

# Kraftwerke im Klimawandel – Auswirkungen auf die Erzeugung von Elektrizität

Michael Wanek, Matthias Theissing, Martina Zisler

FH JOANNEUM GmbH Studiengang Energie-, Verkehrs-, und Umweltmanagement, Werk-VI-Str. 46 / 8605 Kapfenberg, +43 3862 33600 8366., Fax.: -8381, michael.wanek@fh-joanneum.at, www.fh-joanneum.at/evu

**Kurzfassung:** Die Elektrizitätserzeugung im öffentlichen Netz in Österreich erfolgt in einem Hydro-Thermischen-Kraftwerksverbund, einem integrierten Zusammenspiel von Wasserkraftnutzung und thermischen Kraftwerken. Erfüllten die thermischen Kraftwerke ursprünglich die Funktion eines Ausgleichs des durch die niedrige Wasserführung bedingten Erzeugungsdefizits der Wasserkraftwerke (Laufkraftwerke) im Winter, so kommt ihnen zunehmend eine ganzjährige Bedeutung im Erzeugungsmix zu. Der Klimawandel manifestiert sich in unseren Breiten primär durch einen Anstieg der Umgebungstemperaturen und einer Verschiebung der Niederschlagsereignisse, wodurch es zu einer Veränderung in der Wasserführung der Gewässer kommt. Es sind somit sowohl für die Wasserkraftnutzung, als auch für die thermischen Kraftwerke geänderte Randbedingungen zu erwarten, die eine direkte Auswirkung auf die elektrische Erzeugung haben. Diese Klimaauswirkungen sind jeweils für sich, und teilweise nur qualitativ bekannt. Es fehlte jedoch eine einheitliche, technologieübergreifende Datenbasis, mit der auch die Wechselwirkungseffekte in einem hydro-thermischen Kraftwerksverbund simuliert werden können. Im Zuge dieses Projekts wurde eine solche Datenbasis geschaffen und ein Simulationsmodell erstellt, um damit die Auswirkungen veränderter Umgebungsbedingungen auf den Kraftwerksbetrieb simulieren und quantitativ darstellen zu können.

**Keywords:** Hydro-thermische Kraftwerksverbund, Klimawandel, Erzeugungsmix,

## 1 Einleitung

### 1.1 Ausgangssituation

Der Parallelbetrieb von Wasserkraftwerken (Laufkraftwerken) und thermischen Anlagen ist bereits Realität. In der Zukunft ist darüber hinaus noch mit einer Ausweitung des Betriebs der thermischen Kraftwerke in den Sommermonaten zu rechnen, da der vermehrte Kühlbedarf zu einem höheren Verbrauch an elektrischer Energie für Klimatisierungsanlagen führen wird. Der angesprochene Parallelbetrieb der Kraftwerksketten führt zu einer gegenseitigen Beeinflussung der unterschiedlichen Technologien, welche sich zukünftig auf veränderte Rahmenbedingungen einstellen werden müssen.

In unseren Breiten manifestiert sich der Klimawandel primär durch einen Anstieg der Umgebungstemperaturen und einer Verschiebung der Niederschlagsereignisse, wodurch es

zu einer Veränderung in der Wasserführung der Gewässer kommt. Generell gibt es dabei eine Tendenz hin zu extremen Situationen. Es sind somit sowohl für die Wasserkraftnutzung, als auch für die thermischen Kraftwerke geänderte Randbedingungen zu erwarten, die eine direkte Auswirkung auf die elektrische Erzeugung haben.

Diese Klimaauswirkungen auf die verschiedenen Kraftwerkstechnologien sind jeweils für sich, und teilweise nur qualitativ bekannt. Es fehlt jedoch eine einheitliche, technologieübergreifende Datenbasis, mit der auch die Wechselwirkungseffekte in einem hydrothermischen Kraftwerksverbund simuliert werden können.

## **1.2 Zielsetzung**

Im Zuge des Forschungsprojekt solle eine konsistenten Datenbasis erarbeiten werden, die die Auswirkungen des Klimawandels auf die Kraftwerksinfrastruktur und auch die Wechselwirkung zwischen Wasserkraftnutzung und thermischer Elektrizitätserzeugung quantitativ und qualitativ abbildet, und für eine Simulation zugänglich ist. Im Zuge einer Komponentenerstellung und anschließenden Simulation, sollen Szenarien geänderter klimatischer Randbedingungen und eines geänderten Verbraucherverhaltens simuliert werden.

