSTICS FOR HETEROSKEDASTICITY

RANDOM COEFFICIENTS

| TEST                 | DF | VALUE     | PROB    |
|----------------------|----|-----------|---------|
| Breusch-Pagan test   | 5  | 146,79180 | 0,00000 |
| Koenker-Bassett test | 5  | 50,55785  | 0,00000 |

SPECIFICATION ROBUST TEST

| TEST  | DF | VALUE     | PROB    |
|-------|----|-----------|---------|
| White | 20 | 258,03690 | 0,00000 |

#### DIAGNOSTICS FOR SPATIAL DEPENDENCE

FOR WEIGHT MATRIX : PV\_GeoDa\_OLS.gwt  
(row-standardized weights)

| TEST                        | MI/DF    | VALUE     | PROB    |
|-----------------------------|----------|-----------|---------|
| Moran's I (error)           | 0,235763 | 19,62601  | 0,00000 |
| Lagrange Multiplier (lag)   | 1        | 217,66769 | 0,00000 |
| Robust LM (lag)             | 1        | 25,07470  | 0,00000 |
| Lagrange Multiplier (error) | 1        | 362,06020 | 0,00000 |
| Robust LM (error)           | 1        | 169,46721 | 0,00000 |
| Lagrange Multiplier (SARMA) | 2        | 387,13489 | 0,00000 |

Quelle: Eigene Berechnung

Tab. 16: Ergebnisse der OLS-Schätzung (Modell 1 ohne Globalstrahlung)

| Data set              |          | PV_GeoDa                |          |
|-----------------------|----------|-------------------------|----------|
| Dependent Variable:   | PV/EW    | Number of Observations: | 1103     |
| Mean dependent var:   | -4,09079 | Number of Variables:    | 5        |
| S.D. dependent var:   | 0,649159 | Degrees of Freedom:     | 1098     |
| R-squared:            | 0,626281 | F-statistic             | 460,008  |
| Adjusted R-squared    | 0,624919 | Prob(F-statistic)       | 0        |
| Sum squared residual: | 173,71   | Log likelihood          | -545,694 |
| Sigma-square          | 0,158205 | Akaike info criterion   | 1101,39  |
| S.E. of regression    | 0,397751 | Schwarz criterion       | 1126,42  |
| Sigma-square ML       | 0,157488 |                         |          |
| S.E of regression ML: | 0,396848 |                         |          |

| Variable | Coefficient | Std. Error | t-Statistic | Probability |
|----------|-------------|------------|-------------|-------------|
| CONSTANT | -6,67512    | 0,21071    | -31,67843   | 0,00000     |
| EZFH     | 3,43885     | 0,24434    | 14,07430    | 0,00000     |
| EZFH01   | 6,08166     | 1,19522    | 5,08831     | 0,00000     |
| VIEH     | 0,15669     | 0,01177    | 13,31291    | 0,00000     |
| FAM      | 2,50999     | 0,59796    | 4,19758     | 0,00003     |

| REGRESSION DIAGNOSTICS                        |  |    |           |         |
|---|--|----|-----------|---------|
| MULTICOLLINEARITY CONDITION NUMBER : 53,35547 |  |    |           |         |
| TEST ON NORMALITY OF ERRORS                   |  |    |           |         |
| TEST  |  | DF | VALUE     | PROB    |
| Jarque-Bera                                   |  | 2  | 811,40220 | 0,00000 |

| DIAGNOSTICS FOR HETEROSKEDASTICITY |  |    |           |         |
|------------------------------------|--|----|-----------|---------|
| RANDOM COEFFICIENTS                |  |    |           |         |
| TEST                               |  | DF | VALUE     | PROB    |
| Breusch-Pagan test                 |  | 4  | 143,62510 | 0,00000 |
| Koenker-Bassett test               |  | 4  | 49,08678  | 0,00000 |
| SPECIFICATION ROBUST TEST          |  |    |           |         |
| TEST                               |  | DF | VALUE     | PROB    |
| White                              |  | 14 | 206,74510 | 0,00000 |

| DIAGNOSTICS FOR SPATIAL DEPENDENCE                                 |  |         |           |         |
|--|--|---------|-----------|---------|
| FOR WEIGHT MATRIX : PV_GeoDa_OLS.gwt<br>(row-standardized weights) |  |         |           |         |
| TEST   |  | MI/DF   | VALUE     | PROB    |
| Moran's I (error)  |  | 0,23377 | 19,31870  | 0,00000 |
| Lagrange Multiplier (lag)  |  | 1       | 218,13059 | 0,00000 |
| Robust LM (lag)  |  | 1       | 27,32222  | 0,00000 |
| Lagrange Multiplier (error)  |  | 1       | 355,94903 | 0,00000 |
| Robust LM (error)  |  | 1       | 165,14066 | 0,00000 |
| Lagrange Multiplier (SARMA)  |  | 2       | 383,27125 | 0,00000 |

Quelle: Eigene Berechnung

Tab. 17: Ergebnisse der MLE-Schätzung (Modell 2)

| Data set              |          | PV_GeoDa                |          |
|-----------------------|----------|-------------------------|----------|
| Dependent Variable:   | PV/EW    | Number of Observations: | 1103     |
| Mean dependent var:   | -4,09079 | Number of Variables:    | 5        |
| S.D. dependent var:   | 0,649159 | Degrees of Freedom:     | 1098     |
| R-squared:            | 0,626281 | F-statistic             | 460,008  |
| Adjusted R-squared    | 0,624919 | Prob(F-statistic)       | 0        |
| Sum squared residual: | 173,71   | Log likelihood          | -545,694 |
| Sigma-square          | 0,158205 | Akaike info criterion   | 1101,39  |
| S.E. of regression    | 0,397751 | Schwarz criterion       | 1126,42  |
| Sigma-square ML       | 0,157488 |                         |          |
| S.E of regression ML: | 0,396848 |                         |          |

| Variable | Coefficient | Std. Error | t-Statistic | Probability |
|----------|-------------|------------|-------------|-------------|
| CONSTANT | -6,67512    | 0,21071    | -31,67843   | 0,00000     |
| EZFH     | 3,43885     | 0,24434    | 14,07430    | 0,00000     |
| EZFH01   | 6,08166     | 1,19522    | 5,08831     | 0,00000     |
| VIEH     | 0,15669     | 0,01177    | 13,31291    | 0,00000     |
| FAM      | 2,50999     | 0,59796    | 4,19758     | 0,00003     |

**REGRESSION DIAGNOSTICS**

MULTICOLLINEARITY CONDITION NUMBER : 53,35547

TEST ON NORMALITY OF ERRORS

| TEST        | DF | VALUE     | PROB    |
|-------------|----|-----------|---------|
| Jarque-Bera | 2  | 811,40220 | 0,00000 |

**DIAGNOSTICS FOR HETEROSKEDASTICITY**

RANDOM COEFFICIENTS

| TEST                 | DF | VALUE     | PROB    |
|----------------------|----|-----------|---------|
| Breusch-Pagan test   | 4  | 143,62510 | 0,00000 |
| Koenker-Bassett test | 4  | 49,08678  | 0,00000 |

SPECIFICATION ROBUST TEST

| TEST  | DF | VALUE     | PROB    |
|-------|----|-----------|---------|
| White | 14 | 206,74510 | 0,00000 |

**DIAGNOSTICS FOR SPATIAL DEPENDENCE**

FOR WEIGHT MATRIX : PV\_GeoDa\_OLS.gwt  
(row-standardized weights)

| TEST                        | MI/DF   | VALUE     | PROB    |
|-----------------------------|---------|-----------|---------|
| Moran's I (error)           | 0,23377 | 19,31870  | 0,00000 |
| Lagrange Multiplier (lag)   | 1       | 218,13059 | 0,00000 |
| Robust LM (lag)             | 1       | 27,32222  | 0,00000 |
| Lagrange Multiplier (error) | 1       | 355,94903 | 0,00000 |
| Robust LM (error)           | 1       | 165,14066 | 0,00000 |
| Lagrange Multiplier (SARMA) | 2       | 383,27125 | 0,00000 |



Tab. 18: KS-Test auf Normalverteilung der Residuen

|                     | Nullhypothese   | Test                                     | Signifikanz | Entscheidung           |
|---------------------|---|--|-------------|------------------------|
| Residuen (Modell 1) | Die Verteilung von OLS-Residual ist normal mit Mittelwert 0 und Standardabweichung 0,40 | Kolmogorov-Smirnov-Test einer Stichprobe | 0,001       | Nullhypothese ablehnen |
| Residuen (Modell 2) | Die Verteilung von Lag-Residual ist normal mit Mittelwert 0 und Standardabweichung 0,36 | Kolmogorov-Smirnov-Test einer Stichprobe | 0,022       | Nullhypothese ablehnen |

