

3. Exkurs: Einfluss der Klimaerwärmung auf das Energiesystem

Im vorliegenden Exkurs geht es um die Frage, welche Auswirkungen eine Klimaerwärmung auf die Energienachfrage und das Stromangebot in der Schweiz hat.

Inhalt

1.	Klimaerwärmung.....	1
1.1	Temperatur.....	1
1.2	Niederschläge	2
2.	Auswirkungen auf den Wasserabfluss	2
2.1	Modellaufbau.....	3
2.2	Wahl der Testgebiete	4
2.3	Resultate für die Periode 2020 – 2049	5
3.	Stromangebot	7
3.1	Wasserkraftwerke	7
3.2	Thermische Kraftwerke	8
3.3	Andere Energieträger.....	8
4.	Endenergienachfrage	8
4.1	Endenergienachfrage nach Sektoren	8
4.1.1	Haushaltssektor	8
4.1.2	Andere Sektoren.....	10
4.2	Endenergie- und Stromnachfrage.....	11
5.	Fazit.....	13
6.	Literatur.....	14

1. Klimaerwärmung

Die nachfolgenden Ergebnisse beruhen auf zwei Berichten zur Klimaerwärmung in der Schweiz im 21. Jahrhundert (Quellen: [8], [5]).

1.1 Temperatur

Auf globaler Ebene wird von einer durchschnittlichen Zunahme der Oberflächentemperatur von 1990 bis 2050 um 0.7 bis 2.6 °C ausgegangen. Dieser Bereich ergibt sich aus dem „Special report on emission scenarios“ (SRES) des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) und verschiedenen Klimamodellen. Die SRES beschreiben die Emissionen wichtiger Treibhausgase und Aerosole basierend auf unterschiedlichen, plausiblen Annahmen über die technologische Entwicklung, die Bevölkerungsentwicklung, das wirtschaftliche Wachstum und die Globalisierung.

Im Rahmen des EU-Projekts PRUDENCE (siehe <http://prudence.dmi.dk/>) werden Klimaszenarien mit Hilfe von regionalen Klimamodellen für Europa hergeleitet und deren Unsicherheiten quantifiziert. Die in Tabelle 1 aufgeführten Resultate (und Unsicherheitsbereiche) wurden mit einem vorläufigen Satz von 6 Regionalmodellen und 2 globalen Emissionsszenarien (SRES A2 und B2) bestimmt. Dabei wurden zunächst Sommer- und Winterdurchschnittswerte für die Alpennordseite und die Alpensüdseite aus den Modellrechnungen für die Periode 2071 bis 2100 berechnet. Anschliessend wurden diese Werte unter Berücksichtigung der gesamten Bandbreite der SRES auf das Jahr 2050 skaliert. Der Einbezug verschiedener Regionalmodelle sowie die Berücksichtigung verschiedener Emissionsszenarien bei der Skalierung quantifiziert zwei wesentliche Unsicherheitsfaktoren. Allerdings stützen sich die betrachteten Regionalmodelle auf Daten vom vorliegenden Globalmodell, weshalb davon ausgegangen werden muss, dass die Unsicherheiten in der vorliegenden Auswertung unterschätzt werden.

Tabelle 1: **Veränderung der Durchschnittswerte in °C in der Schweiz von 1990 bis 2050.**

JJA: Januar, Februar, März; DJF: Dezember, Januar, Februar.

	Alpennordseite			Alpensüdseite		
	tief	mittel	hoch	tief	mittel	hoch
Sommer (JJA)	+0.8	+2.3	+5.1	+1.0	+2.5	+5.6
Winter (DJF)	+0.7	+1.6	+3.2	+0.7	+1.6	+3.2

Quelle: [8].

Die aus regionalen Klimaszenarien berechneten Werte zeigen die ganze Bandbreite der erwarteten Klimaänderung im Sommer und Winter, auf der Alpennord- und -südseite. Sie berücksichtigen jedoch keine natürlichen Schwankungen, welche für die betrachtete Zeitperiode von 60 Jahren schätzungsweise 0.5 – 1.0 °C betragen könnten.