In derartigen Simulationen können kritische Punkte in der Kraftwerksinfrastruktur identifiziert werden. Bisher erfolgte die Bewertung der Erzeugungssicherheit primär aus dem Gesichtspunkt der Kapazitäten der Übertragungsnetzwerke. In Zusammenhang mit dem Klimawandel ergibt sich als zusätzliche Komponente die Beeinflussung des Kraftwerksbetriebs (= Erzeugerseite) durch Umgebungseffekte. Mittels Simulationen kann auch eine mögliche, verbrauchsseitig induzierte Verschiebung des Kraftwerkseinsatzes (Stichwort: Erhöhung der Kühlgradtage und verstärkter Einsatz von Klimageräten) abgebildet werden. Nach der Festlegung von kritischen Punkten kann in einem weiteren Analyseschritt identifiziert werden, an welchen Stellen Gegenmaßnahmen gegen die Mindererzeugung der Kraftwerke ergriffen werden können (z. B. nachträglicher Einbau von Einrichtungen zur Ablaufkühlung des Kühlwassers vor Einleitung in den Vorfluter). Hierfür kann auf die im Rahmen des Projektes gesammelten Daten über die technologischen Möglichkeiten zur Minderung der Umgebungseinflüsse für die verschiedenen Kraftwerkstechnologien zugegriffen werden.

Das Projekt schafft eine gemeinsame, konsistente Datenbasis, mit der eine integrierte Simulation und Bewertung des Betriebs eines hydro-thermischen Kraftwerksverbundes unter geänderten klimatischen Rahmenbedingungen möglich ist. In diesem Zusammenhang sind sowohl Aspekte der direkten physikalischen Interdependenz zwischen den Technologien der Wasserkraftnutzung und der thermischen Kraftwerke (Stichwort: Aufbringung und Einleitung von Kühlwasser), als auch eine Rückkopplung des geänderten Verbrauchs- und Aufbringungsprofils zu berücksichtigen.

## 2 Ergebnisse

### 2.1 Klimateffekte

In den letzten 100 Jahren ist die globale Mitteltemperatur um etwa 0,7 [K] angestiegen, wobei sich der Trend etwa seit den 1970er Jahren immer mehr verstärkt. Der Temperaturanstieg verläuft global jedoch nicht gleichmäßig. Über den Kontinenten ist die Erwärmung stärker als über den Ozeanen [IPCC, 2007]. Insbesondere im Alpenraum und damit auch in Österreich wurde eine deutlich stärkere Temperaturzunahme von rund 1,8 [K] seit Ende des 19. Jahrhunderts festgestellt. Auch bei extremen Wetterereignissen wurden Änderungen von Intensität und Häufigkeit registriert. Aufgrund des seltenen Auftretens von Extremereignissen können jedoch keine wissenschaftlich gesicherten Aussagen zu einer tatsächlichen Zunahme von Extremereignissen gemacht werden [Kromp-Kolb und Formayer, 2005].

- Lufttemperatur:

Bezüglich der Entwicklung der mittleren Temperaturen im Alpenraum zeigen die Projekte PRUDENCE (Prediction of Regional Scenarios and Uncertainties for Defining European Climate Change Risks and Effects) und reclip:more (research for climate protection – model run evaluation) vergleichbare Ergebnisse. Für den Alpenraum werden Anstiege der mittleren saisonalen Temperaturen von +3,5 [K] im Winter<sup>1</sup>, +3,3 [K] im Frühling, +5,0 [K] im Sommer und +4,2 [K] im Herbst bis zum Zeitraum 2071-2100, verglichen mit 1961-1990, erwartet [Christensen und Christensen, 2007].

- Niederschlag:

Die Ergebnisse des MM5 Szenarios des reclip:more Projektes zeigen saisonal und regional unterschiedliche Trends für den mittleren Niederschlag. Während im Winter und zum Teil im Frühling eine regional unterschiedliche Zunahme der mittleren Niederschlagssummen um 5 bis 30 [%] von 1981-90 bis 2041-50 errechnet wurde, ist im Sommer und vor allem im Herbst eine großräumige Abnahme der mittleren Niederschläge um bis zu 35 [%] möglich [Loibl et al., 2007]. Im Mittel ist mit einer Zunahme der Starkregenereignisse von 1 bis 2 Ereignissen pro Jahr zu rechnen, entlang der Alpennordseite um 2-3 Ereignisse.

Aufgrund der steigenden Mitteltemperaturen sind auch Auswirkungen auf den Niederschlag in Form von Schnee zu erwarten. Der Rückgang beträgt durchschnittlich 50 Prozent. Daraus ergibt sich, dass die im Modell ermittelten höheren Niederschlagsmengen im Winter vermehrt als Regen anstatt Schnee fallen [ARC, 2007].

- Abflussänderung bei Fließgewässern:

Die Auswirkungen auf die Wasserführung von Fließgewässern sind von den jeweiligen Abflussregimen abhängig. Dabei sind Pauschalaussagen über zukünftige Entwicklungen

---

<sup>1</sup> Als Winter gelten hier die Monate Dezember, Jänner und Februar, als Frühling März, April und Mai, als Sommer Juni, Juli und August, als Herbst September, Oktober, November.

schwierig. Für genauere Aussagen über ein bestimmtes Gewässer muss dieses einzeln beurteilt werden.

