

# Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 6

Energietechnik

M.Sc. Marcel Richter,  
Duisburg

Nr. 620

Dynamische Kraftwerks-  
simulation und techno-  
ökonomische Bewertung  
von Flexibilisierungs-  
maßnahmen

**LUAT**

Lehrstuhl für Umweltverfahrens-  
technik und Anlagentechnik

# Inhaltsverzeichnis

<b>Symbolverzeichnis</b> .....	<b>VII</b>
<b>Kurzfassung</b> .....	<b>XI</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>XII</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Ausgangssituation .....	1
1.2 Ziele der Arbeit.....	3
1.3 Aufbau der Arbeit.....	4
<b>2 Energiewirtschaftliche Grundlagen</b> .....	<b>5</b>
2.1 Struktur des Strommarktes .....	5
2.1.1 Day-ahead-Handel .....	5
2.1.2 Intraday-Handel .....	6
2.1.3 Regelleistungsmärkte .....	7
2.2 Einfluss der Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien .....	9
<b>3 Kraftwerkstechnische Grundlagen</b> .....	<b>13</b>
3.1 Flexibilität von Dampfkraftwerken .....	13
3.1.1 Begriffsdefinitionen .....	13
3.1.2 Aktuelle Flexibilitätsparameter .....	16
3.2 Technische Begrenzungen der Flexibilitätsparameter.....	17
3.2.1 Mindestlast .....	17
3.2.2 Laständerungsgeschwindigkeit.....	18
3.2.3 Anfahren .....	20
3.3 Maßnahmen zur Bereitstellung von Primärregelleistung (PRL) .....	21
3.3.1 Androsselung des HD-Turbinenventils .....	22
3.3.2 Variation des Kondensatmassenstroms .....	23
3.3.3 Deaktivierung der Hochdruckvorwärmer.....	24
3.3.4 Variation der Betriebsparameter der Kohlemühlen.....	24
3.3.5 Weitere PRL-Maßnahmen .....	25
3.3.6 Kombination von PRL-Maßnahmen.....	25
3.4 Thermische Energiespeicher (TES) im Kraftwerksprozess .....	26
3.4.1 Theoretische Grundlagen zu TES .....	26
3.4.2 Realisierte TES-Anwendungen im Bereich der Stromerzeugung .....	30
3.4.3 Forschung und Entwicklung für TES im Bereich der Stromerzeugung .....	33
3.5 Referenzprozess .....	33
3.5.1 Wesentliche Daten des Basiskraftwerks.....	34
3.5.2 Aufbau des Dampferzeugers .....	35
3.5.3 Betriebskonzept und Flexibilitätsparameter .....	35
<b>4 Dynamisches Simulationsmodell</b> .....	<b>37</b>
4.1 Einführung in die Kraftwerkssimulation .....	37
4.2 Aufbau des Simulationsmodells und verwendete Software.....	39
4.3 Komponentenmodelle wesentlicher (Teil-) Systeme.....	42
4.3.1 Dampferzeuger .....	42
4.3.2 Kohlezuteilung und -aufbereitung.....	49
4.3.3 Dampfturbinen .....	53
4.3.4 Zwei-Phasen-Behälter.....	54

4.4 Leittechnik .....	58
4.4.1 Blockregelung .....	58
4.4.2 Speisewasserregelung .....	60
4.4.3 Dampftemperaturregelung .....	61
4.4.4 Umwälzregelung .....	63
4.4.5 Füllstandsregelung des Speisewasserbehälters .....	63
4.5 Validierung .....	64
<b>5 Simulationen zu ausgewählten Flexibilisierungsmaßnahmen .....</b>	<b>69</b>
5.1 1-Mühlenbetrieb .....	69
5.2 Indirektes Feuerungssystem .....	75
5.3 Integration eines Ruths-Speichers .....	82
5.3.1 Integrationskonzept .....	82
5.3.2 Betriebliche Grenzen und Leistungspotentiale .....	84
5.3.3 Auslegung .....	86
5.3.4 Leittechnische Einbindung im dynamischen Simulationsmodell .....	88
5.3.5 TES-Einsatz zur Erbringung einer Lastanpassung .....	89
5.3.6 TES-Einsatz zur Steigerung der Laständerungsgeschwindigkeit .....	94
5.3.7 TES-Einsatz während eines Referenzlastverlaufs .....	98
5.3.8 Sprungantworten .....	100
5.4 Bereitstellung von Primärregelleistung .....	105
5.4.1 Leistungs- und Kapazitätsdefizit des Kraftwerksprozesses .....	105
5.4.2 Sprungantworten klassischer PRL-Maßnahmen .....	107
5.4.3 Leistungs- und Kapazitätspotential der PRL-Maßnahmen inkl. TES .....	114
5.4.4 Koordinierte PRL-Bereitstellung .....	117
5.5 Identifizierte Flexibilisierungspotentiale .....	128
<b>6 Techno-ökonomische Bewertung ausgewählter Flexibilisierungsmaßnahmen .....</b>	<b>130</b>
6.1 Modell zur Bestimmung des Kraftwerkseinsatzes am Spotmarkt .....	130
6.1.1 Datengrundlage .....	131
6.1.2 Funktionsweise des Kraftwerkseinsatzmodells .....	134
6.1.3 Validierung des Kraftwerkseinsatzmodells .....	137
6.2 Einfluss der Mindestlast auf den Kraftwerkseinsatz .....	141
6.3 Modell zur Bestimmung des Einsatzes eines Energiespeichers .....	144
6.4 Einsatz eines technologieneutralen Energiespeichers .....	147
6.5 Kraftwerks- und Speichereinsatz zur Bewertung der Ruths-Speicher-Integration .....	150
6.6 Resultate der techno-ökonomischen Betrachtungen .....	155
<b>7 Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>157</b>
7.1 Zusammenfassung .....	157
7.2 Ausblick .....	161
<b>Anhang .....</b>	<b>162</b>
A1 Forschungsprojekte zur Flexibilisierung von Kraftwerken durch TES .....	162
A2 Komponentenmodell für Ruths-Speicher inkl. Validierung .....	162
A3 Validierung des Kraftwerksmodells mit weiteren Messreihen .....	164
A4 Sprungantworten und Potentiale weiterer PRL-Maßnahmen .....	165
A5 Ergänzende Diagramme zur koordinierten PRL-Bereitstellung .....	168
A6 Einsatz eines Energiespeichers auf dem Day-ahead-Markt .....	169
A7 Historische Auswertung zur Wirtschaftlichkeit von Energiespeichern .....	170
<b>Literatur .....</b>	<b>171</b>