

# Probabilistisches Flexibilitätspotenzial von Erneuerbare-Energien-Anlagen im Mittel- und Niederspannungsnetz für den aktiven Hochspannungsnetzbetrieb

Von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik  
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen  
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der  
Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Master of Science  
Hengsi Chen  
aus Hunan, China

Berichter:      Universitätsprofessor Dr. Albert Moser  
                    Universitätsprofessor Dr. Antonello Monti

Tag der mündlichen Prüfung:  
17. Dezember 2018

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>i</b>
<b>Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen</b>	<b>iv</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Herausforderungen im Verteilnetzbetrieb	1
1.2 Aktiver Verteilnetzbetrieb	3
1.3 Definition des Flexibilitätspotenzials	5
1.4 Probabilistisches Flexibilitätspotenzial unter Unsicherheiten	7
1.5 Erweitertes Flexibilitätspotenzial durch Erneuerbare-Energien-Anlagen	8
1.6 Stand der Forschung	9
1.7 Ziel und Aufbau der Arbeit	10
<b>2 Analyse der Fragestellung</b>	<b>13</b>
2.1 Netzbetrieb im Verteilnetz	13
2.2 Flexibilität von Erneuerbare-Energien-Anlagen	15
2.2.1 Netzanschlusskonzepte	15
2.2.2 Wirkleistungssteuerung	17
2.2.3 Blindleistungssteuerung	22
2.3 Unsicherheiten bei Netzkunden im Rahmen der Netzbetriebsplanung	25
2.3.1 Unsicherheiten bei Erneuerbare-Energien-Anlagen	25
2.3.2 Unsicherheiten bei Verbrauchern	33
2.3.3 Stochastische Abhängigkeiten von Prognosefehlern	36
2.4 Netzbezogene Maßnahmen in Mittel- und Niederspannungsnetzen	38
2.4.1 Stufenstellung von Transformatoren	38
2.4.2 Schaltmaßnahmen	39
2.5 Engpassmanagement im Verteilnetz	40
2.5.1 Technische Randbedingungen des Netzbetriebes	40
2.5.2 Identifikation von Engpässen	45

2.5.3 Identifikation von Maßnahmen zur Engpassbehebung	45
2.6 Erweitertes Blindleistungsmanagement	46
2.6.1 Entwicklung des Netzbetriebs in Mittel- und Niederspannungsnetzen	46
2.6.2 Zentrales Steuerungskonzept des Blindleistungsmanagements	48
2.6.3 Erweitertes Blindleistungsverhalten von Erneuerbare-Energien-Anlagen	49
<b>3 Modelle und Verfahren</b>	<b>53</b>
3.1 Modelle für Netze und Netzkunden	53
3.1.1 Modelle für Netze und Netzbetriebsmittel	53
3.1.2 Modelle für Netzkunden	55
3.1.3 Modell zum Lastfluss	58
3.2 Verfahrensüberblick	58
3.3 Generierung eines probabilistischen Netznutzungsfalls	61
3.3.1 Ziehen von Betriebsmittelausfällen	63
3.3.2 Ziehen von Verbrauchsprognosefehlern	63
3.3.3 Ziehen von Einspeiseprognosefehlern	64
3.4 Identifikation von Engpässen	68
3.5 Engpassmanagement	70
3.6 Ermittlung des technischen Flexibilitätspotenzials	71
3.6.1 Abtastverfahren	73
3.6.2 Optimierungsproblem des Abtastverfahrens	75
3.7 Statistische Auswertung des probabilistischen Flexibilitätspotenzials	76
<b>4 Exemplarische Ergebnisse</b>	<b>79</b>
4.1 Überblick über die Untersuchungen	79
4.2 Untersuchungsrahmen	80
4.3 Konvergenzverhalten der Monte-Carlo-Simulation	87
4.4 Probabilistisches Flexibilitätspotenzial	89
4.4.1 Basisrechnungen	89
4.4.2 Prognosehorizont	93
4.4.3 Betriebsmittelausfall	96
4.4.4 Oberspannungsseitige Betriebsspannung am HS/MS-Umspannwerk	96
4.5 Probabilistisches Flexibilitätspotenzial bei zunehmend zentraler Steuerung der Anlagen	98
4.5.1 Zentrale Steuerung des HS/MS-Transformators	98

4.5.2	Zentrale Steuerung aller Transformatoren	101
4.5.3	Zentrale Steuerung großer Erneuerbare-Energien-Anlagen	101
4.5.4	Zentrale Steuerung aller Erneuerbare-Energien-Anlagen	103
4.6	Probabilistisches Flexibilitätspotenzial bei erweiterter Blindleistungsbereitstellung der Erneuerbare-Energien-Anlagen	106
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>107</b>
<b>6</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>111</b>
<b>7</b>	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>121</b>
<b>8</b>	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>125</b>
<b>9</b>	<b>Studentische Arbeiten</b>	<b>127</b>
<b>10</b>	<b>Veröffentlichungen</b>	<b>129</b>