- Entwicklung der Heiz- und Kühlgradtage:

Die Studien von Adnot et al. [2003] und Dalin et al. [2005] über die Entwicklung des Raumwärme- und Klimatisierungsbedarfs in Europa zeigen, dass Aufgrund der steigenden Lufttemperaturen eine Abnahme des Energiebedarfs für Raumwärme zu erwarten ist und der Klimatisierungsbedarf für Wohn- und Dienstleistungsgebäude in allen europäischen Ländern steigt. In Österreich werden die Heizgradtage im Szenario 2041-2050 gegenüber dem Basiszeitraum 1981-1990 je nach Region um 15 bis 23 [%] abnehmen. Die Anzahl der Kühlgradtage nimmt im Szenario im Mittel für ganz Österreich um 147 [%] zu [Pretenthaler et al., 2007].

## **2.2 Kraftwerkstechnologie**

Im Zuge des Projekts wurden die verschiedenen Kraftwerkstechnologien in Hinblick auf deren Abhängigkeit von Umgebungsparametern untersucht. Im Folgenden wird daher auf die verschiedenen Technologien eingegangen.

### **2.2.1 Klimaänderungen und Auswirkungen auf den Dampfkraftprozess**

Der Klimawandel in unseren Breiten manifestiert sich primär durch den Anstieg der mittleren Umgebungstemperatur, wobei der Anstieg der mittleren Gewässertemperatur mit diesem korreliert. Ebenso kommt es durch die Verschiebung der Niederschlagsereignisse zu einer Veränderung der Wasserführung der Gewässer. Die geänderten Rahmenbedingungen haben direkte Auswirkungen auf die Erzeugung elektrischer Energie in Dampfkraftwerken, besonders in Hinblick auf die Abwärmeabfuhr. Die freiwerdende Kondensationswärme überträgt der Kondensator auf ein geeignetes Kühlmedium (Wasser, Luft). Die Kühlwassertemperatur, – menge und die Temperaturdifferenz beim Wärmeübergang bestimmen den erreichbaren Enddruck im Kondensator. Je nach Kühlverfahren werden Kondensatoren mit Betriebsdrücken von 0,02 bis 0,2 [bar] realisiert. Der Kondensatordruck hat einen starken Einfluss auf den erreichbaren Kraftwerkswirkungsgrad und die elektrische Leistung. Liegt der Wirkungsgrad bei einem Kondensatordruck von 0,04 [bar] noch bei 40 [%], so sinkt er bei einem Druck von 0,2 bar bereits auf 34 [%] ab. [Kugler und Philippen, 1993]

- **Möglichkeiten zur Reduktion der Einflüsse auf den DKW-Prozess**

Um den Einfluss erhöhter Kühlwassertemperaturen bei der Frischwasserkühlung zu reduzieren, können zusätzliche Kühltürme installiert werden. Damit kann zum Beispiel eine Abschaltung eines Kraftwerkblocks bei zu hoher Ablauftemperatur des Kühlwassers verhindert werden.

## 2.2.2 Klimaänderungen und Auswirkungen auf den Gasturbinenprozess

Im Fall des einfachen, idealen Gasturbinenprozesses hängt der thermische Wirkungsgrad alleine vom Druckverhältnis des Prozesses und den Isentropenexponenten ab. In der Praxis ist der reale Prozess mit Verlusten behaftet. Um eine vergleichbare Datengrundlage zu schaffen, beziehen sich die Leistungsdaten von Gasturbinen auf einen genormten Bezugspunkt der nach ISO-conditions mit 15 [°C] Umgebungstemperatur, 1013 [mbar] Luftdruck und 60 [% r.F.] relativen Feuchte der Luft, festgelegt ist. Abweichungen dieser Parameter beeinflussen den Gasturbinenprozess erheblich.

- Umgebungstemperatur

Der Kompressor saugt bei einer konstanten Drehzahl einen konstanten Volumenstrom an. Bei veränderlicher Umgebungstemperatur wird nun ein unterschiedlicher Massenstrom angesaugt, da die Dichte der Luft bei höherer Umgebungstemperatur niedriger ist. Daraus folgt, dass bei konstant angesaugtem Volumen und Druck, der Massenstrom bei höherer Umgebungstemperatur sinkt. Dementsprechend sinkt auch die Leistung, wohingegen die thermodynamischen Parameter unverändert bleiben.

- Umgebungsdruck und Luftfeuchtigkeit

Analog zur Umgebungstemperatur hat Luft mit niedrigerem Druck eine geringere Dichte. Dadurch sinkt die Gasturbinenleistung mit sinkendem Umgebungsdruck. Feuchte Luft, deren Dichte geringer ist als die trockener, beeinflusst sowohl Leistung, als auch den Wirkungsgrad der Gasturbine. Der Dichteverlust durch Feuchtigkeitszunahme der Luft ist geringer als der Effekt der Temperaturzunahme.