Signifikanzniveau von 0,05

Quelle: Eigene Berechnung

Tab. 19: Ergebnisse der MLE-Schätzung (Modell 3)

| Data set            | PV_GeoDa |                         |          |
|---------------------|----------|-------------------------|----------|
| Dependent Variable: | PV/EW    | Number of Observations: | 1103     |
| Mean dependent var: | -4,09079 | Number of Variables:    | 6        |
| S.D. dependent var: | 0,649159 | Degrees of Freedom:     | 1095     |
| Lag coeff. (Rho)    | 0,445263 |                         |          |
| R-squared:          | 0,686889 | Log likelihood          | -458,885 |
| Sigma-square        | 0,131947 | Akaike info criterion   | 933,77   |
| S.E. of regression  | 0,363246 | Schwarz criterion       | 973,816  |

| Variable | Coefficient | Std. Error | z-value   | Probability |
|----------|-------------|------------|-----------|-------------|
| W_PV/EW  | 0,44526     | 0,03120    | 14,27146  | 0,00000     |
| CONSTANT | -4,64278    | 0,25401    | -18,27831 | 0,00000     |
| EZFH     | 2,82738     | 0,23446    | 12,05934  | 0,00000     |
| EZFH01   | 3,87809     | 1,11308    | 3,48410   | 0,00049     |
| VIEH     | 0,10497     | 0,01150    | 9,12884   | 0,00000     |
| FAM      | 2,70166     | 0,57614    | 4,68923   | 0,00000     |
| EINK     | 0,00000     | 0,00000    | 0,20471   | 0,83780     |
| BILDG    | 0,78174     | 0,41562    | 1,88089   | 0,05999     |

**DIAGNOSTICS FOR HETEROSKEDASTICITY**

**RANDOM COEFFICIENTS**

| TEST               | DF | VALUE     | PROB    |
|--------------------|----|-----------|---------|
| Breusch-Pagan test | 6  | 149,08800 | 0,00000 |

**DIAGNOSTICS FOR SPATIAL DEPENDENCE**

**SPATIAL LAG DEPENDENCE FOR WEIGHT MATRIX : PV\_GeoDa\_OLS.gwt**

| TEST                  | DF | VALUE     | PROB    |
|-----------------------|----|-----------|---------|
| Likelihood Ratio Test | 1  | 167,74760 | 0,00000 |

Quelle: Eigene Berechnung

# Anhang 4: Haushaltsbefragung

Abb. 42: Fragebogen der Haushaltsbefragung

## 1. Wie ist Ihre persönliche Einstellung zu Photovoltaik-Anlagen auf Gebäuden?

- eher positiv     neutral     eher negativ

## 2. Betreiben/Besitzen Sie eine Photovoltaik-Anlage?

- Nein                       Ja, auf eigenem Gebäude                       Ja, auf angemietetem Dach

## 3. Auf welcher Art Gebäude steht / stehen die Photovoltaik-Anlage(n)?

*(Diese Frage nur für Eigentümer von PV-Anlagen)*

- Wohngebäude                       Landwirtschaftlich genutztes Gebäude  
 Gebäude der Stadt/Gemeinde                       Gewerblich genutztes Gebäude  
 Sonstiges,  
und zwar:...

## 4. Wer setzt sich in Ihrer Gemeinde für Photovoltaik oder erneuerbare Energie ein?

*(Beispiele für Tätigkeit: Elektriker, Verein, Bank, Photovoltaik-Besitzer, Politiker, eigene Angabe...)*

Tätigkeit: ..... Name: .....(Person / Organisation)

Tätigkeit: ..... Name: .....(Person / Organisation)

Tätigkeit: ..... Name: .....(Person / Organisation)

Tätigkeit: ..... Name: .....(Person / Organisation)

Tätigkeit: ..... Name: .....(Person / Organisation)

## 5. Wie viele Photovoltaik-Anlagen sind Ihnen in Ihrem näheren Umfeld (z.B. Nachbarschaft, Familie, Bekannte) bisher aufgefallen? *(Bitte überlegen Sie nur kurz und schätzen Sie die Anzahl)*

Anzahl:.....

## 6. Wie viele Personen kennen Sie persönlich, die selbst eine Photovoltaik-Anlage besitzen oder sich an einer Anlage beteiligt haben? *(Bitte überlegen Sie nur kurz und schätzen Sie die Anzahl)*

Anzahl:.....

## 7. Falls Sie KEINE Photovoltaik-Anlage haben, welchen Aussagen stimmen Sie zu?

*(Sie können mehrere Antworten auswählen)*

- |   |   |
|---|---|
| <input type="radio"/> Ich möchte keine Anlage.                        | <input type="radio"/> Ich würde mir evtl. eine Anlage anschaffen.           |
| <input type="radio"/> Ich wohne nur zur Miete.                        | <input type="radio"/> Ich werde mir eine Anlage anschaffen.                 |
| <input type="radio"/> Ich kann mir so etwas finanziell nicht leisten. | <input type="radio"/> Über eine Beteiligung an einer Anlage denke ich nach. |
- 
- Aus technischen Gründen kann auf meinem
- |   |                                  |
|---|----------------------------------|
| <input type="radio"/> Haus keine Anlage installiert werden (z.B. ungeeignete Dachfläche). | <input type="radio"/> Sonstiges: |
|---|----------------------------------|

## 8. Daten zu Ihrer/Ihren Photovoltaik-Anlage(n) *(Diese Frage nur für Besitzer von PV-Anlagen)*

- Anlage: Jahr der Inbetriebnahme:..... Nennleistung:..... (kWp)
- Anlage: Jahr der Inbetriebnahme:..... Nennleistung:..... (kWp)
- Anlage: Jahr der Inbetriebnahme:..... Nennleistung:..... (kWp)
- Anlage: Jahr der Inbetriebnahme:..... Nennleistung:..... (kWp)
- Anlage: Jahr der Inbetriebnahme:..... Nennleistung:..... (kWp)
- Nutzen Sie einen Teil des Stromes selbst?  Ja     Nein     Weiß nicht

**9. Wie sehr stimmen Sie den einzelnen Aussagen über Photovoltaik-Anlagen zu?**

(Stimmen Sie einer Aussage gar nicht zu, bitte ganz links markieren. Stimmen Sie ihr völlig zu, dann markieren Sie bitte ganz rechts. Sind Sie unentschieden, so wählen Sie bitte die Mitte. Tendieren Sie nur leicht in eine Richtung, so markieren Sie bitte die zwischenliegenden Kreise.)

|   | <div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> <span>Trifft gar nicht zu</span> <span>Trifft voll zu</span> </div> |                       |                       |                       |                       | Kann ich nicht beurteilen |
|---|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|
| Andere Maßnahmen zum Klimaschutz sind effizienter.  | <input type="radio"/>   | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/>     |
| Ich bevorzuge andere Formen der erneuerbaren Energien (z.B. Wind, Biomasse, Wasser...)    | <input type="radio"/>   | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/>     |
| Nicht der einzelne Bürger, sondern Industrie und Politik müssen beim Klimaschutz handeln. | <input type="radio"/>   | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/>     |
| Der bürokratische Aufwand ist sehr hoch.  | <input type="radio"/>   | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/>     |
| Die Investitionskosten sind sehr hoch.  | <input type="radio"/>   | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/>     |
| Es dauert zu lange, bis sich solche Anlagen finanziell lohnen.                            | <input type="radio"/>   | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/>     |
| Selbst bei 100% Kreditfinanzierung lohnt sich die Anlage nach einigen Jahren.             | <input type="radio"/>   | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/>     |
| Aus finanzieller Sicht bevorzuge ich andere Formen der Geldanlage.                        | <input type="radio"/>   | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/>     |
| Einen Kredit würde ich dafür aufnehmen.   | <input type="radio"/>   | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/>     |

**10. Wie haben Sie sich über das Thema Photovoltaik informiert?**

|   | gar nicht             | sehr wenig            | etwas                 | sehr viel             | weiß ich nicht mehr   |
|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Recherche im Internet                     | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Persönliche Gespräche                     | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Lesen von Zeitschriften/Zeitungen         | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Besuch von Info-Veranstaltungen/Vorträgen | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Berichte in Radio oder Fernsehen          | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

