

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	23
Tabellenverzeichnis	26
Nomenklatur	28
1. Einleitung und Motivation	29
1.1. Aufbau der Arbeit	31
1.2. Begriffsklärung	32
1.3. Reproduzierbarkeit der Ergebnisse	35
2. Vorhandene Methoden und Tools	37
2.1. Klassische Entwicklung von Modellen und Modellierungswerkzeugen	37
2.2. Offene Modellentwicklung	39
2.2.1. Initiativen für offene Modellentwicklung	39
2.2.2. Offene Modelle und Modellbibliotheken zu Beginn der Untersuchung (2013)	40
2.2.3. Offene Modelle und Modellbibliotheken während der Erstellung der Arbeit (ab 2014)	42
2.2.4. Grenzen der offenen Modelle	44
2.3. Konzept für ein Vertrauensnetz zur Entwicklung komplexer Energiemodelle	45
2.3.1. Modularen Daten- und Programmpaketen	46
2.3.2. Dokumentation	47
2.3.3. Kommunikation und Community	47
2.3.4. Daten	48
2.3.5. Modelle	48

2.3.6.	Nutzung, Review und Versionierung	49
2.3.7.	Performance-Gewinn durch die parallele Nutzung von offenen und proprietären Komponenten	50
2.4.	Existierende modulare gemeinschaftliche Modellentwicklung	50
2.4.1.	<i>oemof</i>	50
2.4.2.	Vorstellung weiterer existierender modularer Programmpakete	56
3.	Struktur der Modellpakete	59
3.1.	Nutzung von externen Programmpaketen	59
3.2.	Struktur des Datenmodells <i>reegis</i>	63
3.2.1.	Schnittstelle des Datenmodells	63
3.2.2.	Nachvollziehbarkeit und Transparenz	65
3.2.3.	Statische und dynamische Daten	66
3.3.	Struktur der Modellpakete <i>deflex</i> und <i>berlin_hp</i>	68
3.3.1.	Modelltyp	68
3.3.2.	Dispatchmodell mit Erweiterungsoptionen	68
3.3.3.	Regionen, Knoten und Kanten im Energiesystem- graph	69
3.3.4.	Marktregion im Mehr-Regionen-Modell	70
3.3.5.	Energiesysteme in <i>solph</i>	71
3.3.6.	Basisklassen in <i>solph</i>	71
3.3.7.	Busse in <i>solph</i>	74
3.3.8.	Erstellung der Nebenbedingungen und der Ziel- funktion in <i>solph</i>	75
3.4.	Energietechnische Komponenten in <i>solph</i>	75
3.4.1.	Ressourcenquellen	76
3.4.2.	Thermische Kraftwerke	76
3.4.3.	Heizwerke, dezentrale Heizungssysteme und BHKW	77
3.4.4.	KWK-Anlagen (Gegendruckturbine)	78
3.4.5.	KWK-Anlagen (Entnahmekondensationsturbine)	79
3.4.6.	Pumpspeicherkraftwerke	82

3.4.7.	Photovoltaik, Windkraft, Wasserkraft, elektrische Geothermie	83
3.4.8.	Biomasse	84
3.4.9.	Solarthermie (Dachanlage)	85
3.4.10.	Stromleitungen	86
3.4.11.	Wärmeleitungen	87
3.4.12.	Wärmespeicher	87
3.4.13.	Verbräuche	88
3.4.14.	Schlupfkomponenten	88
3.4.15.	Wärmepumpen	89
4.	Datenmodell <i>reegis</i>	91
4.1.	Kraftwerke und Speicher	91
4.1.1.	Rohdaten	92
4.1.2.	Aufbereitung	92
4.1.3.	Auswertung	97
4.1.4.	Speicher	98
4.1.5.	Ausblick	99
4.2.	Einwohner	100
4.2.1.	Rohdaten	100
4.2.2.	Aufbereitung und Auswertung	100
4.3.	Einspeisezeitreihen	101
4.3.1.	Wetterdaten	102
4.3.2.	Allgemeine Rohdaten	106
4.3.3.	Normierte PV-Einspeisezeitreihen	107
4.3.4.	Normierte Windeinspeisezeitreihen	112
4.3.5.	Normierte Wasserkraftzeitreihen	115
4.3.6.	Auswertung	117
4.4.	Stromlastgänge	122
4.4.1.	Rohdaten	122
4.4.2.	Aufbereitung und Auswertung	125
4.4.3.	Ausblick	131
4.5.	Wärmelastgänge	132
4.5.1.	Rohdaten	132
4.5.2.	Aufbereitung und Auswertung	133

4.5.3.	Alternative Verfahren	137
5.	Energiemodelle	141
5.1.	<i>deflex</i>	141
5.1.1.	Modellregionen	141
5.1.2.	Geographische Definition der Netzregionen	143
5.1.3.	Aufbau von <i>deflex</i>	145
5.1.4.	Optimierungsziel	146
5.1.5.	Szenarien	147
5.1.6.	Implizite Annahmen der Modellierung	147
5.1.7.	Daten in <i>deflex</i>	148
5.2.	<i>berlin_hp</i>	151
5.2.1.	Aufbau des Modells	151
5.2.2.	Optimierungsziel und Szenarien	153
5.2.3.	Allgemeine Daten	153
5.2.4.	Wärmebedarfsmodell	153
5.2.5.	Fernwärme	154
5.3.	Kopplungsvarianten	158
5.3.1.	Direkte Kopplung	160
5.3.2.	Indirekte Kopplung	160
6.	Szenarien und Analyse	167
6.1.	Modelkopplung <i>deflex</i> und Berlin	168
6.1.1.	Bewertung der Kopplungsvarianten	169
6.1.2.	Analyse des gekoppelten Modells	171
6.1.3.	Rückkopplung des regionalen Modells auf das Upstream-Modell	177
6.1.4.	Diskussion der Kopplung bei Regionen mit Rückkopplung	180
6.2.	Bewertung einer 100%-Region	181
6.2.1.	Energetische Bewertung	182
6.2.2.	Netzdienlichkeit	183
6.2.3.	Emissionen	186
6.2.4.	Bewertung von regionalen Modellen	187

7. Zusammenfassung und Ausblick	189
7.1. Zusammenfassung	189
7.2. Ausblick	193
Literatur	195
A. Datentabellen	213
B. Rechnerumgebung	217