- **Möglichkeiten zur Reduktion der Einflüsse auf den GT-Prozess**

Um die Temperatur der angesaugten Luft zu verringern, können unterschiedliche Kühleinrichtungen in den Ansaugkanal eingebaut werden. Am technisch einfachsten ist hierbei die Kühlung durch Verdunstung von Wasser. Der Luft wird die zur Verdunstung nötige Verdampfungswärme entzogen.

## 2.2.3 Einfluss des Klimawandels auf den Kombi-Prozess (GuD)

Die bei den einzelnen Prozessen bereits beschriebenen Einflussparameter können analog auf den Gesamtprozess umgelegt werden. Die Leistungsverringerung an der Dampfturbine wird jedoch größer als im Dampfturbinenprozess alleine, da neben dem Verlust im Kondensator durch steigende Kühlwassertemperaturen auch die Dampfmasse direkt mit den Abgasparametern der Gasturbine zusammenhängt.

### 2.2.4 Klimaänderungen und Auswirkungen auf die Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)

Der KWK-Prozess selbst wird von den durch den Klimawandel hervorgerufenen Umwelteinflüssen nur im Bereich der Stromlieferung beeinträchtigt. Die ausgekoppelte Nutzwärme erfährt weder bei Gegendruckturbinen noch bei Entnahme-Kondensationsturbinen einen Einfluss, da diese immer vom Gegen- und Druckniveau bzw. der Menge des entnommenen Dampfs abhängt. Eine Ausnahme stellt die KWK bei Kombikraftwerken dar. Wie schon erwähnt beeinflusst hier die Gasturbine die Dampfproduktion im Abhitzeessel erheblich, was wiederum einen Einfluss auf die Entnahmedampf bzw. Stromproduktion hat.

In der nächsten Tabelle sind nochmals die wichtigsten Einflussgrößen und Beeinflussungsmöglichkeiten der unterschiedlichen thermischen Kraftwerksprozesse übersichtlich dargestellt.

Tabelle 1: Einflussmatrix – Thermische Kraftwerke

		GT (Motor)	DT	GuD	Rechtliche Rahmenbedingungen
Lufttemperatur	Effekt	groß	0	groß direkt GT und indirekt DT → Rauchgas- und Dampfmenge	nicht beeinflussbar
	Gegenmaßnahmen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verdunstungskühler</li> <li>• Oberflächenwärmetauscher</li> <li>• Inlet Air Fogging</li> <li>• Ab- oder Adsorptionskühler</li> </ul>		siehe links	
Kühlwassertemperatur	Effekt	0	groß Anstieg des Kondensatordrucks	mittel	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gesetzlich vorgeschriebene Aufwärmspanne</li> <li>• Entnahmegrenzen Kühlwassermenge</li> </ul>
	Gegenmaßnahmen		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ablaufkühlturm</li> <li>• Zusätzlicher Kühlturm im Kühlkreislauf</li> </ul>	siehe links	

### 2.2.5 Klimaänderungen und Auswirkungen auf die Wasserkraft

Ebenso wie die Dampfkraftwerke, wurden die Wasserkraftwerke in dem Simulationsmodell abgebildet. Der durchflussabhängige Turbinenwirkungsgrad ist dem Modell in Kennlinienform hinterlegt. In Abhängigkeit vom Turbinentyp wurden hierzu Referenzkennlinien für den relativen Wirkungsgrad aus einem Abgleich von Anlagen- und Literaturdaten (vgl. [Bohl, 1999]; [Menny, 2000]) gebildet.

- Wasserführung

Die Erzeugung in Wasserkraftwerken ist in erster Linie von der Wasserführung des genutzten Gewässers abhängig. Wie bereits ausgeführt, unterliegen die Szenarien der Klimamodelle für den Niederschlag großen Unsicherheiten. Die Prognose der Erzeugung von Wasserkraftwerken im Klimawandelszenario ist aufgrund der Abhängigkeit von den Abflussverhältnissen, welche neben dem Niederschlag von weiteren Faktoren beeinflusst werden, somit schwierig. Um die Auswirkungen der Klimaänderung dennoch abschätzen zu können, wurde ein historischer Zeitraum gewählt, in dem die Niederschlags- und Temperaturverhältnisse etwa jenen Werten entsprachen, wie sie in der Klimamodellierung des reclip:more Projektes im Szenario prognostiziert werden. Dabei wurde das Jahr 2001 identifiziert. In der Modellrechnung mit Daten des Jahres 2001 wurde eine negative Abweichung der Jahresarbeit zweier betrachteten Wasser-Kraftwerke von ca. 14 [%] vom Regelarbeitsvermögen ermittelt.