1.2 Niederschläge

Modellrechnungen zeigen eine Abnahme der Niederschläge im Sommer und eine Zunahme der Niederschläge im Winter. Ähnlich wie bei den Temperaturszenarien kann die regionale Veränderung der Niederschläge mit der globalen Klimaänderung verknüpft werden. Die so berechneten Sommer- und Winterdurchschnittswerte für die Alpennordseite und die Alpensüdseite sind in der Tabelle 2 zusammengestellt.

Tabelle 2: **Niederschlagsveränderungen in der Schweiz von 1990 bis 2050.**

JJA: Januar, Februar, März; DJF: Dezember, Januar, Februar.

	Alpennordseite			Alpensüdseite		
	tief	mittel	hoch	tief	mittel	hoch
Sommer (JJA)	-3%	-15%	-35%	-5%	-23%	-45%
Winter (DJF)	+5%	+10%	+23%	+5%	+10%	+23%

Quelle: [8].

Die Abschätzungen der künftigen Entwicklung der Niederschläge sind mit grossen Unsicherheiten verbunden. Die Zunahme der winterlichen Niederschlagstätigkeit steht jedoch in Übereinstimmung mit Beobachtungen aus der Vergangenheit. Als Folge der erhöhten Temperaturen werden die Niederschläge vermehrt in Form von Regen statt Schnee fallen.

Aufgrund des Prozessverständnisses und von Modellrechnungen wird heute mit einer Zunahme der Intensität von Starkniederschlägen im Winterhalbjahr gerechnet:

- Bei einer Intensivierung des Wasserkreislaufs könnten in den Alpen vor allem die Starkniederschläge von langer Dauer zunehmen.
- Die globalen Klimamodelle zeigen, dass bei einer Verdoppelung des CO₂-Gehalts der Atmosphäre extrem niederschlagsreiche Winter in der Schweiz (heutige Wiederkehrperiode 40 Jahre) 3–5 mal häufiger werden könnten.
- Die erwartete Zunahme von Starkniederschlägen deckt sich qualitativ mit der beobachteten Zunahme von intensiven Winterniederschlägen in der Schweiz.
- Aussagen über die Veränderung von Starkniederschlägen im Sommer sind noch sehr unsicher, da die verfügbaren Modellergebnisse stark variieren.

2. Auswirkungen auf den Wasserabfluss

Das „Laboratoire Hydrologie et Aménagements“ (HYDRAM) der Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) hat im Auftrag des BFE eine Studie durchgeführt, die die Auswirkungen einer Klimaänderung auf den Wasserabfluss aus dem Alpenraum für die Zeitperiode 2020 – 2049 und 2070 – 2099 untersucht. Die Studie kann wie alle Grundlagenarbeiten der Perspektiven über die Seite www.energie-perspektiven.ch heruntergeladen werden. Die Ergebnisse erlauben es, Rückschlüsse auf die künftig erwartete Wasserkraftproduktion unter der Voraussetzung einer Erwärmung zu ziehen. Nachfolgend werden zuerst die wesentlichen Modellaspekte und die untersuchten Testgebiete vorge-

