

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Kurzbericht</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Einleitung</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Theoretische Betrachtungen zum Regionalen Virtuellen Kraftwerk</b>	<b>4</b>
3.1	Einführung	4
3.2	EEX-Markt	6
3.3	Regelleistungsmarkt	6
3.4	Struktur eines Regionalen Virtuellen Kraftwerks	8
3.5	Pilotprojekte	11
3.6	Befragung von Stadtwerken	12
<b>4</b>	<b>Messtechnische Untersuchungen im Labor - Grundlagenermittlung</b>	<b>15</b>
4.1	Versuchsstandbeschreibung - Thermischer Teil	15
4.1.1	Temperaturmesstechnik	16
4.1.2	Durchflussmesser	17
4.1.3	Gaszähler	17
4.1.4	Periphere Geräte	18
4.2	Versuchsstandbeschreibung - Elektrischer Teil	20
4.2.1	Pflichtenheft für den elektrischen Netzemulator	21
4.2.2	Konzepterstellung	23
4.2.3	Konzeptumsetzung	26
4.2.4	Regelungsentwurf	38
4.2.5	Softwaretechnische Umsetzung	47
4.2.6	Zusammenfassung	51
4.3	Inbetriebnahme des Versuchsstandes - Thermischer Teil	54
4.3.1	Volumenstromregler	54
4.3.2	Temperaturregler	55
4.3.3	Verhalten bei Temperatur und Volumenstromänderung	56
4.4	Inbetriebnahme des Versuchsstandes - Elektrischer Teil	59
4.4.1	Inbetriebnahme der Hardwarekomponenten	59
4.4.2	Inbetriebnahme der Softwarekomponenten	61
4.4.3	Regelung für den automatisierten Betrieb des Versuchsstands	63
4.4.4	Inbetriebnahmемessungen	67
4.5	Messtechnische Analysen	73
4.5.1	Messtechnische Analyse des WhisperGen	77
4.5.1.1	Stationäre Analysen	77
4.5.1.2	Dynamische Analysen	82
4.5.2	Messtechnische Analyse des EcoPower 1.0	85
4.5.2.1	Stationäre Analysen	85
4.5.2.2	Dynamische Analysen	89
4.5.2.3	Modellbildung	93
4.5.3	Messtechnische Analyse des Viessmann VitoTwin 300-W	95
4.5.3.1	Dynamische Analysen	95
4.5.4	Messtechnische Analyse des Kirsch microBHKW L 4.12	97
4.5.4.1	Stationäre Analysen	97
4.5.4.2	Dynamische Analysen	102

<b>5</b>	<b>Numerische Untersuchungen - Grundlagenermittlung</b>	<b>107</b>
5.1	Einführende Bemerkungen . . . . .	107
5.2	Gebäudemodellierung . . . . .	108
5.2.1	Gebäudebeschreibung . . . . .	108
5.2.2	Technische Anlagen . . . . .	118
5.3	Gebäudemonitoring . . . . .	122
5.4	Parametrierung . . . . .	126
5.4.1	Ausgewählte Simulationsergebnisse des „Idealen Heizsystems“ . . . . .	126
5.4.2	Ausgewählte Simulationsergebnisse des L-BHKW 4.12 . . . . .	127
5.4.2.1	Energetische Analysen . . . . .	127
5.4.2.2	Wärmephysiologische Analysen . . . . .	132
5.4.3	Ausgewählte Simulationsergebnisse des Eco-Power 1.0 . . . . .	135
5.5	RVK-Betriebsanalysen . . . . .	137
5.5.1	Numerische Betrachtungen mit TRNSYS-TUD . . . . .	137
5.5.2	RVK-Betrieb ohne Steuerung (Ist-Stand) . . . . .	138
5.5.3	RVK-Betrieb mit Steuerung . . . . .	141
<b>6</b>	<b>Steuerungs- und Simulationsalgorithmen von RVK - Systemen</b>	<b>156</b>
6.1	Einsatzplanungs- und Betriebsalgorithmen im linearen RVK-Modell . . . . .	156
6.1.1	Simulationsmodell . . . . .	156
6.1.2	Schnittstellen zwischen den RVK-Ebenen . . . . .	158
6.1.3	Planungsalgorithmen . . . . .	159
6.1.4	Betriebsalgorithmen . . . . .	162
6.1.5	Fazit . . . . .	164
6.2	Simulationswerkzeug RVK . . . . .	164
6.2.1	Entwicklungshintergrund . . . . .	164
6.2.2	Aufbau des Simulationswerkzeugs . . . . .	166
6.2.2.1	Gebäude . . . . .	167
6.2.2.2	Wärmeerzeuger . . . . .	169
6.2.2.3	Mischventil . . . . .	170
6.2.2.4	Photovoltaik Anlage . . . . .	170
6.2.2.5	Thermischer Speicher . . . . .	171
6.2.2.6	Kommunikationsbox . . . . .	175
6.2.2.7	RVK-Zentrale . . . . .	175
6.2.3	Ergebnisse . . . . .	176
6.2.3.1	Der unregelmäßige Betrieb . . . . .	176
6.2.3.2	Der geregelte Betrieb ( $E_{Min}, E_{Max}$ ) . . . . .	177
6.2.3.3	Der geregelte Betrieb ( $E_{Min}, P_{On}$ ) . . . . .	178
6.2.3.4	Der Zielleistungsbetrieb ( $P_{el,Soll}$ ) . . . . .	178
6.2.3.5	Erkenntnisse der Untersuchungen . . . . .	180
6.2.4	Fazit . . . . .	181
<b>7</b>	<b>Analyse von Betriebsszenarien</b>	<b>182</b>
7.1	Szenario eines RVK . . . . .	182
7.1.1	Elektrisches Netz . . . . .	182
7.1.2	$\mu$ KWK-Anlagen . . . . .	183
7.1.3	RVK-Struktur und Kennzahlen . . . . .	184
7.2	Speicherpotential des RVK . . . . .	184
7.2.1	Berechnungsmethode . . . . .	185
7.2.2	Ergebnisse . . . . .	186

