

Markus Balmer, Dominik Möst, Daniel Spreng et al.

# Schweizer Wasserkraftwerke im Wettbewerb

Eine Analyse im Rahmen des europäischen  
Elektrizitätsversorgungssystems

Institut für Wirtschaft und Ökologie



Universität St.Gallen



Hochschulverlag AG  
an der ETH Zürich

cepe

Centre for Energy Policy and Economics  
Swiss Federal Institutes of Technology

# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	v
Abbildungsverzeichnis	xi
Tabellenverzeichnis	xv
Abkürzungen für PERSEUS-HYDRO-Modellbescrieb	xvii
Vorwort	1
<b>1 Einleitung</b>	<b>5</b>
<b>2 Ausgangslage</b>	<b>9</b>
2.1 Chancen und Risiken der Strommarktöffnung für die schweizerischen Wasserkraftwerke – eine Auflistung .....	10
2.2 Investitionstätigkeit in der schweizerischen Wasserkraft-Branche von 1970 – 2003. ....	11
2.3 Projektaufbau und Vorgehen. ....	13
2.3.1 Analyse, Erfassung und Abbildung der schweizerischen Wasserkraftwerke. ....	13
2.3.2 Modellaufbau PERSEUS-HYDRO .....	13
2.3.3 Modellgestützte Analyse verschiedener Szenarien. ....	14
2.3.4 Erneuerungs- und Ausbauprojekte. ....	14
<b>3 Modellbeschreibung PERSEUS-HYDRO</b>	<b>17</b>
3.1 Einleitung .....	17
3.1.1 Fundamental-analytische Modelle. ....	19
3.1.2 Finanzmathematische Modelle .....	19
3.1.3 Spieltheoretische Modelle .....	20
3.1.4 Statistische und ökonomische Modelle .....	21

---

3.2	Die Modellfamilie PERSEUS .....	21
3.3	Kurzdarstellung des entwickelten Modellansatzes .....	23
3.4	Mathematische Beschreibung des Modells .....	25
3.4.1	Modellelemente, Parameter und Variablen .....	25
3.4.2	Zielfunktion .....	27
3.4.3	Nebenbedingungen .....	28
3.4.3.1	Deckung der Nachfrage nach Energie- und Stoffflüssen. ....	29
3.4.3.2	Energie- und Stoffflussbilanzgleichungen. ....	29
3.4.3.3	Beschränkung von Energie- und Stoffflüssen .....	30
3.4.3.4	Kapazitätsrestriktionen .....	31
3.4.3.5	Beschränkung der Prozessnutzung .....	31
3.4.3.6	Abbildung von Reservekapazität .....	33
3.4.3.7	Abbildung des politisch motivierten Ausbaus erneuerbarer Energien .....	36
3.4.3.8	Abbildung von Wasserkraftwerken .....	36
3.4.3.9	Abbildung und Kapazität von Speicherseen. ....	38
3.4.3.10	Anlagenfahrweise von Pumpspeicherzentralen .....	38
3.4.3.11	Konzessionsverlängerungen und Restwassermengen. ....	39
3.5	Systemgrenzkosten der Stromversorgung .....	39
3.5.1	Relevante Charakteristiken der Kraftwerktypen mit Einfluss auf die Preisbildung .....	40
3.5.1.1	Kernkraftwerke .....	40
3.5.1.2	Laufwasserkraftwerke .....	40
3.5.1.3	Speicherkraftwerke .....	40
3.5.1.4	Pumpspeicherzentralen .....	41
3.5.1.5	Braunkohle-, Steinkohle und Gaskraftwerke .....	41

<b>4</b>	<b>Verwendete Datenbasis und Modellaufbau</b>	<b>43</b>
4.1	Datenbasis Schweiz	43
4.1.1	Beschreibung der Stichprobe	44
4.1.2	Technische Daten für die Abbildung von Kraftwerken	45
4.1.2.1	Zuflüsse zu Speicherseen und Flusskraftwerken	46
4.1.2.2	Energieinhalte der Speicherseen und Ausgleichsbecken	47
4.1.2.3	Installierte Kraftwerksleistungen und mittlere Produktionsmöglichkeiten	49
4.1.2.4	Fallhöhen und Energieflüsse in Kaskadenkraftwerken	50
4.1.2.5	Abbildung der nicht in der Stichprobe enthaltenen Wasserkraftwerke	53
4.1.2.6	Kernkraftwerke	54
4.1.3	Ökonomische Daten zum Kraftwerkpark	55
4.1.3.1	Ökonomische Daten	55
4.1.3.2	Restwassermengen	57
4.1.3.3	Typologisierung der Wasserkraftunternehmen	57
4.1.3.4	Ökonomische Daten der schweizerischen Kernkraftwerke	58
4.1.3.5	Ausbaumöglichkeiten und Erneuerungsbedarf inklusive zugehöriger Investitionskosten	59
4.2	Modellaufbau	61
4.2.1	Abbildungsbereich	61
4.2.2	Betrachtungshorizont und zeitliche Differenzierung	63
4.2.3	Abbildung des Kraftwerksparks in der Schweiz	64
4.2.3.1	Abbildung von Wasserkraftwerken, Wasserflüssen und Speicherbecken	66
4.2.3.2	Konzessionsablauf und Konzessionsverlängerungen	69
4.2.3.3	Technologiedaten der Neubauoptionen	70
4.2.3.4	Ausbauprojekte der Wasserkraft	71