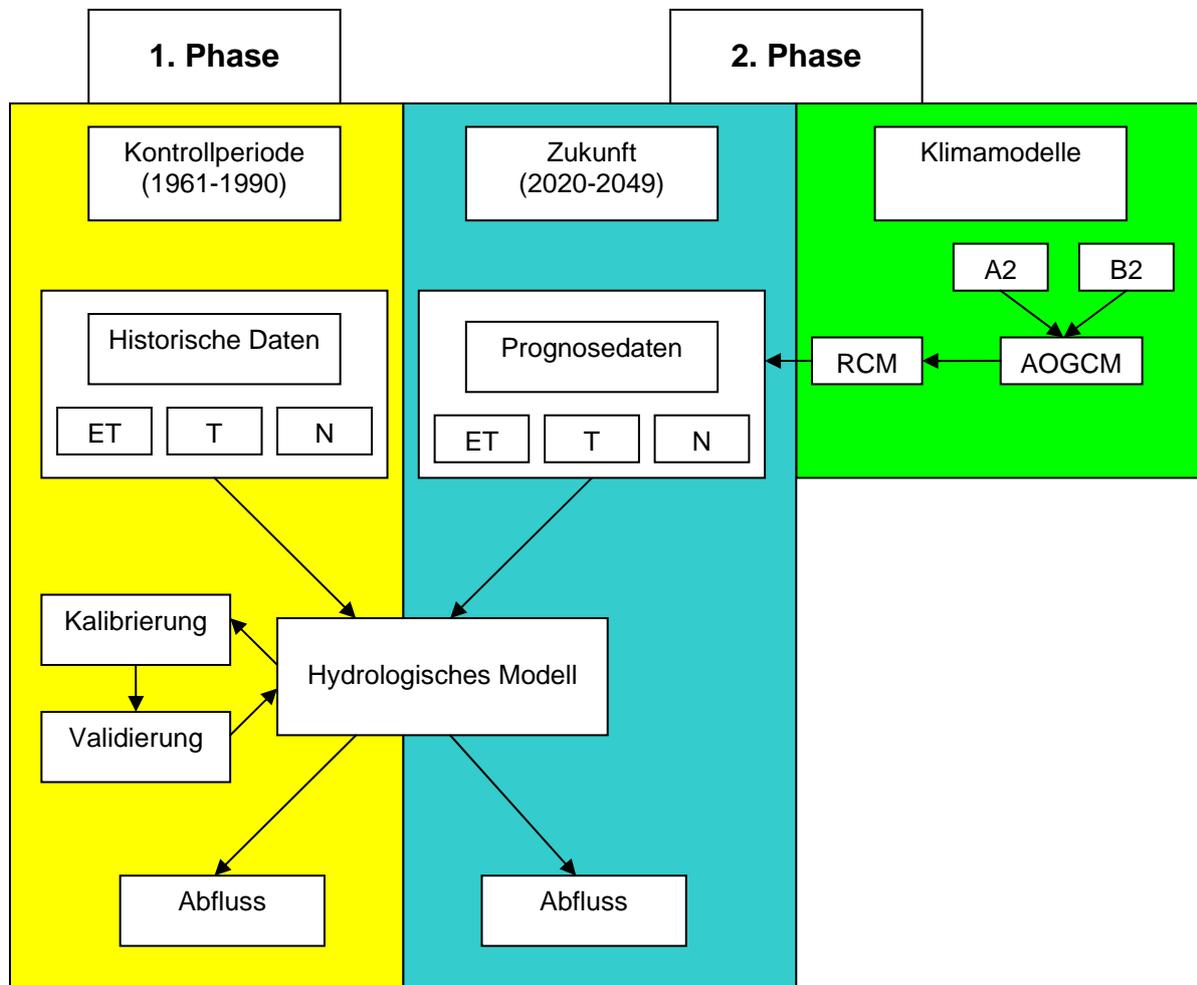
stellt, danach die Resultate für 2020 – 2049. Weiterführende Erläuterungen zum Modell und Resultate der Periode 2070 – 2099 werden in [16] vorgestellt.