**11. Mit wem haben Sie bisher über das Thema Photovoltaik gesprochen und wie viel?**

|   | gar nicht             | sehr wenig            | etwas                 | sehr viel             | weiß ich nicht mehr   |
|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Besitzer von PV-Anlagen aus meinem Ort                              | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Besitzer von PV-Anlagen aus Nachbarorten <i>in meiner</i> Gemeinde  | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Besitzer von PV-Anlagen, die <i>nicht in meiner</i> Gemeinde wohnen | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Sonstige Personen   | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

**12. Wie sind Ihre Wohnverhältnisse?**

- Hauseigentümer
  Wohnungseigentümer
  Mieter

**13. Welcher Art ist das Gebäude, in dem Sie leben?**

- Einfamilienhaus
  Zweifamilienhaus
  Mehrfamilienhaus
  Bauernhaus

**14. Aus welchen Orten kamen Ihre fünf wichtigsten Gesprächspartner für das Thema Photovoltaik und welche Tätigkeiten üben diese aus? (Falls niemand, dann weiter mit der übernächsten Frage)**

(Beispiele für Tätigkeit: Elektriker, Verein, Bank, Photovoltaik-Besitzer, Politiker, eigene Angaben ...)

|  |                                |                       |
|--|--------------------------------|-----------------------|
| Wohnort der 1.Person:.....Tätigkeit: ..... | Person kommt aus<br>meinem Ort | <input type="radio"/> |
| Wohnort der 2.Person:.....Tätigkeit: ..... |                                | <input type="radio"/> |
| Wohnort der 3.Person:.....Tätigkeit: ..... |                                | <input type="radio"/> |
| Wohnort der 4.Person:.....Tätigkeit: ..... |                                | <input type="radio"/> |
| Wohnort der 5.Person:.....Tätigkeit: ..... |                                | <input type="radio"/> |

**15. Wer hat Ihre Photovoltaik-Anlage(n) installiert? (Diese Frage nur für Besitzer von PV-Anlagen)**

Welche Firma?.....  weiß ich nicht mehr

Aus welchem Ort?.....  weiß ich nicht mehr

Evtl. weitere Firmen? Welche?.....  weiß ich nicht mehr

**16. Weshalb haben Sie gerade diese Firma ausgewählt? (Diese Frage nur für Besitzer von PV-Anlagen)**

- Ich habe schon vorher gute Erfahrungen mit ihr gemacht (außerhalb von Photovoltaik).
- Empfehlung von Bekannten
- Räumliche Nähe
- Günstigster Gesamtpreis für die Anlage
- Höchste Qualität der Komponenten (Module, Wechselrichter,...)
- Sonstiges:.....

**17. Welche Maßnahmen im Bereich Energiesparen bzw. Erneuerbare Energien kommen für Sie in Frage?**

(Bitte markieren Sie (von links nach rechts), ob Sie die Maßnahme „bereits machen bzw. haben“, „künftig machen bzw. anschaffen werden“, sich „evtl. vorstellen“ könnten oder ob sie für Sie überhaupt“ nicht in Frage kommt“.)

|   | mache bzw.<br>habe<br>ich bereits | werde ich künftig<br>machen bzw.<br>anschaffen | könnte ich mir<br>evtl. vorstellen | kommt für<br>mich<br>nicht in Frage | kann ich<br>nicht<br>beurteilen |
|---|-----------------------------------|--|------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| Abschalten gerade nicht benötigter Geräte und Lichtquellen            | <input type="radio"/>             | <input type="radio"/>                          | <input type="radio"/>              | <input type="radio"/>               | <input type="radio"/>           |
| Ersatz von Glühlampen durch Energiesparlampen                         | <input type="radio"/>             | <input type="radio"/>                          | <input type="radio"/>              | <input type="radio"/>               | <input type="radio"/>           |
| Kauf energieeffizienter Geräte  | <input type="radio"/>             | <input type="radio"/>                          | <input type="radio"/>              | <input type="radio"/>               | <input type="radio"/>           |
| Einschränkung von Autofahrten   | <input type="radio"/>             | <input type="radio"/>                          | <input type="radio"/>              | <input type="radio"/>               | <input type="radio"/>           |
| Fahrten möglichst mit Fahrrad oder öffentlichem Verkehr (Busse, Bahn) | <input type="radio"/>             | <input type="radio"/>                          | <input type="radio"/>              | <input type="radio"/>               | <input type="radio"/>           |
| Eigene Heizung mit Holz   | <input type="radio"/>             | <input type="radio"/>                          | <input type="radio"/>              | <input type="radio"/>               | <input type="radio"/>           |
| Bezug von Ökostrom  | <input type="radio"/>             | <input type="radio"/>                          | <input type="radio"/>              | <input type="radio"/>               | <input type="radio"/>           |
| Eigene Wärmepumpe (Warmwasser oder Heizung)                           | <input type="radio"/>             | <input type="radio"/>                          | <input type="radio"/>              | <input type="radio"/>               | <input type="radio"/>           |
| Eigene Solaranlage (Warmwasser oder Heizung)                          | <input type="radio"/>             | <input type="radio"/>                          | <input type="radio"/>              | <input type="radio"/>               | <input type="radio"/>           |
| Gebäudedämmung (Fenster, Türen, Fassade)                              | <input type="radio"/>             | <input type="radio"/>                          | <input type="radio"/>              | <input type="radio"/>               | <input type="radio"/>           |
| Geldanlagen in erneuerbare Energien (z.B. Anteile an Anlagen, Fonds)  | <input type="radio"/>             | <input type="radio"/>                          | <input type="radio"/>              | <input type="radio"/>               | <input type="radio"/>           |

**18. Vergleichen Sie bitte Ihre Bemühungen im Bereich Umweltschutz und Energie mit denen anderer Personen in Ihrem Umfeld. Wie sehr stimmen Sie folgender Aussage zu?**

|  |                        |                       |                       |                       |                       |  |                       |  |
|--|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--|-----------------------|--|
|  | Trifft gar<br>nicht zu |                       |                       |                       |                       |  | Trifft<br>völlig zu   |  |
|  | 1                      | 2                     | 3                     | 4                     | 5                     |  | Weiß ich<br>nicht     |  |
| Im Rahmen meiner Möglichkeiten tue ich bereits genug für die Umwelt. | <input type="radio"/>  | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |  | <input type="radio"/> |  |

**19. Wie alt ist der Haushaltsvorstand?** *(Also die Person, die den größten Teil zum Haushaltseinkommen beiträgt)*

Alter:.....

**20. Welcher ist der höchste Bildungsabschluss in Ihrem Haushalt?**

- |  |   |
|--|---|
| <input type="radio"/> Kein Schulabschluss                          | <input type="radio"/> Fachabitur, Fachhochschulreife    |
| <input type="radio"/> Volks-, Hauptschulabschluss, Quali           | <input type="radio"/> Abitur, Hochschulreife            |
| <input type="radio"/> Mittlere Reife oder gleichwertiger Abschluss | <input type="radio"/> Fachhochschul-/Hochschulabschluss |
| <input type="radio"/> Abgeschlossene Lehre                         |   |

**21. Wie hoch ist Ihr monatliches Haushalts-Nettoeinkommen? (PV-Besitzer bitte das Einkommen zum Zeitpunkt der Anschaffung der Anlage angeben)** *(Gemeint ist der Betrag, der sich aus allen Einkünften des Haushalts zusammensetzt und nach Abzug der Steuern und Sozialversicherungen übrig bleibt.)*

- |   |   |   |
|---|---|---|
| <input type="radio"/> Unter 1000 €      | <input type="radio"/> 2000 € bis 3000 € | <input type="radio"/> 5000 € und mehr                 |
| <input type="radio"/> 1000 € bis 1500 € | <input type="radio"/> 3000 € bis 4000 € | <input type="radio"/> Ich will darauf nicht antworten |
| <input type="radio"/> 1500 € bis 2000 € | <input type="radio"/> 4000 € bis 5000 € |   |

**22. Wie sind die Familienverhältnisse in Ihrem Haushalt? (PV-Besitzer bitte zu dem Zeitpunkt als die erste Anlage gekauft wurde)**

- |   |   |
|---|---|
| <input type="radio"/> Partnerschaft mit Kind(ern) | <input type="radio"/> Alleinstehend mit Kind(ern) |
| <input type="radio"/> Partnerschaft ohne Kinder   | <input type="radio"/> Alleinstehend ohne Kinder   |

**23. Ist Ihnen noch etwas zum Thema Photovoltaik eingefallen, das noch nicht erwähnt wurde?** *(Hier können Sie noch letzte Anmerkungen machen)*

*Vielen Dank!*

- Ich möchte an der **Verlosung** teilnehmen. Meine Email-Adresse wird getrennt von meinen Antworten gespeichert. Meine Angaben bleiben also völlig anonym.
- Ich interessiere mich für die **Ergebnisse dieser Studie** und hätte gerne eine Zusammenfassung per E-Mail.