## 2.3 Simulation

### 2.3.1 Softwaremäßige Realisierung

Um die Anwendbarkeit und Signifikanz der erarbeiteten Daten und Kennlinien zu demonstrieren, wurden diese für die Verwendung in einem Simulationstool aufbereitet. Mittels dieses Tools konnten die Komponentenmodelle unterteilt nach Wasser- und Thermischen Kraftwerke aufgebaut werden. Dabei wurden die Kennlinien und Kennfelder so abgebildet, dass das Modell in der Lage ist, die Umgebungseinflüsse zu verarbeiten und deren Relevanz auf den Gesamtprozess darzustellen.

Die Modellierung der einzelnen Komponenten wurde auf Basis des Simulationssoftwarepakets IPSEpro realisiert. Durch das große Potential des Tools können auch komplexe, aus vielen Teilen bestehende Gesamtsysteme in relativ kurzer Zeit berechnet und gelöst werden. Durch die Erweiterung IPSEpro-MDK (Model Development Kit) wird zudem die freie Programmierung noch nicht vorhandener Anlagenkomponenten möglich, die in weiterer Folge dann in IPSEpro-PSE (Process Simulation Environment) direkt zur Auswahl stehen und zu einem Gesamtsystem zusammengefügt werden können. Eine leistungsfähige Schnittstelle zu MS-Excel ermöglicht einen einfachen Datentransfer zu anderen Tools (z.B. weitere Programme zur Datenanalyse). [SimTech, 2010]

### 2.3.2 Simulation thermischer Kraftwerke

Um die Auswirkungen veränderter Umgebungsbedingungen auf den thermischen Kraftwerkprozess darzustellen, wurden verschiedene Simulationen durchgeführt. Die nächste Abbildung soll die Ergebnisse für den Betrieb eines Dampfkraftwerks mit Kraftwärmekopplung darstellen.