2.1 Modellaufbau

Figur 1 stellt den Studienaufbau dar. Kernstück ist das hydrologische Modell, in das als Inputgrößen die Tagesmitteltemperatur, die potentielle Verdunstung¹ und die täglichen Niederschlagsmengen einfließen². Als Resultat liefert das Modell die entsprechenden Abfluss- und Verdunstungsmengen. In einer ersten Phase werden historische Daten verwendet, mit denen das Modell kalibriert und validiert wird, um es dann auf die Kontrollperiode, die in der Regel die Jahre 1961 – 1990 umfasst, anzuwenden. Um Aussagen über die Zukunft machen zu können, müssen in einer zweiten Phase zuerst die Inputparameter des Modells für die zu untersuchende Zeitperiode geschätzt werden. Für die Temperatur- und Niederschlagswerte werden Klimamodelle verwendet; die künftige potentielle Verdunstung wird aus den Temperaturen und mit Hilfe einer Zeitreihenanalyse bestimmt. Diese Prognosedaten fließen dann wiederum ins hydrologische Modell ein.

Figur 1: **Übersicht über den Aufbau der Studie**

T: Temperatur, ET: potentielle Verdunstung, N: Niederschlag. Die Abkürzungen A2, B2, RCM, AOGCM beziehen sich auf die Klimamodelle und werden im Text erläutert.



Quelle: [14].

¹ Genauere Erläuterungen zum Begriff der Verdunstung (Evapotranspiration) siehe http://public.arcegmo.de/module/vertical_domain/evapotranspiration.htm#Potentielle%20Evapotranspiration (Stand Juli 2006).

² Für eine detaillierte Beschreibung des hydrologischen Modells wird auf [15] verwiesen.

Weil versucht wird, die realen Vorgänge abzubilden, sind die verwendeten Klimamodelle sehr kompliziert. Auf globaler Ebene kommen „Atmospheric – Ocean General Circulation Models“ (AOGCM) zum Einsatz, die gekoppelt werden mit Treibhausgas-Emissionsszenarien, die das Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC) ausgearbeitet hat und die im „Special Report on Emission Scenarios“³ (SRES) im Detail erläutert sind. Die „A2-Modellgeschichte“ beschreibt eine vielfältige Welt mit einer Bewahrung lokaler Identitäten und einer stetig zunehmenden Bevölkerung. B2 geht ebenfalls von einer stetig, jedoch langsamer als in A2 ansteigenden Bevölkerung aus und legt das Schwergewicht auf die lokale und regionale Ebene unter Berücksichtigung von Umweltschutz und sozialer Gerechtigkeit.

Die in der EPFL-Studie verwendeten Klimaszenarien stammen alle aus dem EU-Forschungsprojekt PRUDENCE⁴. Dieses Projekt liefert Klimasimulationen von drei verschiedenen AOGCMs, die mit den Szenarien A2 und B2 gekoppelt wurden. Da die Gitternetzauflösung sehr grob ist, wurden die Ergebnisse mit neun regionalen Klimamodellen (RCM) weiter verarbeitet. Insgesamt stehen somit zwölf regionale Szenarien unter A2 und sieben unter B2 zur Verfügung. In der Studie der EPFL werden diese regionalen Szenarien mit Hilfe einer statistischen Methode auf lokales Niveau heruntergebrochen, auf dem die testgebietsspezifischen klimatischen Unterschiede, die im Alpenraum beträchtlich sein können, berücksichtigt sind.

Die detaillierten Ergebnisse der regionalen Klimamodelle liegen im Rahmen des PRUDENCE Forschungsprojektes nur für den Zeithorizont 2070 – 2099 vor, welcher in zahlreichen langfristigen Klimaentwicklungsstudien analysiert wird. Für die Energieperspektiven des BFE ist aber vor allem der Zeitraum 2020 – 2049 von Interesse. Für diese Periode liefern die globalen Klimamodelle zwischen den Emissionsszenarien A2 und B2 noch keine signifikanten Unterschiede und sagen eine globale Erwärmung von ungefähr +1 °C vorher. Dieses Ergebnis dient als Grundlage für die Rückskalierung der regionalen Klimaänderungsvorhersagen für 2020 – 2049. Solche Skalierungsmethoden („scaling of climate model response patterns“) sind in Klimaentwicklungsstudien weit verbreitet. Ihnen liegt die Annahme zu Grunde, dass zwischen der jährlichen globalen Erwärmung und der entsprechenden regionalen Klimaänderung eine lineare Beziehung besteht. Auf Grund der geringen Unterschiede zwischen den Emissionsszenarien A2 und B2 für diesen Zeitraum werden dabei die 19 verschiedenen Modellkombinationen (zwölf regionale Szenarien unter A2 und sieben unter B2) gemeinsam betrachtet. Neben diesen im Folgenden unter der Bezeichnung „+1 °C Szenario“ zusammengefassten Szenarien, analysiert die Studie der EPFL auch potentielle Klimaänderungsauswirkungen für den Zeithorizont 2070 – 2099.

