

**Strategische Netzwerkplanung
unter Berücksichtigung von
Rohstoffpreis-Unsicherheiten
am Beispiel der Sammlung und Verwertung
von Photovoltaik-Modulen**

VON DER FAKULTÄT FÜR WIRTSCHAFTSWISSENSCHAFTEN DER
RHEINISCH-WESTFÄLISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE AACHEN ZUR
ERLANGUNG DES AKADEMISCHEN GRADES EINER DOKTORIN DER WIRTSCHAFTS-
UND SOZIALWISSENSCHAFTEN GENEHMIGTE DISSERTATION

vorgelegt von
Diplom-Kauffrau Eva Johanna Degel, geb. Burgard

Berichter: Univ.-Prof. Dr. rer. pol. Grit Walther
Univ.-Prof. Dr. rer. pol. Peter Letmathe

Tag der mündlichen Prüfung: 13.05.2016

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	VI
Abkürzungsverzeichnis	IX
Symbolverzeichnis	XI
1. Einleitung	1
1.1. Ausgangslage und Problemstellung	1
1.2. Zielsetzung und Vorgehensweise	3
2. Rahmenbedingungen der Sammlung und Verwertung von PV-Modulen	7
2.1. Technische Rahmenbedingungen	8
2.1.1. PV-Anlagen – Aufbau und Charakterisierung	8
2.1.2. PV-Module – Typen, Funktionsweise und Zusammensetzung . .	11
2.1.3. Lebensdauer und Abfallaufkommen	14
2.1.3.1. Entwicklung und Prognose des Ausbaus von Photovol-	
taik-Anlagen	16
2.1.3.2. Lebensdauer	20
2.1.3.3. Weitere Abfallquellen	21
2.1.3.4. Abschätzung des Abfallaufkommens an PV-Modulen .	23
2.2. Rechtliche Rahmenbedingungen	27
2.3. Existierende Sammlungs- und Verwertungsmaßnahmen	31
2.3.1. Sammlung	31
2.3.2. Verwertung	32
2.3.2.1. Glasrecycling	35
2.3.2.2. SolarWorld/SolarCycle	37
2.3.2.3. First Solar	39
2.3.2.4. Lobbe	40
2.3.2.5. Weitere Recyclingansätze	42
2.4. Strategisches Rohstoffpotential von PV-Modulen	44
2.4.1. Rohstoff-Angebot	45
2.4.2. Rohstoff-Nachfrage	46

2.4.3. Historische Rohstoffpreisentwicklung	50
2.5. Fazit und Ableitung von Anforderungen an ein Entscheidungsunterstützungssystem	53
3. Ansätze zur strategischen Planung von Sammlungs- und Verwertungsnetzwerken	57
3.1. Planungsansätze des Reverse Logistics	58
3.1.1. Allgemeine Ansätze für die strategischen Planung von Sammlungs- und Verwertungsnetzwerken	60
3.1.2. Spezielle Ansätze für die Sammlung und Verwertung von PV-Modulen	63
3.2. Ansätze zur Optimierung unter Unsicherheit	66
3.2.1. Methoden zur Unterstützung von Entscheidungen unter Unsicherheit	66
3.2.2. Analyse der Integration von Unsicherheit in strategischen Planungsansätzen des Reverse Logistics und Closed-Loop Supply Chain Managements	73
3.3. Ansätze und Indikatoren für die Rohstoffpreisprognose	77
3.3.1. Ansätze für die Prognose von Rohstoffpreisen	77
3.3.2. Ansätze zur Messung der Rohstoffkritikalität	78
3.3.2.1. Konzepte zur Messung der Rohstoffkritikalität	78
3.3.2.2. Bewertung der in PV-Modulen enthaltenen Rohstoffe hinsichtlich der Rohstoffkritikalität	83
3.4. Fazit: Geeignete Ansätze für die strategische Netzwerkplanung der Sammlung und Verwertung von PV-Modulen	85
4. Konzeption eines strategischen Planungsansatzes zur Modellierung und Bewertung der Sammlung und Verwertung von PV-Modulen	87
4.1. Darstellung eines Netzwerkes zur Sammlung und Verwertung von PV-Modulen	88
4.2. Technische Modellierung der Verwertung	92
4.3. Betriebswirtschaftliche Bewertung von Verwertungsnetzwerken	93
4.3.1. Modellierung der Investitionen	94
4.3.2. Modellierung der betriebsbedingten Zahlungen	96
4.3.2.1. Fixe betriebsbedingte Zahlungen	96
4.3.2.2. Variable Zahlungen	96
4.3.3. Modellierung der Zahlungen für Transporte	97

4.4. Modellierung eines strategischen Planungsansatzes für die Sammlung und Verwertung von PV-Modulen	98
4.5. Szenariobasierte Erweiterung des Planungsmodells	108
4.6. Komplexität des Planungsansatzes	111
5. Fallstudien zur Planung eines Sammlungs- und Verwertungsnetzwerkes für PV-Module	115
5.1. Datenerhebung	116
5.1.1. Sammlung	116
5.1.2. Recyclinganlagen	118
5.1.3. Transport	120
5.1.4. Rohstoffpreisentwicklung	122
5.1.5. Weitere planungsrelevante Daten	123
5.2. Daten-Aggregation und Standortvorauswahl	123
5.3. Regionale Fallstudie für Nordrhein-Westfalen	125
5.3.1. Datenermittlung Fallstudie NRW	126
5.3.2. Preprocessing und Implementierung	128
5.3.2.1. Preprocessing	128
5.3.2.2. Implementierung	129
5.3.3. Ergebnisse	130
5.4. Fallstudie Deutschland	135
5.4.1. Datenermittlung Fallstudie Deutschland	135
5.4.2. Modellanpassung und Preprocessing	136
5.4.3. Ergebnisse	140
5.4.4. Szenarioanalyse	145
5.5. Handlungsempfehlungen für die Sammlung und Verwertung von PV-Modulen	147
5.5.1. Handlungsempfehlungen an potentielle Investoren	148
5.5.2. Handlungsempfehlungen an Hersteller von PV-Modulen	149
5.5.3. Handlungsempfehlungen an Forschung und Entwicklung	150
5.5.4. Handlungsempfehlungen an politische Entscheidungsträger	150
6. Kritische Würdigung und Ausblick	153
6.1. Kritische Würdigung	153
6.2. Weitere Einsatzbereiche des Planungsansatzes	155
6.3. Weiterer Forschungsbedarf	156
7. Zusammenfassung	159

A. Anhang	163
A.1. Übersicht PV-Hersteller	163
A.2. Auswertung verschiedener Rohstoffkritikalitätsstudien	165
Literaturverzeichnis	169