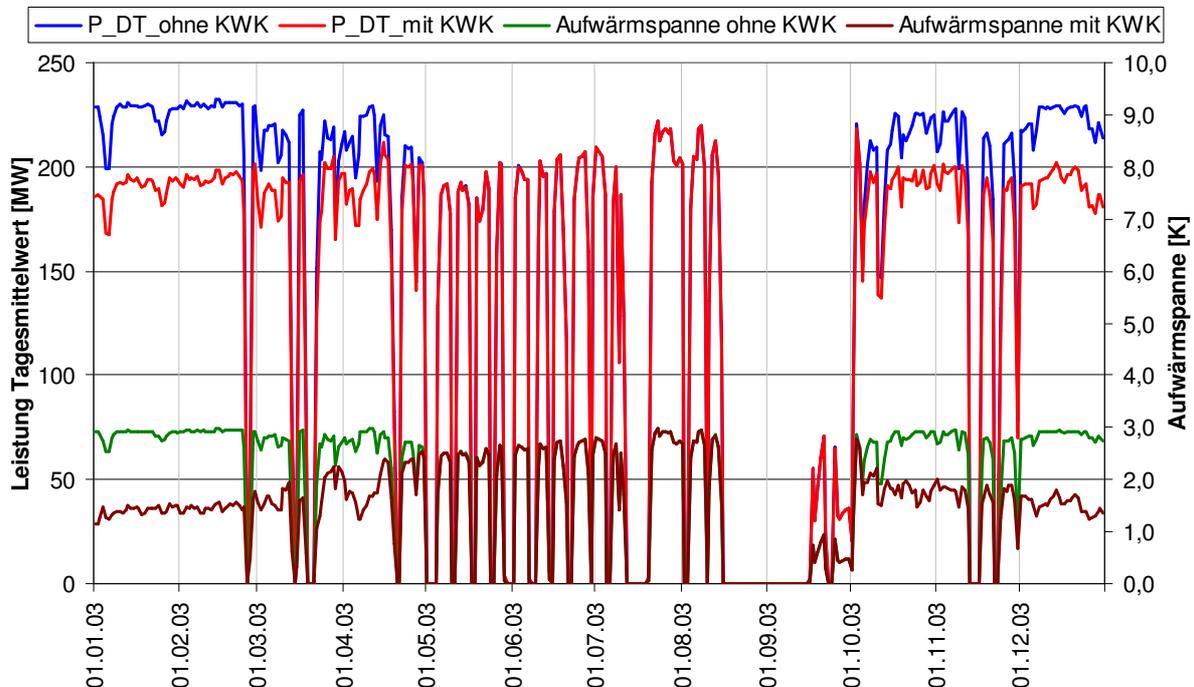


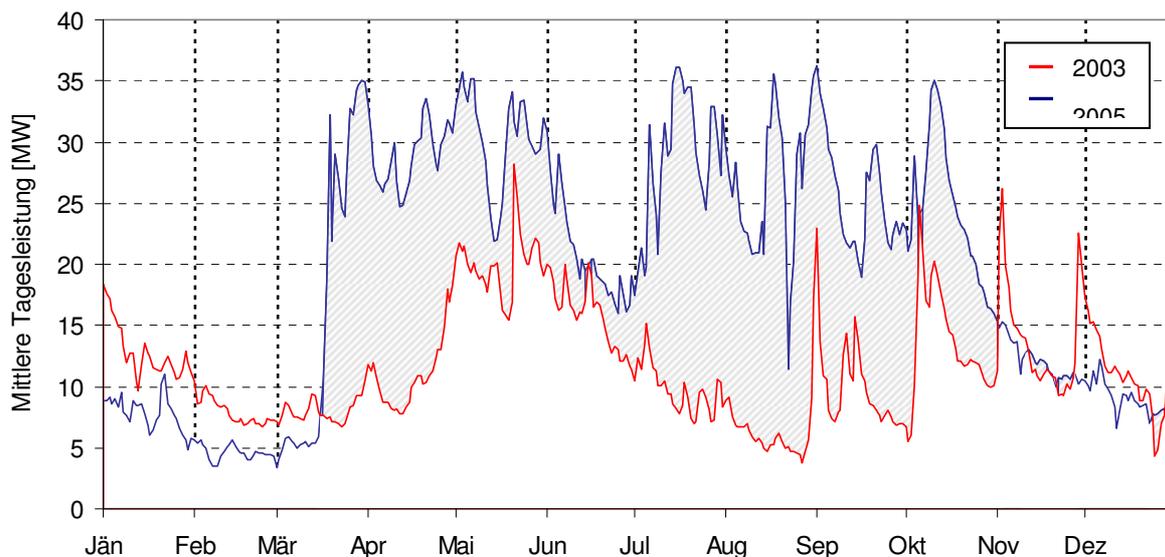
Abbildung 1: Einfluss der KWK auf die Kühlwasseraufwärmspanne

Quelle: [Interne Daten]

Kommt es in Dampfkraftwerken mit Entnahme-Kondensationsdampfturbinen zu einem Verlust an erzeugter elektrischer Leistung auf Grund der für die Wärmeauskopplung nötigen Dampfentnahme. Diese Dampfmenge steht für eine weitere Expansion im Kondensationsteil nicht mehr zu Verfügung. Dieser Effekt wirkt sich aber in weiterer Folge positiv auf die Abwärmefracht aus, die später im Kondensator abgeführt werden muss. Der verringerte Dampfmassenstrom im Kondensationsteil reduziert die Abwärmemenge und somit die Aufwärmspanne des Kühlmediums. Bei Frischwasserkühlung bedeutet dies eine geringere Temperatur des wiedereingeleiteten Kühlwassers.

### 2.3.3 Simulation der Wasserkraftwerke

Die Erzeugung in Wasserkraftwerken ist in erster Linie von der Wasserführung des genutzten Gewässers abhängig. Deutlich wird dies am Beispiel des Jahres 2003. Aufgrund verminderter Abflüsse ging die Erzeugung der in diesem Projekt betrachteten Wasserkraftwerke der Modellanwendung in den Sommermonaten stark zurück. Die Jahresarbeit betrug nur ca. 65 [%] des Regelarbeitsvermögens. In Abbildung 2 sind die mittleren Tagesleistungen des Jahres 2003 dem Jahr 2005 gegenübergestellt. 2005 lagen die Abflusswerte in Summe etwa im langjährigen Mittel.



**Abbildung 2: Mittlere kumulierte Tagesleistung der beiden Wasserkraftwerke der Modellanwendung in der Gegenüberstellung der Jahre 2003 und 2005**

Quelle: [Interne Daten]

## 2.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Durch den Klimawandel werden in Österreich folgende wesentlichen klimatischen Änderungen im Zeitraum 2041 bis 2050 gegenüber dem Referenzzeitraum 1981 bis 1990 erwartet:

- Anstieg der mittleren Umgebungstemperaturen um ca. 2,3 [K] im Sommer und 1,9 [K] im Winter.

- Abnahme der Niederschlagsmengen im Herbst bei einer Zunahme im Winter.
- Abnahme der Heizgradtage um 15 bis 23 [%].
- Zunahme der Kühlgradtage um 147 [%].

Regional können hier deutliche Unterschiede zu beobachten sein. Weiters ist mit einer Ausweitung der klimatisierten Flächen zu rechnen, was bei einer Zunahme der gekühlten Flächen um 2 [%/a] eine Zunahme des Strombedarfs bis 2040 um ca. 1.300 [GWh/a] bedeutet.

Für die relevanten Kraftwerkstechnologien konnten Kennlinien abgeleitet werden, mit denen sich die Einflüsse der Umgebungsparameter abbilden lassen.

Die wesentlichen Einflussgrößen für die Wasserkrafterzeugung sind Fallhöhe, Durchfluss und der Anlagenwirkungsgrad. Für den Wirkungsgrad konnte ein allgemein anwendbarer Verlauf in Abhängigkeit vom Durchfluss dokumentiert werden.

