

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzbericht	1
2	Einleitung	2
3	Theoretische Betrachtungen zum Regionalen Virtuellen Kraftwerk	4
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
4	Messtechnische Untersuchungen im Labor - Grundlagenermittlung	15
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

5	Numerische Untersuchungen - Grundlagenermittlung	107
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
6	Steuerungs- und Simulationsalgorithmen von RVK - Systemen	156
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
7	Analyse von Betriebsszenarien	182
7.1	Szenario eines RVK	182
7.1.1	Elektrisches Netz	182
7.1.2	μ 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 μ KWK-Anlagen	202
7.7.1	Berechnungsmodelle	203
7.7.2	Berechnungsmethode	203
7.7.3	Ergebnisse	206
7.7.4	Fazit	208
8	Fazit	209
	Literatur	211
A	Fehlerrechnung	216
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	Simulationsergebnisse	224
B.1	Basisvarianten mit $P_{el} = 2 \text{ kW}$	224
C	Identifikation der Regelstrecken für elektrischen Versuchsstand	226
C.1	Sprungantworten	226
C.2	Regelstrecken	226
C.3	Auswertung	228
D	Analysen zum Selektivschutz in Niederspannungsnetzen	229
D.1	Einfluss dezentraler Erzeuger auf die Netzschutztechnik	229
D.2	Funktion des Netz- und Anlagenschutzes zur Vermeidung der Inselnetzbildung	230
E	Integration von μKWK-Anlagen im Niederspannungsnetze	235
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	μ KWK Szenarien	238
E.5	Berechnung der Beispielnetze	239
E.5.1	Vorgehensweise Berechnungen	239
E.5.2	Maximale μ KWK-Anlagen-Ausbau ohne Netzerweiterung	241
F	Netzparameter	242
F.1	Mittelspannungsnetz	242
F.2	Niederspannungsnetze	243
G	Veröffentlichungen	246
H	Symbolverzeichnis	248