Email-Adresse:.....@.....

Quelle: Eigene Erhebung

Tab. 20: Signifikanzwerte des U-Tests nach Mann-Whitney differenziert nach PV-Eigentum und den Gemeinden

| Frage  | Nr.   | PV vs. Nicht-PV | CR vs. DÖ |
|--|-------|-----------------|-----------|
| Einstellung zu PV                            | 1     | 0,000           | 0,356     |
| Anzahl PV Umgebung                           | 5     | 0,000           | 0,000     |
| Anzahl PV Bekannte                           | 6     | 0,000           | 0,000     |
| andere Klimaschutzmaßnahmen sind effizienter | 9.1   | 0,181           | 0,264     |
| bevorzuge andere EE                          | 9.2   | 0,000           | 0,049     |
| Industrie und Politik müssen handeln         | 9.3   | 0,635           | 0,212     |
| bürokratischer Aufwand ist sehr hoch         | 9.4   | 0,008           | 0,478     |
| Investitionskosten sind sehr hoch            | 9.5   | 0,735           | 0,129     |
| dauert zu lange, bis sich Anlage lohnt       | 9.6   | 0,529           | 0,810     |
| Anlagen lohnen sich mit Kredit nicht         | 9.7   | 0,000           | 0,252     |
| bevorzuge andere Geldanlage                  | 9.8   | 0,001           | 0,525     |
| würde keinen Kredit aufnehmen                | 9.9   | 0,000           | 0,712     |
| Internetrecherche                            | 10.1  | 0,000           | 0,677     |
| TV-/Radioberichte                            | 10.2  | 0,351           | 0,670     |
| Zeitschriften/Zeitungen                      | 10.3  | 0,010           | 0,944     |
| Info-Veranstaltungen                         | 10.4  | 0,000           | 0,287     |
| Persönliche Gespräche                        | 10.5  | 0,000           | 0,447     |
| Gesprächspartner: gleicher Ort               | 11.1  | 0,000           | 0,056     |
| Gesprächspartner: gleiche Gemeinde           | 11.2  | 0,001           | 0,227     |
| Gesprächspartner: ausserhalb der Gemeinde    | 11.3  | 0,001           | 0,756     |
| Gesprächspartner: sonstige Personen          | 11.4  | 0,010           | 0,156     |
| Geräte und Licht abschalten                  | 17.1  | 0,891           | 0,145     |
| Energiesparlampen                            | 17.2  | 0,067           | 0,016     |
| Kauf energieeffizienter Geräte               | 17.3  | 0,152           | 0,180     |
| Einschränkung Autofahrten                    | 17.4  | 0,400           | 0,338     |
| möglichst Fahrrad und ÖPNV                   | 17.5  | 0,267           | 0,007     |
| Holzheizung                                  | 17.6  | 0,000           | 0,770     |
| Ökostrom                                     | 17.7  | 0,571           | 0,110     |
| Wärmepumpe                                   | 17.8  | 0,462           | 0,003     |
| Solaranlage                                  | 17.9  | 0,000           | 0,091     |
| Gebäudedämmung                               | 17.10 | 0,350           | 0,069     |
| Geldanlage in EE                             | 17.11 | 0,000           | 0,470     |
| ich tue bereits genug für die Umwelt         | 18    | 0,641           | 0,025     |
| Alter zum Zeitpunkt der ersten Anlage        | 19    | 0,003           | 0,438     |
| Ausbildungsabschluss                         | 20    | 0,203           | 0,602     |
| Haushaltsnettoeinkommen                      | 21    | 0,495           | 0,158     |

Quelle: Eigene Erhebung

Tab. 21: Vergleich der Familienverhältnisse zwischen PV-Eigentümern und Nichteigentümern – Kreuztabelle und Signifikanztest (Frage 22)

| Frage 22 - Kinder ja nein |                  |                  |               |                 |        |
|---------------------------|------------------|------------------|---------------|-----------------|--------|
|                           |                  |                  | keine Kinder  | Kinder          | Total  |
|                           |                  |                  | 2 - PV-Besitz | keine PV-Anlage | Anzahl |
| Erwartete Anzahl          | 44,1             | 93,9             |               |                 | 138,0  |
| % Anteil                  | 38,4%            | 61,6%            |               |                 | 100,0% |
| PV-Anlage                 | Anzahl           | 17               |               | 64              | 81     |
|                           | Erwartete Anzahl | 25,9             |               | 55,1            | 81,0   |
|                           | % Anteil         | 21,0%            |               | 79,0%           | 100,0% |
| Total                     |                  | Anzahl           | 70            | 149             | 219    |
|                           |                  | Erwartete Anzahl | 70,0          | 149,0           | 219,0  |
|                           |                  | % Anteil         | 32,0%         | 68,0%           | 100,0% |

|                          | Wert  | df | Asymp. Sig. (2-sided) |
|--------------------------|-------|----|-----------------------|
| Pearson Chi <sup>2</sup> | 7,121 | 1  | ,008                  |

Quelle: Eigene Erhebung

Tab. 22: Vergleich der Wohnverhältnisse zwischen PV-Eigentümern und Nicht-Eigentümern – Kreuztabelle und Signifikanztest (Frage 12)

| Frage 12 - Eigentümer vs. Mieter |                  |                  |                |                                 |        |
|----------------------------------|------------------|------------------|----------------|---------------------------------|--------|
|                                  |                  |                  | Hauseigentümer | Wohnungseigentümer<br>o. Mieter | Total  |
|                                  |                  |                  | 2 - PV-Besitz  | keine PV-Anlage                 | Anzahl |
| Erwartete Anzahl                 | 133,3            | 22,8             |                |                                 | 156,0  |
| % Anteil                         | 81,4%            | 18,6%            |                |                                 | 100,0% |
| PV-Anlage                        | Anzahl           | 78               |                | 6                               | 84     |
|                                  | Erwartete Anzahl | 71,8             |                | 12,3                            | 84,0   |
|                                  | % Anteil         | 92,9%            |                | 7,1%                            | 100,0% |
| Total                            |                  | Anzahl           | 205            | 35                              | 240    |
|                                  |                  | Erwartete Anzahl | 205,0          | 35,0                            | 240,0  |
|                                  |                  | % Anteil         | 85,4%          | 14,6%                           | 100,0% |

|                          | Value | df | Asymp. Sig. (2-sided) |
|--------------------------|-------|----|-----------------------|
| Pearson Chi <sup>2</sup> | 5,743 | 1  | ,017                  |

Quelle: Eigene Erhebung

Tab. 23: Vergleich der Gebäudetypen zwischen PV-Eigentümern und Nicht-Eigentümern – Kreuztabelle und Signifikanztest (Frage 13)

| Frage 13 - EZFH, MFH o. Bauernhaus |                  |                  |                 |              |            |        |
|------------------------------------|------------------|------------------|-----------------|--------------|------------|--------|
|                                    |                  |                  | Ein- oder Zwei- | Mehr-        | Bauernhaus | Total  |
|                                    |                  |                  | familienhaus    | familienhaus |            |        |
| 2 - PV-Besitz                      | keine PV-Anlage  | Anzahl           | 122             | 15           | 19         | 156    |
|                                    |                  | Erwartete Anzahl | 110,5           | 13,7         | 31,9       | 156,0  |
|                                    |                  | % Anteil         | 78,2%           | 9,6%         | 12,2%      | 100,0% |
|                                    | PV-Anlage        | Anzahl           | 48              | 6            | 30         | 84     |
|                                    |                  | Erwartete Anzahl | 59,5            | 7,4          | 17,2       | 84,0   |
|                                    |                  | % Anteil         | 57,1%           | 7,1%         | 35,7%      | 100,0% |
| Total                              | Anzahl           | 170              | 21              | 49           | 240        |        |
|                                    | Erwartete Anzahl | 170,0            | 21,0            | 49,0         | 240,0      |        |
|                                    | % Anteil         | 70,8%            | 8,8%            | 20,4%        | 100,0%     |        |

|                          | Value   | df | Asymp. Sig. (2-sided) |
|--------------------------|---------|----|-----------------------|
| Pearson Chi <sup>2</sup> | 18,614a | 2  | ,000                  |