Dampfkraftwerke werden in ihrem Betriebsverhalten vor allem durch die Kühlwassertemperatur beeinflusst. Der im Kondensator erzielbare Kondensationsdruck ist direkt von der Kühlwassertemperatur abhängig. Somit hängen Leistung und Wirkungsgrad des Dampfkraftwerks unmittelbar von der Kühlwassertemperatur ab.

Gasturbinen sind direkt von den Zuständen (Temperatur, Druck und Feuchte) der Umgebungsluft abhängig.

Kombikraftwerke (GuD-Anlagen) sind in ihrer Leistung und in ihrem Wirkungsgrad sowohl von den Zuständen der Umgebungsluft, als auch von der Kühlwassertemperatur abhängig.

Alle diese Effekte wurden in Form allgemeiner Kennlinien in einem Simulationsmodell dokumentiert.

Durch eine Überprüfung des Modells mit realen Daten einer Kraftwerkskette aus Wasserkraftwerken und thermischen Kraftwerken konnte gezeigt werden, dass die Ergebnisse der Simulationsrechnungen in sehr guter Übereinstimmung mit den tatsächlichen Werten liegen. In weiterführenden Analysen wurden positive Effekte geänderter legislativer Rahmenbedingungen und des Einsatzes von Zusatztechnologien (Ansaugluftkühlung, Ablaufkühlturm) untersucht.

In thermischen Kraftwerken ist zumindest eine teilweise Kompensation der Umgebungseffekte möglich. Der beste Schritt zur Vermeidung negativer Auswirkungen auf die Stromerzeugung ist ein Wechsel hin zur neuesten Technologie der thermischen Kraftwerke (Kombikraftwerke, GuD), weil damit bei gleich bleibender Abwärmeemission über die Kühlwässer ca. eine Verdreifachung der Leistung erzielt werden kann.

### 3 Schlussfolgerung und Ausblicke

Drei Aspekte des Klimawandels sind für die Elektrizitätserzeugung im österreichischen Kraftwerkspark von übergeordneter Bedeutung:

- Veränderungen in der Wasserführung der Gewässer, hervorgerufen durch eine Verschiebung der Niederschlagsereignisse. Dies führt zu einer direkten Beeinflussung der Wasserkrafterzeugung, die für über 50 [%] der Inlandsstromerzeugung verantwortlich ist. Eine Ausdehnung der Niedrigwasserzeiten führt somit zwangsläufig zu einer Erhöhung der thermischen Stromerzeugung in Österreich und der Stromimporte aus dem Ausland.
- Veränderungen in der Temperatur der Fließgewässer. Dies führt, teilweise in Kombination mit niedriger Wasserführung, zu einer Einschränkung der Nutzung der Gewässer als Kühlwasserlieferanten für die thermischen Kraftwerke. Eine Reduktion der absorbierbaren Abwärmemenge führt zwangsläufig zu einer Drosselung der elektrischen Erzeugung in den thermischen Kraftwerken.
- Eine Erhöhung der Umgebungstemperatur hat eine direkte, negative Auswirkung der elektrischen Erzeugung von Gasturbinen- und GuD-Kraftwerken.

Es ist zu erwarten, dass diese 3 Aspekte nicht unabhängig voneinander auftreten werden. Somit ist im bestehenden Kraftwerkspark mit einer Reduktion der elektrischen Erzeugung als Folge des Klimawandels zu rechnen. Darüber hinaus wird die Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie zu einer zusätzlichen, mittelfristigen Reduktion der Wasserkrafterzeugung führen.

Die ursprünglich vermuteten Wechselwirkungseffekte zwischen den thermischen Kraftwerken und den Wasserkraftwerken im Hydro-Thermischen Kraftwerksverbund konnten nicht nachgewiesen werden. Es ist davon auszugehen, dass die Klimaeffekte keinen Einfluss auf das Zusammenspiel der verschiedenen Kraftwerkstypen haben werden. Die Effekte werden sich vielmehr separat aber parallel auf Wasserkraftwerke und thermische Kraftwerke auswirken.

Von entscheidender Bedeutung für die Erzeugungssituation der Kraftwerke ist allerdings der legislative Rahmen. Bei Wasserkraftwerken werden die Vorgaben von Restwassermengen und die Einschränkung des Schwellbetriebs zu einer Verminderung der elektrischen Erzeugung führen. Eine Einschränkung der Aufwärmspannen der Gewässer trifft die thermischen Kraftwerke. Allerdings stehen hier Technologien zur Verfügung (Ablaufkühlturm), mit denen die negativen Effekte zumindest teilweise kompensiert werden können. Der Endenergiebedarf der Verbraucher wird sich durch den Klimawandel, diverse Energiesparmaßnahmen und das Verbrauchsverhalten verändern.