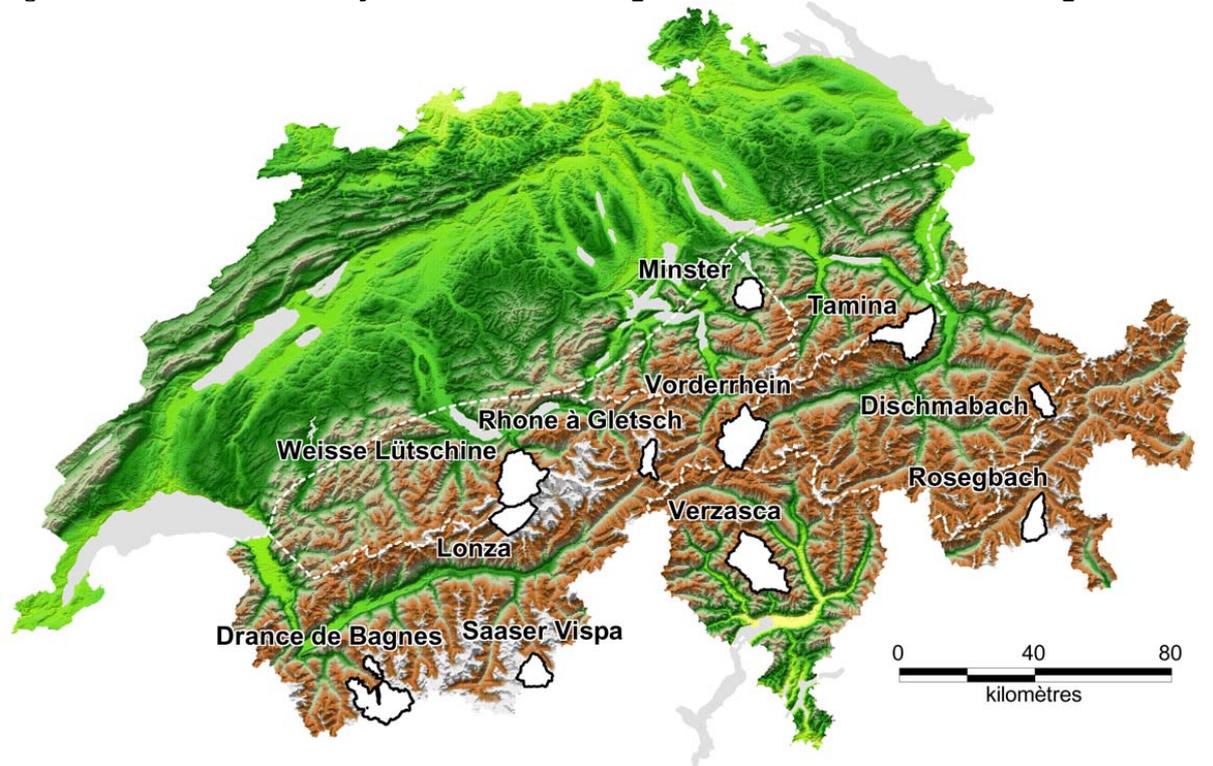
2.2 Wahl der Testgebiete

Im Schweizer Alpenraum können sieben verschiedene hydro-klimatische Regionen unterschieden werden, die in Figur 2 eingezeichnet sind. Bei der Wahl der Testgebiete wurde deshalb darauf geachtet, dass einerseits diese verschiedenen Regionen abgedeckt und andererseits die unterschiedlichen höhenabhängigen hydrologischen Regimes repräsentiert werden. Im weiteren war auch wichtig, dass in der Umgebung der einzelnen Gebiete für die Kontrollperiode meteorologische Mess- sowie Abflussreihen vorhanden sind und dass die Gebiete nach Möglichkeit wasserwirtschaftlich nicht genutzt werden, da der Einsatz von Kraftwerken und die allfällige Umleitung der Wasserzuflüsse im Einzugsgebiet die Modellkalibrierung erschweren würde. So wurden letztlich 11 Testgebiete ausgewählt, die ebenfalls in Figur 2 eingezeichnet sind.