Quelle: Eigene Erhebung

Tab. 24: Vergleich der Häufigkeiten der Herkunft der Gesprächspartner (PV-Eigentümer) zwischen PV-Eigentümern und Nicht-Eigentümern (Frage 11)

| 2 - PV-Besitz   |            | 11.1                                | 11.2                                       | 11.3   | 11.4              |
|-----------------|------------|-------------------------------------|--|--|-------------------|
|                 |            | Entfernung PV-Gesprächspartner: Ort | Entfernung PV-Gesprächspartner: Nachbarort | Entfernung PV-Gesprächspartner: außerhalb Gemeinde | Sonstige Personen |
| keine PV-Anlage | Anzahl     | 143                                 | 141  | 146  | 125               |
|                 | Mittelwert | 1,65                                | 1,52                                       | 1,58   | 1,47              |
|                 | Median     | 2,00                                | 2,00                                       | 2,00   | 2,00              |
| PV-Anlage       | Anzahl     | 80                                  | 77   | 76   | 66                |
|                 | Mittelwert | 2,09                                | 2,01                                       | 2,05   | 1,86              |
|                 | Median     | 2,00                                | 2,00                                       | 2,00   | 2,00              |

Quelle: Eigene Berechnung

Tab. 25: Vergleich der Bedeutung der Gesprächspartner zwischen PV-Eigentümern und Nicht-Eigentümern (Frage 14)

| Tätigkeitsbereich | Alle Befragte     |                        | PV-Eigentümer    |                       | PV-Nichteigentümer |                        |
|-------------------|-------------------|------------------------|------------------|-----------------------|--------------------|------------------------|
|                   | Anzahl Antworten* | Anteil Befragter N=246 | Anzahl Antworten | Anteil Befragter N=85 | Anzahl Antworten   | Anteil Befragter N=161 |
| PV-Branche        | 115               | 46,75%                 | 58               | 68,24%                | 57                 | 35,40%                 |
| Landwirt          | 102               | 41,46%                 | 36               | 42,35%                | 66                 | 40,99%                 |
| PV-Eigentümer     | 70                | 28,46%                 | 14               | 16,47%                | 56                 | 34,78%                 |
| Bank              | 18                | 7,32%                  | 13               | 15,29%                | 5                  | 3,11%                  |
| Solarverein       | 5                 | 2,03%                  | 0                | 0,00%                 | 5                  | 3,11%                  |
| Maschinenring     | 3                 | 1,22%                  | 3                | 3,53%                 | 0                  | 0,00%                  |

\* Mehrfachnennungen möglich

Quelle: Eigene Erhebung



Tab. 26: Vergleich der Bedeutung der Gesprächspartner zwischen CR und DÖ (Frage 14).

| Tätigkeitsbereich | Alle Befragte     |                        | Creglingen        |                        | Dörzbach          |                       |
|-------------------|-------------------|------------------------|-------------------|------------------------|-------------------|-----------------------|
|                   | Anzahl Antworten* | Anteil Befragter N=246 | Anzahl Antworten* | Anteil Befragter N=161 | Anzahl Antworten* | Anteil Befragter N=85 |
| PV-Branche        | 115               | 46,75%                 | 82                | 50,93%                 | 33                | 38,82%                |
| Landwirt          | 102               | 41,46%                 | 84                | 52,17%                 | 18                | 21,18%                |
| PV-Eigentümer     | 70                | 28,46%                 | 55                | 34,16%                 | 15                | 17,65%                |
| Bank              | 18                | 7,32%                  | 14                | 8,70%                  | 4                 | 4,71%                 |
| Solarverein       | 5                 | 2,03%                  | 5                 | 3,11%                  | 0                 | 0,00%                 |
| Maschinenring     | 3                 | 1,22%                  | 3                 | 1,86%                  | 0                 | 0,00%                 |

\* Mehrfachnennungen möglich

Quelle: Eigene Erhebung

Tab. 27: Vergleich der Bedeutung der wichtigsten Akteure im PV-Bereich zwischen CR und DÖ (Frage 4)

| Tätigkeitsbereich | Alle Befragte     |                        | Creglingen       |                        | Dörzbach         |                       |
|-------------------|-------------------|------------------------|------------------|------------------------|------------------|-----------------------|
|                   | Anzahl Antworten* | Anteil Befragter N=246 | Anzahl Antworten | Anteil Befragter N=161 | Anzahl Antworten | Anteil Befragter N=85 |
| Elektriker        | 89                | 36,18%                 | 78               | 48,45%                 | 11               | 12,94%                |
| Solarverein       | 57                | 23,17%                 | 57               | 35,40%                 | 0                | 0,00%                 |
| Bank              | 30                | 12,20%                 | 22               | 13,66%                 | 8                | 9,41%                 |
| Kommunalpolitik   | 16                | 6,50%                  | 9                | 5,59%                  | 7                | 8,24%                 |
| Landwirt          | 9                 | 3,66%                  | 9                | 5,59%                  | 0                | 0,00%                 |
| PV-Eigentümer     | 9                 | 3,66%                  | 5                | 3,11%                  | 4                | 4,71%                 |
| PV-Firma          | 4                 | 1,63%                  | 1                | 0,62%                  | 3                | 3,53%                 |

\*Mehrfachnennungen möglich

Quelle: Eigene Erhebung

Tab. 28: Wichtigste PV-Installateure in den Befragungsgemeinden nach erfasstem Marktanteil (Frage 15)

| Creglingen                          |                  |                              |
|-------------------------------------|------------------|------------------------------|
| PV-Installateur                     | Anzahl Antworten | Anteil installierter Anlagen |
| Elektro Ott                         | 55               | 61,1%                        |
| Elektro Engelhardt                  | 7                | 7,8%                         |
| Energiezentrum Elpersheim           | 4                | 4,4%                         |
| Maschinenring Schwäbisch Hall       | 4                | 4,4%                         |
| SolarDirekt                         | 4                | 4,4%                         |
| Elektro Schäfer                     | 3                | 3,3%                         |
| Elektro Glenk                       | 2                | 2,2%                         |
| Selbstmontage                       | 2                | 2,2%                         |
| Maschinenring Östl Main-Tauberkreis | 2                | 2,2%                         |
| S+K                                 | 2                | 2,2%                         |
| Blank Projektentwicklung GmbH       | 1                | 1,1%                         |
| Bopp Elektrotechnik                 | 1                | 1,1%                         |
| Ennosol GmbH                        | 1                | 1,1%                         |
| Kaupert-Elektro                     | 1                | 1,1%                         |
| Maschinenring Blaufelden            | 1                | 1,1%                         |
| Gesamt                              | 90               | 100%                         |

| Dörzbach                  |                  |                              |
|---------------------------|------------------|------------------------------|
| PV-Installateur           | Anzahl Antworten | Anteil installierter Anlagen |
| Chalupa Solartechnik      | 6                | 24,0%                        |
| Energiezentrum Elpersheim | 5                | 20,0%                        |
| Elektro-Mühleck           | 3                | 12,0%                        |
| Elektro Gleiter           | 4                | 16,0%                        |
| Elektro Ott               | 3                | 12,0%                        |
| KEGA Holzbau              | 1                | 4,0%                         |
| KS Solar                  | 1                | 4,0%                         |
| S+K                       | 1                | 4,0%                         |
| Selbstmontage             | 1                | 4,0%                         |
| Gesamt                    | 25               | 100%                         |

Quelle: Eigene Erhebung

Tab. 29: Firmensitze der wichtigsten PV-Installateure und Entfernungen zu den Befragungsgemeinden (Frage 15)

| Creglingen                          |                    |               |
|-------------------------------------|--------------------|---------------|
| PV-Installateur                     | Firmensitz         | Distanz (km)* |
| Elektro Ott                         | Creglingen         | 0             |
| Elektro Engelhardt                  | Röttingen          | 9             |
| Energiezentrum Elpersheim           | Elpersheim         | 15            |
| Maschinenring Schwäbisch Hall       | Langenburg         | 37            |
| SolarDirekt (Insolvenz 2008)        | Weikersheim        | 11            |
| Elektro Schäfer                     | Uffenheim          | 21            |
| Elektro Glenk                       | Gammesfeld         | 20            |
| Maschinenring Östl Main-Tauberkreis | Creglingen         | 0             |
| S+K                                 | Rot am See         | 31            |
| Blank Projektentwicklung GmbH       | Bieringen/Schöntal | 51            |
| Bopp Elektrotechnik                 | Bad Mergentheim    | 23            |
| Ennosol GmbH                        | Erfurt             | 250           |
| Kaupert-Elektro                     | Rothenburg odT.    | 17            |
| Maschinenring Blaufelden            | Schrozberg         | 18            |

| Dörzbach                  |                      |               |
|---------------------------|----------------------|---------------|
| PV-Installateur           | Firmensitz           | Distanz (km)* |
| Chalupa Solartechnik      | Schöntal-Bieringen   | 16            |
| Energiezentrum Elpersheim | Elpersheim           | 22            |
| Elektro-Mühleck           | Mulfingen            | 11            |
| Elektro Gleiter           | Dörzbach             | 0             |
| Elektro Ott               | Creglingen           | 36            |
| KEGA Holzbau              | Ingelfingen-Eberstal | 12            |
| KS Solar                  | Weikersheim          | 25            |
| S+K                       | Rot am See           | 35            |