Die Reduktion der Heizgradtage und Wärmedämmungsmaßnahmen lassen ein Sinken des Raumwärmebedarfs erwarten. Das bedeutet jedoch nicht notwendigerweise eine Reduktion des Fernwärmebedarfs, da der Ausbau der Fernwärmeversorgung aus energie- und umweltpolitischen Gründen vorangetrieben wird. Durch eine Ausweitung der klimatisierten Flächen ist jedoch von einem Anstieg des Elektrizitätsbedarfs im Sommer auszugehen.

Aus derzeitiger Sicht werden die Klimaeffekte die momentan in Österreich bestehende, inländische Stromerzeugung vor keine existenziellen Probleme stellen. Um einen gesteigerten Strombedarf ohne Ausweitung der Importe abdecken zu können, ist eine Ausweitung der Kraftwerkskapazitäten erforderlich. In diesem Zusammenhang bietet sich ein Ersatz bzw. Upgrade bestehender thermischer Kraftwerke mit neuester Technologie (GuD-Anlagen) und sehr hohen elektrischen Wirkungsgraden an, die mit Zusatztechnologien (Ansaugluftkühlung, Ablaufkühlturm) bis zu einem gewissen Grad von Umgebungseinflüssen entkoppelt werden können. Weiters kann so die elektrische Erzeugung auf ca. das Dreifache angehoben werden, ohne dass der Kühlbedarf steigt.

Im Sinne einer wissenschaftlichen Begleitung dieses Weiterentwicklungsprozesses im österreichischen Kraftwerkspark sollten die für die elektrische Erzeugung maßgeblichen Umgebungsparameter zusätzlich zu den Erzeugungsdaten erhoben und über die nächsten Jahre dokumentiert werden. Somit kann der Umgebungseinfluss auf die Erzeugungssituation abgebildet werden. Weiters kann auch dargestellt werden, wie stark der Effekt der Verlagerung der Stromerzeugung auf die thermischen Kraftwerke ist. In diesem Zusammenhang ist natürlich auch von Interesse, bis zu welchem Grad weitere regenerative Energieträger einen nennenswerten und regelbaren Beitrag zur Stromerzeugung leisten können.

Dieses Projekt wurde aus Mitteln des Klima- und Energiefonds gefördert und im Rahmen des Programms „NEUE ENERGIE 2020“ unter der Abwicklung der Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG) durchgeführt.

Endbericht unter: [http://www.fh-joanneum.at/aw/home/fue/News/~cdvt/KRAKE\\_News/?lan=de](http://www.fh-joanneum.at/aw/home/fue/News/~cdvt/KRAKE_News/?lan=de)

## 4 Literaturverzeichnis

**Adnot et al., 2003:** Adnot J.; Waide P.; Rivier P.; et al.: „Energy Efficiency and Certification of Central Air Conditioners (EECCAC)“. Study for the D.G. Transportation-Energy (DGTREN) of the Commission of the EU. Final Report, Paris 2003

**ARC, 2007:** ARC-systems research (Hrsg.): „reclip:more - research for climate protection: model run evaluation, Medieninformation zum Projektabschluss“, Austrian Research Centers GmbH - ARC, Wien, 2007

**Christensen und Christensen, 2007:** Christensen, Jens Hesselbjerg; Christensen, Ole Bøssing: „A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century“, in: Climatic Change, Volume 81, 2007,

**Dalin et al., 2005:** Dalin, Pär; Nilsson, Joakim; Rubenhag, Anders: „The European Cold Market. Final Report. Ecoheatcool, work package 2“. Brüssel 2005

**IPCC, 2007:** IPCC (Hrsg.), Solomon, Susan; Qin, Dahe; Manning, Martin; Marquis, Melinda; Averyt, Kristen; Tignor, Melinda; LeRoy Miller, Henry; Chen, Zhenlin et al. (Autoren): „Climate Change 2007 – The Physical Science Basis“. Cambridge, 2007

**Kromp-Kolb und Formayer, 2005:** Kromp-Kolb, Helga, Formayer, Herbert: „Schwarzbuch Klimawandel. Wie viel Zeit bleibt uns noch?“, ecowin Verlag, Salzburg, 2005

**Kugeler und Philippen, 1993:** Kugeler K., Philippen P. W.: „Energietechnik - Technische, ökonomische und ökologische Grundlagen“, 2. Auflage, Springer Verlag, Heidelberg, 1993

**Loibl et al., 2007:** Loibl, Wolfgang; Beck, Alexander; Dorninger, Manfred; Formayer, Herbert; Gobiet, Andreas; Schöner, Wolfgang (Hrsg.): „reclip:more - research for climate protection: model run evaluation, final report“, Austrian Research Centers GmbH - ARC, Wien, 2007

**Prettenthaler et al, 2008:** Prettenthaler F., Gobiet, A., et al.: „Heizen und Kühlen im Klimawandel - Teil 1. Erste Ergebnisse zu den künftigen Änderungen des Energiebedarfs für die Gebäudetemperierung“, Band 2, Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, 2008