³ <http://www.grida.no/climate/ipcc/emission/>.

⁴ PRUDENCE: Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects (<http://prudence.dmi.dk>).

Figur 2: Übersicht über die hydro-klimatischen Regionen und die untersuchten Testgebiete



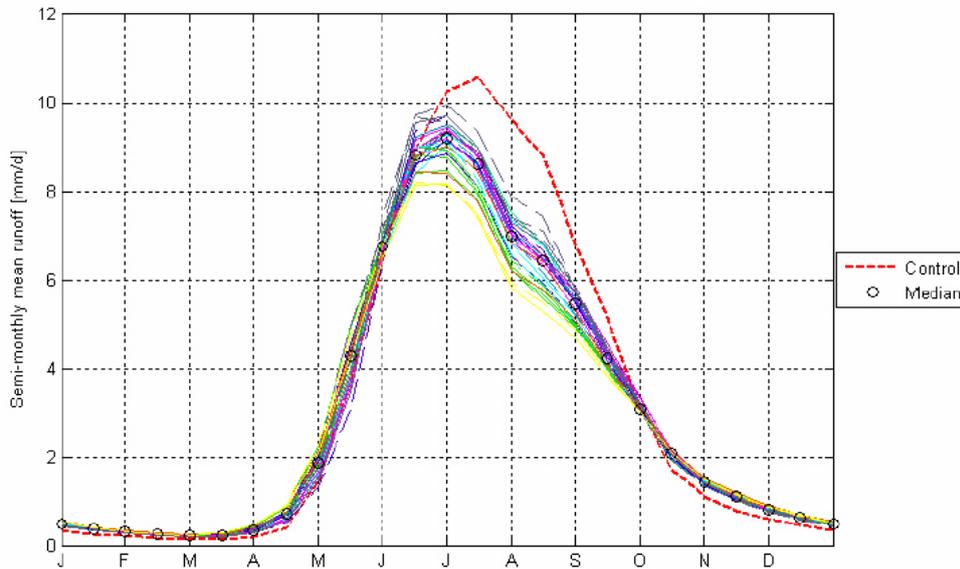
Quelle: [9], [18].

2.3 Resultate für die Periode 2020 – 2049

Für den Alpenraum entspricht das globale +1 °C Szenario einem erwarteten Jahresmitteltemperaturanstieg von 1.2 °C bei gleichzeitiger Reduktion der Jahresniederschlagsmenge um 2%. Der Wasserabfluss aus dem Alpenraum wird um rund 7% reduziert, dies obschon der Anteil der Vergletscherung in den untersuchten Gebieten stark zurückgehen wird, und zwar um rund 50%.