Quelle: Eigene Erhebung

# Anhang 5: Modellierung der PV-Diffusion

Tab. 30: R-Skript des RK-Modells

```
#####  
# Berechnung der Werte mit Durchschnittsdaten-PV/EW/Raumkategorie  
#####  
  
pv_insg <- read.table("C:/FILES/linder/Susanne Arbeit/Dr.Arbeit/R/PV-Daten/PV_RK_Mneu_Clu_EWZ.txt",  
                    header=TRUE, sep="\t", na.strings="NA", dec=".", strip.white=TRUE)  
  
#Datenframe aufbereiten  
pv_insg$AGS = NULL  
pv_insg$GEN = NULL  
pv_insg$M_EZFH40 = NULL  
pv_insg$M_EZFH30 = NULL  
pv_insg$M_EZFH60 = NULL  
pv_insg$M_EZFH70 = NULL  
aggregation = t(aggregate(pv_insg, by=list(pv_insg$Raumkat), FUN=sum, na.rm=TRUE))  
colnames(aggregation) = paste("Kategorie", aggregation[1,])  
aggregation  
agg_m = t(aggregate(pv_insg, by=list(pv_insg$Raumkat), FUN=mean, na.rm=TRUE))  
agg_m = agg_m[grep("M_EZFH50", rownames(aggregation)),]  
agg_m = data.frame(t(agg_m))  
  
# Nur Werte ab 2000  
agg_PV = data.frame(aggregation[grep("PV_2", rownames(aggregation)),])  
agg_PV  
  
# Gewichtung mit EWZ  
agg_EWZ = data.frame(aggregation[grep("X2", rownames(aggregation)),])  
agg_y=agg_PV/agg_EWZ  
  
#Änderungsbetrag ausrechnen (pv_ew(t) - pv_ew(t-1))  
abs_10 = agg_y$Kategorie.10  
abs_10_tmp = cbind(as.ts(abs_10),lag(abs_10, -1))  
abs_10_tmp[is.na(abs_10_tmp)] <- 0  
abs_10_tmp = abs_10_tmp[1:nrow(agg_y),1:2]  
abs_10_tmp  
agg_y$ROC_10 = abs_10_tmp[,1] - abs_10_tmp[,2]  
  
abs_20 = agg_y$Kategorie.20  
abs_20_tmp = cbind(as.ts(abs_20),lag(abs_20, -1))
```

```
abs_20_tmp[is.na(abs_20_tmp)] <- 0
abs_20_tmp = abs_20_tmp[1:nrow(agg_y),1:2]
abs_20_tmp
agg_y$ROC_20 = abs_20_tmp[,1] - abs_20_tmp[,2]
```

```
abs_30 = agg_y$Kategorie.30
abs_30_tmp = cbind(as.ts(abs_30),lag(abs_30, -1))
abs_30_tmp[is.na(abs_30_tmp)] <- 0
abs_30_tmp = abs_30_tmp[1:nrow(agg_y),1:2]
abs_30_tmp
agg_y$ROC_30 = abs_30_tmp[,1] - abs_30_tmp[,2]
```

```
abs_40 = agg_y$Kategorie.40
abs_40_tmp = cbind(as.ts(abs_40),lag(abs_40, -1))
abs_40_tmp[is.na(abs_40_tmp)] <- 0
abs_40_tmp = abs_40_tmp[1:nrow(agg_y),1:2]
abs_40_tmp
agg_y$ROC_40 = abs_40_tmp[,1] - abs_40_tmp[,2]
agg_y_RK <- agg_y[1:4]
```

#### #Dataframe für Model

```
datfr_10 <- data.frame(x=(0:(nrow(agg_y)-1)),y=agg_y$ROC_10)
datfr_20 <- data.frame(x=(0:(nrow(agg_y)-1)),y=agg_y$ROC_20)
datfr_30 <- data.frame(x=(0:(nrow(agg_y)-1)),y=agg_y$ROC_30)
datfr_40 <- data.frame(x=(0:(nrow(agg_y)-1)),y=agg_y$ROC_40)
datfr <- data.frame(cbind(datfr_10[,2], datfr_20[,2], datfr_30[,2], datfr_40[,2]))
```

```
datfr_10_cum = cumsum(datfr_10)
datfr_20_cum = cumsum(datfr_20)
datfr_30_cum = cumsum(datfr_30)
datfr_40_cum = cumsum(datfr_40)
datfr_cum <- data.frame(cbind(datfr_10_cum[,2], datfr_20_cum[,2], datfr_30_cum[,2], datfr_40_cum[,2]))
colnames(datfr) = c("RK 10", "RK 20", "RK 30", "RK 40")
colnames(datfr_cum) = c("RK 10", "RK 20", "RK 30", "RK 40")
```

#### #Model anlegen, fitting mit Startwerten p (Innovation) = 0.03 und q (Imitation) = 0.38

```
model_10 <- nls(y ~ agg_m[,1] * ((p + q)^2/p) * (exp(-(p + q) * x)/((q / p) * exp(-(p + q) * x) + 1)^2),
data=datfr_10, start=c(p = 0.03, q = 0.38))
```

```

summary(model_10)
model_20 <- nls(y ~ agg_m[,2] * ((p + q)^2/p) * (exp(-(p + q) * x)/((q / p) * exp(-(p + q) * x) + 1)^2),
data=datfr_20, start=c(p = 0.03, q = 0.38))
summary(model_20)
model_30 <- nls(y ~ agg_m[,3] * ((p + q)^2/p) * (exp(-(p + q) * x)/((q / p) * exp(-(p + q) * x) + 1)^2),
data=datfr_30, start=c(p = 0.03, q = 0.38))
summary(model_30)
model_40 <- nls(y ~ agg_m[,4] * ((p + q)^2/p) * (exp(-(p + q) * x)/((q / p) * exp(-(p + q) * x) + 1)^2),
data=datfr_40, start=c(p = 0.03, q = 0.38))
summary(model_40)

```

### **#Werte der Model predictions**

```

predict10 <- predict(model_10, newdata = data.frame(x = 0:30))
predict20 <- predict(model_20, newdata = data.frame(x = 0:30))
predict30 <- predict(model_30, newdata = data.frame(x = 0:30))
predict40 <- predict(model_40, newdata = data.frame(x = 0:30))
model <- data.frame(cbind(predict10, predict20, predict30, predict40))
predict_10_cum <- cumsum(predict(model_10, newdata = data.frame(x = 0:30)))
predict_20_cum <- cumsum(predict(model_20, newdata = data.frame(x = 0:30)))
predict_30_cum <- cumsum(predict(model_30, newdata = data.frame(x = 0:30)))
predict_40_cum <- cumsum(predict(model_40, newdata = data.frame(x = 0:30)))
model_cum <- data.frame(cbind(predict_10_cum, predict_20_cum, predict_30_cum, predict_40_cum))

```

### **#Kontrollausgabe Model**

```

par(mfrow=c(1,2))
colnames(model) = c("RK 10", "RK 20", "RK 30", "RK 40")
colnames(model_cum) = c("RK 10", "RK 20", "RK 30", "RK 40")

```

### **#Datenvorbereitung**

```

pred = melt(model)
pred_cum = melt(model_cum)
pred$x = c(cbind(0:30, 0:30, 0:30, 0:30))
pred_cum$x = c(cbind(0:30,0:30, 0:30, 0:30))
measured = melt(datfr)
measured_cum = melt(datfr_cum)
measured$x = c(cbind(0:9))
measured_cum$x = c(cbind(0:9))