4.2.4	Abbildung der Energiesysteme in den angrenzenden Regionen . . . . .	71
4.2.5	Brennstoffpreise . . . . .	74
4.2.6	Abbildung der Übertragungsnetze und Parametrisierung . . . . .	75
4.2.7	Stromnachfrageentwicklung und Laststruktur . . . . .	78
4.2.8	Regenerative Energieträger . . . . .	79
4.2.9	Emissionsfaktoren und Zertifikatspreise . . . . .	82
4.2.10	Zinssatz . . . . .	85
4.3	Kritische Reflexion des gewählten Modellansatzes . . . . .	86
4.3.1	Marktverständnis und Akteursverhalten . . . . .	86
4.3.2	Preisinformation auf Basis der Systemausgaben . . . . .	87
4.3.3	Investitionsentscheidungen im Modell . . . . .	88
<b>5</b>	<b>Modellgestützte Bewertung des schweizerischen Kraftwerkparks</b>	<b>91</b>
5.1	Definition des Referenzszenarios . . . . .	91
5.2	Entwicklung des Schweizer Energiesystems im europäischen Kontext . . . . .	93
5.2.1	Struktur der Stromerzeugung und des Anlagenparks . . . . .	93
5.2.2	Kraftwerkseinsatz nach Energieträgern und Lastbereichen . . . . .	96
5.3	Entwicklung des Energiesektors der angrenzenden Regionen . . . . .	101
5.3.1	Struktur der Stromerzeugung und des Anlagenparks . . . . .	101
5.3.2	Interregionaler Stromaustausch . . . . .	106
5.3.3	Grenzkosten der Stromversorgung . . . . .	110
5.4	Alternative Szenariodefinitionen . . . . .	113
5.5	Einfluss des Gaspreises . . . . .	116
5.6	Einfluss der CO <sub>2</sub> -Zertifikatspreise . . . . .	119
5.7	Einfluss der Kernkraftnutzung . . . . .	125

5.8	Einfluss der Übertragungskapazitäten . . . . .	128
5.9	Einfluss der Konzessionsverlängerungen . . . . .	130
5.10	Einfluss der Nachfrageentwicklung . . . . .	130
5.11	Einfluss der Windkraftentwicklung . . . . .	133
5.12	Einfluss der Regelenergie . . . . .	134
<b>6</b>	<b>Erneuerungs- und Ausbauprojekte</b>	<b>139</b>
6.1	Beschreibung der Investitionsprojekte . . . . .	140
6.2	Abbildungs- und Bewertungsmethodik . . . . .	143
6.3	Modellergebnisse PERSEUS-HYDRO . . . . .	145
6.4	Modellbeschreibung DFCE . . . . .	147
6.4.1	Beurteilung der Ausbauprojekte . . . . .	148
6.4.2	Modelloptimierung für das einfache DFCE-Modell . . . . .	151
6.4.2.1	Bestimmung der Lastperioden . . . . .	151
6.4.2.2	Bestimmung der relevanten Preise . . . . .	152
6.4.2.3	Energiekosten . . . . .	153
6.4.3	Modelloptimierung für das DFCE-Modell mit ertragsseitigem Real-Optionen-Ansatz . . . . .	153
6.5	Ergebnisse für das einfache DFCE-Modell . . . . .	158
6.5.1	Referenzszenario und Sensitivitäten . . . . .	158
6.5.2	Alternativszenarien . . . . .	162
6.6	Ergebnisse für das DFCE-Modell mit ertragsseitigem Real-Optionen- Ansatz . . . . .	171
6.7	Diskussion der Modell-Resultate . . . . .	174
6.7.1	Unterschiedliche Auslastung von Turbinen und Pumpen . . . . .	176
6.7.2	Unterschiedliche Weiterverwendung der Preise aus dem PERSEUS-HYDRO-Modell . . . . .	178

6.7.2.1	Preise im einfachen DFCF-Modell .....	178
6.7.2.2	Preise im DFCF-Modell mit ertragsseitigem Real-Optionen-Ansatz .....	178
6.7.3	Zusammenfassung.....	183
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>187</b>
<b>8</b>	<b>Literatur</b>	<b>197</b>