7.3	Energiehandel . . . . .	188
7.4	Bereitstellung von Regelreserve . . . . .	190
7.4.1	Anforderungen an die Regelreserve . . . . .	190
7.4.2	Umsetzung im RVK . . . . .	191
7.5	Berücksichtigung von Netzengpässen . . . . .	192
7.6	Spitzenlastabsenkung . . . . .	194
7.6.1	Randbedingungen für die Simulation . . . . .	194
7.6.2	Ergebnisse . . . . .	196
7.6.3	Zusammenfassung der Ergebnisse . . . . .	202
7.7	Koordinierung der Einspeisung von PV und $\mu$ KWK-Anlagen . . . . .	202
7.7.1	Berechnungsmodelle . . . . .	203
7.7.2	Berechnungsmethode . . . . .	203
7.7.3	Ergebnisse . . . . .	206
7.7.4	Fazit . . . . .	208
<b>8</b>	<b>Fazit</b>	<b>209</b>
	<b>Literatur</b>	<b>211</b>
<b>A</b>	<b>Fehlerrechnung</b>	<b>216</b>
A.1	Messunsicherheit . . . . .	216
A.1.1	Kalorische Bilanzierung . . . . .	216
A.1.2	Brennstoffleistung . . . . .	216
A.1.3	Elektrische Bilanzierung . . . . .	218
A.1.4	Wirkungsgrade . . . . .	219
A.2	maximale Fehler . . . . .	220
<b>B</b>	<b>Simulationsergebnisse</b>	<b>224</b>
B.1	Basisvarianten mit $P_{el} = 2 \text{ kW}$ . . . . .	224
<b>C</b>	<b>Identifikation der Regelstrecken für elektrischen Versuchsstand</b>	<b>226</b>
C.1	Sprungantworten . . . . .	226
C.2	Regelstrecken . . . . .	226
C.3	Auswertung . . . . .	228
<b>D</b>	<b>Analysen zum Selektivschutz in Niederspannungsnetzen</b>	<b>229</b>
D.1	Einfluss dezentraler Erzeuger auf die Netzschutztechnik . . . . .	229
D.2	Funktion des Netz- und Anlagenschutzes zur Vermeidung der Inselnetzbildung . . . . .	230
<b>E</b>	<b>Integration von <math>\mu</math>KWK-Anlagen im Niederspannungsnetze</b>	<b>235</b>
E.1	Ziel . . . . .	235
E.2	Aufgabenbeschreibung . . . . .	235
E.2.1	Ausgangssituation . . . . .	235
E.2.2	Annahmen . . . . .	235
E.2.3	Kriterien für die Niederspannungsnetzplanung . . . . .	236
E.2.3.1	Spannungshaltung . . . . .	236
E.2.3.2	Strombelastbarkeit . . . . .	236
E.2.3.3	Übersicht der Kriterien für Netzplanung und Betrieb . . . . .	236
E.3	Beispielnetze und Szenarien . . . . .	237
E.3.1	Beschreibung von Niederspannungsnetzen . . . . .	237
E.3.2	Beispielnetze – Netzklassen . . . . .	237

E.4	$\mu$ KWK Szenarien . . . . .	238
E.5	Berechnung der Beispielnetze . . . . .	239
E.5.1	Vorgehensweise Berechnungen . . . . .	239
E.5.2	Maximale $\mu$ KWK-Anlagen-Ausbau ohne Netzerweiterung . . . . .	241
<b>F</b>	<b>Netzparameter</b>	<b>242</b>
F.1	Mittelspannungsnetz . . . . .	242
F.2	Niederspannungsnetze . . . . .	243
<b>G</b>	<b>Veröffentlichungen</b>	<b>246</b>
<b>H</b>	<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>248</b>