```

### #Adaptionskurve

```
p1 = ggplot() + geom_line(aes(x=x,y=value, group=variable, colour=variable), data=pred) +  
geom_point(aes(x=x,y=value, group=variable, colour=variable), data=measured) + labs(fill="") +  
opts(legend.position = "none") + scale_y_continuous("PV-Neuinstallationen pro Einwohner") +  
scale_x_continuous("", labels=c("2000", "2005", "2010", "2015", "2020", "2025", "2030")) +  
opts(axis.text.x=theme_text(size=12), axis.title.y=theme_text(size=12, hjust=0.5, vjust=0.2,  
angle=90), title="Adaptionskurve", plot.title=theme_text(vjust=2, size=14, face="bold"))
```

### #Diffusionskurve

```
p2 = ggplot() + geom_line(aes(x=x,y=value, group=variable, colour=variable), data=pred_cum) +  
geom_point(aes(x=x,y=value, group=variable, colour=variable), data=measured_cum) +  
opts(legend.position = c(0.8,0.7), legend.background=theme_rect(fill="white", size=0), legend.title =  
theme_blank()) + scale_y_continuous("Kumulierte Anzahl an PV pro Einwohner") + scale_x_continuous("",  
labels=c("2000", "2005", "2010", "2015", "2020", "2025", "2030")) + opts(axis.text.x=theme_text(size=12),  
axis.title.y=theme_text(hjust=0.5, vjust=0.2, angle=90, size=12), title="Diffusionskurve",  
plot.title=theme_text(vjust=2, size=14, face="bold"))
```

### #Ausgabe

```
multiplot(p1, p2, cols=2)
```

Tab. 31: R-Skript des Gemeinde-Modells

```
#####  
# Berechnung der Werte mit Durchschnittsdaten-PV/EW/Raumkategorie  
# pro Gemeinde  
#####  
pv_insg <- read.table("C:/FILES/linder/Susanne Arbeit/Dr.Arbeit/R/PV-Daten/PV_RK_M50_Clu.txt",  
header=TRUE, sep="t", na.strings="NA", dec=".", strip.white=TRUE)
```

### #Ausgabe vorbereiten

```
output = data.frame(matrix(nrow = nrow(pv_insg), ncol = 0))  
output$AGS = 0  
output$GEN = pv_insg$GEN  
output$KAT = 0  
output$CLUSTER = 0  
output$P = 0  
output$Q = 0  
output$P_SIG = 0  
output$Q_SIG = 0  
output$ERROR = 0  
output$START = 0  
output$EWZ = 0  
output$Marktpot = 0
```

### #Iteration über alle Gemeinden

```
for (i in 1:nrow(pv_insg)) {  
  temp_df = as.data.frame(t(pv_insg[grep("PV_2", colnames(pv_insg))][i,]))  
  print(i)  
  start = 1
```

### #Falls der erste Wert keine Null ist, überspringen. Ansonsten die Länge des Datenframes anpassen:

```
  if (which(temp_df > 0)[1] > 1) {  
    #Wann beginnt die Reihe?  
    start = which(temp_df > 0)[1] - 1  
    #Auszug aus Datenframe holen  
    tmp = temp_df[c(start:nrow(temp_df)),]  
    temp_df = NULL  
  
    temp_df = data.frame(x=0:(length(tmp)-1), y=tmp)  
  }  
  if(which(temp_df > 0)[1] <= 1) {  
    colnames(temp_df) = c("y")  
  }  
  
  temp_df = cbind(as.ts(temp_df$y),lag(temp_df$y, -1))  
  temp_df[is.na(temp_df)] <- 0  
  temp_df = temp_df[1:(nrow(temp_df)-1),1:2]  
  temp_df = (temp_df[,1] - temp_df[,2])  
  data = as.data.frame(temp_df)  
  data$x = c(0:(length(temp_df)-1))  
  colnames(data) = c("y", "x")
```

### #Auswahl Szenario:

```
m = pv_insg$M_EZFH50[i]  
  
#Startjahr mitspeichern  
output[i,]$START = 2000 + (start-1)  
output[i,]$AGS = pv_insg$AGS[i]  
output[i,]$KAT = pv_insg$Raumkat[i]  
output[i,]$CLUSTER = pv_insg$MISCATTER[i]  
output[i,]$EWZ = pv_insg$EWZ[i]  
output[i,]$Marktpot = pv_insg$M_EZFH50[i]
```

## #Fehlerbehandlung und Model Fitting

```
tryCatch({
  nlc <- nls.control(maxiter = 1000)
  model <- nls(y ~ m * ((p + q)^2/p) * (exp(-(p + q) * x)/((q / p) * exp(-(p + q) * x) + 1)^2), data=data, start=c(p
= 0.01, q = 0.38), control=nlc)
  summary(model)
  output[i,]$P = round(coef(model)[1],8)
  output[i,]$Q = round(coef(model)[2],8)

#Ausgabe Signifikanz für P
  output[i,]$P_SIG <- 0
  if(summary(model)$parameters[1,4] < 0.05) {
    output[i,]$P_SIG <- 1
  }

#Ausgabe Signifikanz für Q
  output[i,]$Q_SIG <- 0
  if(summary(model)$parameters[2,4] < 0.05) {
    output[i,]$Q_SIG <- 1
  }

#Ausgabe Standardfehler
  output[i,]$ERROR = round(summary(model)$sigma,8)
  #Vorbereitung graphische Ausgabe
  pred = data.frame(x = 0:(30-start))
  pred$y = predict(model, newdata=data.frame(x=0:(30-start)))
  pred_cum = data.frame(x = 0:(30-start))
  pred_cum$y = cumsum(pred$y)

  meas = data.frame(x=start:10)
  meas$y = data$y
  meas_cum = data.frame(x=start:10)
  meas_cum$y = cumsum(temp_df)

  pred$x = pred$x + 2000 + start-1
  pred_cum$x = pred_cum$x + 2000 + start-1
  meas$x = meas$x + 2000-1
  meas_cum$x = meas_cum$x + 2000-1
}
```



### #graphische Ausgabe

```
p1 = ggplot() + geom_line(aes(x=x, y=y), data=pred) + geom_point(aes(x=x, y=y),
data=meas) + labs(fill="") + opts(legend.position = "none") + scale_y_continuous("PV-Neuinstallationen pro
Einwohner") + scale_x_continuous("", limits=c(2000, 2030)) + opts(axis.text.x=theme_text(size=12),
axis.title.y=theme_text(size=12, hjust=0.5, vjust=0.2, angle=90),title=paste("Adoptionskurve für",
output[i,]$GEN), plot.title=theme_text(vjust=2, size=14, face="bold"))
```

```
p2 = ggplot() + geom_line(aes(x=x, y=y), data=pred_cum) + geom_point(aes(x=x, y=y),
data=meas_cum) + opts(legend.position = c(0.8,0.7),legend.background=theme_rect(fill="white", size=0),
legend.title = theme_blank()) + scale_y_continuous("Kumulierte Anzahl an PV pro Einwohner") +
scale_x_continuous("") + opts(axis.text.x=theme_text(size=12), axis.title.y=theme_text(hjust=0.5, vjust=0.2,
angle=90, size=12),title="Diffusionskurve", plot.title=theme_text(vjust=2, size=14, face="bold"))
```

#Auskommentieren, wenn alle Gemeinden nicht geplottet und gespeichert werden sollen:

```
pdf(paste(output[i,]$AGS,'_plot2000_M50.pdf'), width=10, height=4)
```

```
multiplot(p1, p2, cols=2)
```

```
dev.off()
```

```
},warning = function(w) {
```

```
output[i,]$P = NA
```

```
output[i,]$Q = NA
```

```
print("warning")
```

```
},error = function(e) {
```

```
output[i,]$P = NA
```

```
output[i,]$Q = NA
```

```
print("error")
```

```
print(e)
```

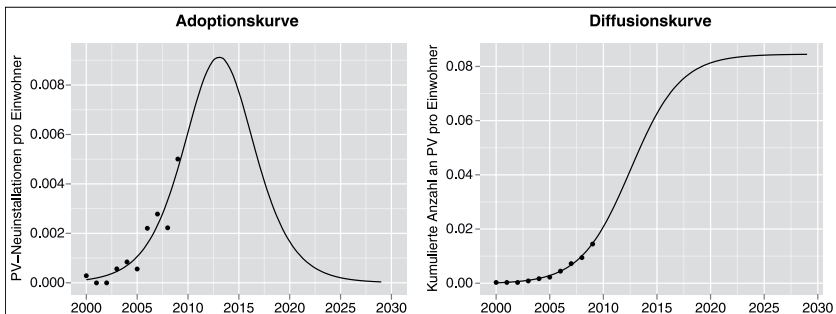
```
}}
```

```
}
```

**#Ausgabe:**

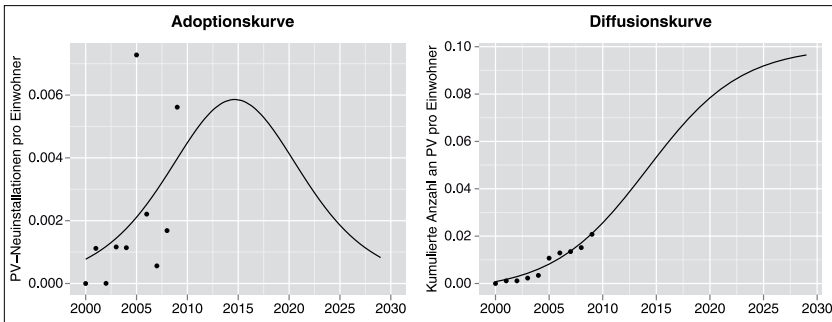
```
write.csv(output, file="output_2000_M50_NEU.csv")
```