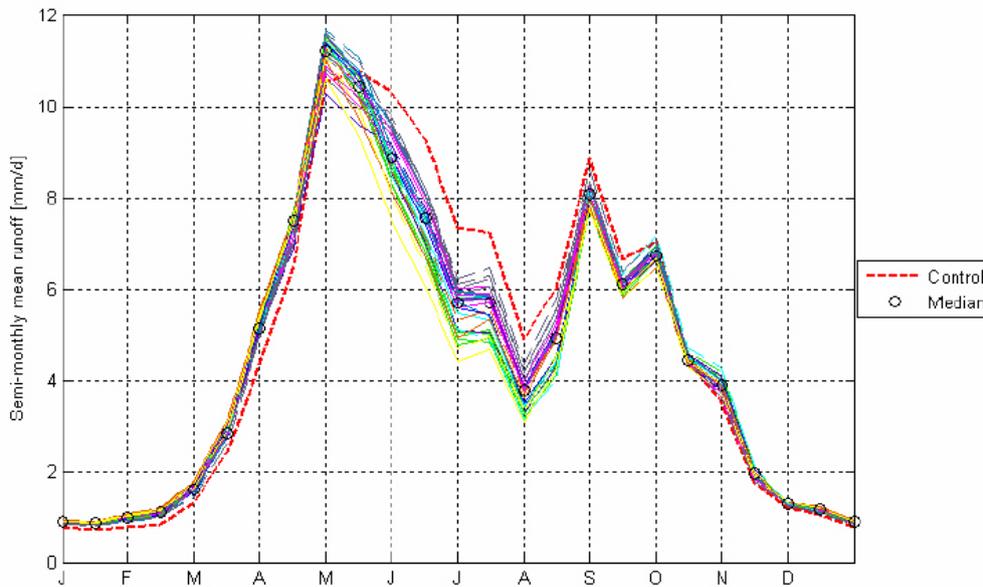
Eine saisonale Betrachtung zeigt, dass die Niederschlagsmengen im Winter (Dezember – Februar) um 6% zunehmen, im Sommer (Juni – August) hingegen um 8% abnehmen werden. Im Frühjahr ist die Entwicklung unklar, im Herbst wird tendenziell mit einer Reduktion gerechnet. Als Folge davon wird sich der Sommerabfluss (April – September) reduzieren, während sich der Winterabfluss (Oktober – März) leicht erhöht. Die Abflussspitze verlagert sich, bedingt durch die frühere Schneeschmelze, um rund einen halben Monat nach vorne. Figuren 3 und 4 zeigen die Resultate des prognostizierten Abflusses für zwei verschiedene hydrologische Regimes am Beispiel des Rosegbachs und der Verzasca.

Figur 3: **Halbmonatlicher Abfluss des Rosegbachs für die Periode 2020 – 2049 in mm pro Tag.** Rot gestrichelt ist der Wasserabfluss für die Kontrollperiode 1961 – 1990, die Kreise zeigen den Medianwert des Abflusses der neunzehn verschiedenen Klimaszenarien.



Quelle: [9].

Figur 4: **Halbmonatlicher Abfluss der Verzasca für die Periode 2020 – 2049 in mm pro Tag.** Rot gestrichelt ist der Wasserabfluss für die Kontrollperiode 1961 – 1990, die Kreise zeigen den Medianwert des Abflusses der neunzehn verschiedenen Klimaszenarien.



Quelle: [9].

Der Abfluss des Rosegbachs weist einen typischen Verlauf für ein Gebiet mit Vergletscherung auf. Im Gegensatz dazu zeigt der Abfluss der Verzasca, stellvertretend für ein nicht vergletschertes Gebiet in den Südalpen, eine zusätzliche Spitze als Folge starker Niederschläge im Herbst.

Es mag auf Anhieb erstaunen, dass trotz der zu erwartenden starken Gletscherschmelze die Abflussmengen wesentlich stärker zurückgehen als es die reduzierten Niederschlagsmengen vermuten lassen. Dies liegt daran, dass einerseits der verstärkte Gletscherabfluss mengenmässig keine grosse Bedeutung hat, andererseits aber vor allem die Verdunstung, bedingt durch die erhöhte Temperatur und die grössere eisfreie Fläche, erheblich zunehmen wird. Ausführlich auf dieses Phänomen wird in [16] eingegangen.

