

# **Demand Response**

-

# **Nichtelektrische Speicher für Elektrizitätsversorgungssysteme mit hohem Anteil erneuerbarer Energien**

## **Habilitation**

eingereicht beim  
Fachbereich Elektrotechnik der  
Universität Kassel

vorgelegt von

Prof. Dr.-Ing. Ingo Stadler

Kassel, Oktober 2005

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>Energiespeicherung in Elektroenergieversorgungssystemen</b>	<b>5</b>
1.1.1	Speicher- und Pumpspeicherkraftwerke	5
1.1.2	Elektrochemische Energiespeicher	6
1.1.2.1	Blei-Säure-Batterien	6
1.1.2.2	Weitere elektrochemische Speicher	8
1.1.3	Elektrische Speicher	10
1.1.4	Schwundgradspeicher	11
1.1.5	Druckluftspeicher	12
1.1.6	Thermische Speicher	14
<b>1.2</b>	<b>Regelung elektrischer Energieversorgungsnetze und die Möglichkeiten des Demand Response</b>	<b>15</b>
<b>1.3</b>	<b>Internationale Erfahrungen mit Demand Response</b>	<b>23</b>
1.3.1	Regelleistungsmarkt in Norwegen	24
1.3.2	Frequenzregelung in Großbritannien	25
1.3.3	Versorgungsverträge mit privaten Haushalten in Finnland	26
1.3.4	Lastmanagement von Kühllhäusern in Neuseeland	26
1.3.5	Leistungsregelung in den Vereinigten Staaten: Das GridWise Konzept	27
<b>2</b>	<b>(Nacht-) Speicherheizungen</b>	<b>29</b>
<b>2.1</b>	<b>Bauarten von Speicherheizgeräten</b>	<b>30</b>
<b>2.2</b>	<b>Betriebsweise von Nachtspeicherheizungen</b>	<b>35</b>

2.3 Dynamischer Temperaturverlauf in Wänden .....	38
2.4 Modellbildung der Speicherheizung .....	41
2.5 Betriebsverhalten von Speicherheizungen .....	45
2.6 Potentieller Beitrag der Speicherheizungen zum Demand Response in Deutschland .....	49
<b>3 Elektrische Warmwassererwärmung .....</b>	<b>55</b>
3.1 Warmwasserbedarf und Stromverbrauch für die elektrische Warmwasserbereitung in Deutschland .....	61
3.2 Potentieller Beitrag der elektrischen Warmwasserbereitung zum Demand Response in Deutschland .....	63
<b>4 Lüftungsanlagen .....</b>	<b>71</b>
4.1 Raummodell zur Ermittlung des elektrischen Speicher- potentials von mit Lüftungsanlagen belüfteten Räumen .....	73
4.2 Ermittlung des Speicherpotentials von Lüftungsanlagen .....	79
4.2.1 Speicherpotential bei Ein/Aus-Betrieb von Lüftungsanlagen .....	82
4.2.2 Speicherpotential bei drehzahlvariablem Betrieb von Lüftungsanlagen .....	85
4.2.3 Potentieller Beitrag der Lüftungsanlagen zum Demand Response in Deutschland .....	88
<b>5 Elektrisch betriebene Kühl- und Gefriergeräte .....</b>	<b>99</b>
5.1 Einfluss der Temperatur auf die Haltbarkeit von Lebensmitteln .....	103
<b>5.2 Kühl- und Gefriergeräte in privaten Haushalten .....</b>	<b>105</b>
5.2.1 Potentieller Beitrag der Kältetechnik in privaten Haushalten zum Demand Response in Deutschland .....	109
5.2.2 Vergrößerung des Speicherpotentials durch Phasenwechselmaterialien .....	116
<b>5.3 Kühl- und Gefriergeräte im Lebensmitteleinzelhandel .....</b>	<b>117</b>
5.3.1 Potentieller Beitrag der Kältetechnik im Lebensmittel- einzelhandel zum Demand Response in Deutschland .....	120

<b>6 Warmwasserheizungen .....</b>	<b>125</b>
<b>6.1 Wärmespeichervermögen im Gebäudebestand in Deutschland</b>	<b>126</b>
6.1.1 Speichervermögen beim Einsatz von Phasenwechselmaterialien .....	131
<b>6.2 Die Umwälzpumpe in Warmwasserheizungsanlagen</b>	<b>134</b>
<b>6.3 Potentieller Beitrag der Warmwasserheizungen zum Demand     Response in Deutschland .....</b>	<b>138</b>
<b>7 Erzeugung und Speicherung von Druckluft in der     Industrie .....</b>	<b>141</b>
<b>7.1 Druckluftanlagen in der Industrie .....</b>	<b>141</b>
<b>7.2 Erzeugung von Druckluft .....</b>	<b>145</b>
<b>7.3 Druckluftspeicher .....</b>	<b>148</b>
<b>7.4 Exkurs: Druckluftspeicherkraftwerke .....</b>	<b>153</b>
7.4.1 Konzepte für Druckluftspeicherkraftwerke .....	153
7.4.2 Wirkungsgraddiskussion .....	156
<b>7.5 Druckluftspeicherung in der Industrie .....</b>	<b>159</b>
<b>8 Beeinflussung des Nutzerverhaltens in privaten     Haushalten .....</b>	<b>163</b>
<b>8.1 Feldversuch mit variablem Stromtarif in Eckernförde .....</b>	<b>163</b>
<b>8.2 Potentieller Beitrag verhaltensbedingter Lastverschiebungen     in Haushalten zum Demand Response in Deutschland .....</b>	<b>166</b>
<b>9 Kraft-Wärme-Kopplung und Wärmepumpen in     Verbindung mit Wärmespeichern .....</b>	<b>171</b>
<b>9.1 Kraft-Wärme-Kopplung .....</b>	<b>171</b>
9.1.1 Konzepte zur Kraft-Wärme-Kopplung .....	172
9.1.2 Bestand und Potential der Kraft-Wärme-Kopplung in Deutschland .....	177
9.1.3 Besonderheiten der Kraft-Wärme-Kopplung in Dänemark ..	180
9.1.4 Regelleistungspotential der Kraft-Wärme-Kopplung in Deutschland .....	181
<b>9.2 Wärmepumpen .....</b>	<b>191</b>

<b>10 Ergebnisse und Zusammenfassung .....</b>	<b>195</b>
<b>10.1 Nicht berücksichtigte Potentiale für die nichtelektrische Energiespeicherung .....</b>	<b>196</b>
<b>10.2 Ergebnisse .....</b>	<b>197</b>
<b>Anhang 1: Zusammenfassende Grafiken für den Hauptteil der Arbeit .....</b>	<b>203</b>
<b>Anhang 2: Machbarkeit unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten .....</b>	<b>211</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>217</b>