Abb. 43: Adoptions- und Diffusionskurve einer signifikanten Schätzung (Gemeinde Mötzingen)



Quelle: Eigene Berechnung

Abb. 44: Adoptions- und Diffusionskurve einer nicht signifikanten Schätzung (Gemeinde Schlat)



Quelle: Eigene Berechnung

Tab. 32: Signifikanzniveaus der U-Tests nach Mann-Whitney: Vergleich der Innovationskoeffizienten (p) zwischen den RK

| p-U-Test | RK 10 | RK 20  | RK 30 | RK 40  |
|----------|-------|--------|-------|--------|
| RK 10    |       | 0,065* | 0,912 | 0,007* |
| RK 20    | 0,065 |        | 0,201 | 0,582  |
| RK 30    | 0,912 | 0,201  |       | 0,095  |
| RK 40    | 0,007 | 0,582  | 0,095 |        |

Signifikante Tests auf dem Niveau von 0,05 sind mit „\*“ markiert

Quelle: Eigene Berechnung

Tab. 33: Signifikanzniveaus der U-Tests nach Mann-Whitney: Vergleich der Imitationskoeffizienten (q)

| q-U-Test | RK 10 | RK 20 | RK 30  | RK 40  |
|----------|-------|-------|--------|--------|
| RK 10    |       | 0,166 | 0,029* | 0,000* |
| RK 20    | 0,166 |       | 0,242  | 0,000* |
| RK 30    | 0,029 | 0,242 |        | 0,233  |
| RK 40    | 0,000 | 0,000 | 0,233  |        |

Signifikante Test auf dem Niveau von 0,05 sind mit „\*“ markiert

Quelle: Eigene Berechnung

Tab. 34: KS-Test auf Normalverteilung von Innovations- und Imitationseffekt

|                     | Nullhypothese   | Test                                     | Signifikanz | Entscheidung           |
|---------------------|---|--|-------------|------------------------|
| Innovationseffekt p | Die Verteilung von p ist normal mit Mittelwert 0,01 und Standardabweichung 0,00 | Kolmogorov-Smirnov-Test einer Stichprobe | 0,006       | Nullhypothese ablehnen |
| Imitationseffekt q  | Die Verteilung von q ist normal mit Mittelwert 0,28 und Standardabweichung 0,09 | Kolmogorov-Smirnov-Test einer Stichprobe | 0,037       | Nullhypothese ablehnen |

Signifikanzniveau von 0,05

Quelle: Eigene Berechnung

Tab. 35: Korrelation zwischen Innovations- und Imitationseffekt

| Rangkorrelation nach Spearman |                         |          |          |
|-------------------------------|-------------------------|----------|----------|
|                               |                         | p        | q        |
| p                             | Korrelationskoeffizient | 1,000    | -0,649** |
|                               | Sig. (2-seitig)         |          | ,000     |
|                               | N                       | 319      | 319      |
| q                             | Korrelationskoeffizient | -0,649** | 1,000    |
|                               | Sig. (2-seitig)         | ,000     |          |
|                               | N                       | 319      | 319      |

\*\* Die Korrelation ist auf dem 0,01 Niveau signifikant (zweiseitig).

Quelle: Eigene Berechnung

Tab. 36: Ergebnisse der MLE-Schätzung (p-Modell)

| Data set            | PV_Output_GemDaten_sig |                         |          |
|---------------------|------------------------|-------------------------|----------|
| Dependent Variable: | P                      | Number of Observations: | 319      |
| Mean dependent var: | 0,0061179              | Number of Variables:    | 7        |
| S.D. dependent var: | 0,00377966             | Degrees of Freedom:     | 312      |
| Lag coeff. (Rho)    | 0,48345                |                         |          |
| R-squared:          | 0,171943               | Log likelihood          | 1350,92  |
| Sigma-square        | 1,18E-05               | Akaike info criterion   | -2687,83 |
| S.E. of regression  | 0,0034394              | Schwarz criterion       | 2661,48  |

| Variable | Coefficient | Std. Error | z-value  | Probability |
|----------|-------------|------------|----------|-------------|
| W_PV/EW  | 0,48345     | 0,07258    | 6,66119  | 0,00000     |
| CONSTANT | 0,00329     | 0,00354    | 0,92943  | 0,35267     |
| EZFH     | 0,00455     | 0,00420    | -1,08379 | 0,27846     |
| LW       | 0,00534     | 0,05056    | 0,10557  | 0,91592     |
| FAM      | 0,03240     | 0,01243    | 2,60722  | 0,00913     |
| BILDG    | 0,00544     | 0,00847    | 0,64226  | 0,52070     |
| EINK     | 0,00000     | 0,00000    | 0,23951  | 0,81071     |

DIAGNOSTICS FOR HETEROSKEDASTICITY

| RANDOM COEFFICIENTS |  |    |          |          |
|---------------------|--|----|----------|----------|
| TEST                |  | DF | VALUE    | PROB     |
| Breusch-Pagan test  |  | 5  | 8,871887 | 0,114285 |

DIAGNOSTICS FOR SPATIAL DEPENDENCE

| SPATIAL LAG DEPENDENCE FOR WEIGHT MATRIX : |    |          |         |  |
|--|----|----------|---------|--|
| PV_Output_GemDaten_sig.gwt                 |    |          |         |  |
| TEST                                       | DF | VALUE    | PROB    |  |
| Likelihood Ratio Test                      | 1  | 35,76206 | 0,00000 |  |

Quelle: Eigene Berechnung

Tab. 37: Ergebnisse der MLE-Schätzung (q-Modell)

| Data set            |            | PV_Output_GemDaten_sig  |          |
|---------------------|------------|-------------------------|----------|
| Dependent Variable: | Q          | Number of Observations: | 319      |
| Mean dependent var: | 0,28024    | Number of Variables:    | 7        |
| S.D. dependent var: | 0,0914725  | Degrees of Freedom:     | 312      |
| Lag coeff. (Rho)    | 0,479109   |                         |          |
| R-squared:          | 0,257719   | Log likelihood          | 352,019  |
| Sigma-square        | 0,00621083 | Akaike info criterion   | -690,037 |
| S.E. of regression  | 0,0788088  | Schwarz criterion       | -663,681 |

| Variable | Coefficient | Std. Error | z-value  | Probability |
|----------|-------------|------------|----------|-------------|
| W_PV/EW  | 0,47911     | 0,07015    | 6,82989  | 0,00000     |
| CONSTANT | 0,10812     | 0,08328    | 1,29827  | 0,19420     |
| EZFH     | 0,03544     | 0,09618    | 0,36844  | 0,71255     |
| LW       | 1,96792     | 1,15924    | 1,69759  | 0,08959     |
| FAM      | 0,53679     | 0,28459    | 1,88619  | 0,05927     |
| BILDG    | -0,20331    | 0,19455    | -1,04503 | 0,29601     |
| EINK     | 0,00000     | 0,00000    | -0,37175 | 0,71008     |

**DIAGNOSTICS FOR HETEROSKEDASTICITY**

RANDOM COEFFICIENTS

| TEST               | DF | VALUE   | PROB     |
|--------------------|----|---------|----------|
| Breusch-Pagan test | 5  | 11,2257 | 0,047084 |

**DIAGNOSTICS FOR SPATIAL DEPENDENCE**

SPATIAL LAG DEPENDENCE FOR WEIGHT MATRIX :

PV\_Output\_GemDaten\_sig.gwt

| TEST                  | DF | VALUE    | PROB    |
|-----------------------|----|----------|---------|
| Likelihood Ratio Test | 1  | 39,06094 | 0,00000 |

Quelle: Eigene Berechnung