Obschon bei den Modellen teilweise vereinfachende Annahmen getroffen wurden und die Rechnungen mit Unsicherheiten verbunden sind, ändert sich an der Tendenz der nachfolgenden Aussagen, die

jeweils auf dem Median der neunzehn untersuchten Klimaszenarien beruhen, nichts. Die Modellunsicherheiten und die Streuung der Resultate werden in der Originalarbeit im Detail aufgezeigt und diskutiert.

3. Stromangebot

Im nachfolgenden Abschnitt wird der Einfluss einer Klimaerwärmung auf das Stromangebot in der Schweiz diskutiert. Dabei ist zu unterscheiden zwischen Wasserkraft, thermischen Kraftwerken und neuen erneuerbaren Energien.

3.1 Wasserkraftwerke

Wie in Abschnitt 2 gezeigt wurde, nimmt unter einer Klimaerwärmung die Wasserabflussmenge aus dem Alpenraum bis 2035 um rund 7% ab. Um die Auswirkungen auf die hydrologische Produktion zu bestimmen, ist zwischen den einzelnen Produktionsarten zu unterscheiden:

- Bedingt durch den reduzierten Wasserabfluss aus dem Alpengebiet wird die Produktion der Laufwasserkraftwerke abnehmen, und zwar um 7%. Dabei wird in erster Näherung davon ausgegangen, dass eine allfällig verstärkte Verdunstung im Mittelland, die in der Studie der EPFL nicht untersucht wurde und das Wasserangebot weiter schmälern könnte, durch verminderte Überläufe im Sommer bei den Laufwasserkraftwerken kompensiert wird.
- Bei den Speicherkraftwerken führt die geringere Wasserabflussmenge zu einer um 7% reduzierten Produktion. Da die monatlichen Schwankungsbreiten der tatsächlichen Erzeugung in den Speicherkraftwerken über die Jahre sehr gross sind, wird nur eine Differenzierung der Ergebnisse nach Sommer- und Winterhalbjahr vorgenommen. In beiden Fällen sind die verschärften Restwasserbestimmungen nicht berücksichtigt.
- Der Pumpspeicherzyklus entspricht einem abgeschlossenen System. Deshalb hat die Abflussminderung keinen Einfluss auf die Produktionsmenge.

Im weiteren ist zu berücksichtigen, dass der Gesetzgeber in der Schweiz mit dem Gewässerschutzgesetz strengere Restwasserbestimmungen eingeführt hat, die unabhängig von einer Klimaerwärmung die Produktion aus Wasserkraft reduziert. Demgegenüber steht allerdings ein gewisses Ausbaupotential, vor allem durch Ausrüstungsersatz und Umbauten, so dass sich diese beiden Entwicklungen ungefähr die Waage halten dürften. Da Wasserkraft ein wichtiges Standbein der Schweizer Wirtschaft ist, erarbeitet das BFE eine Wasserkraftstrategie, die Möglichkeiten zur Förderung dieser erneuerbaren Energiequelle aufzeigt.

Die Studie der EPFL zeigt, dass eine Klimaerwärmung bereits in den nächsten Jahrzehnten erhebliche Auswirkungen auf die einheimische Stromproduktion haben kann. Im Szenario I wird unter der Annahme einer Klimaerwärmung eine durchschnittliche jährliche Erhöhung des Stromverbrauchs von 0.8% erwartet, so dass die Schweiz im Jahre 2035 einen Endverbrauch von mehr als 71 TWh aufweisen würde, gegenüber 56 TWh im Jahr 2004. Die Wasserkraftwerke haben im Jahre 2004 gemäss [4] mit 35 TWh etwa 63% zum Endverbrauch beigesteuert. Berücksichtigt man eine allfällige Reduktion der Wasserkraftproduktion von rund 7%, was einer Minderproduktion von 2.5 TWh entspricht, so würde die Wasserkraft im Jahre 2035 gemessen am Endverbrauch noch einen Beitrag von knapp 46% leisten können. Dabei sind mögliche Ausbaupotentiale durch Ausrüstungsersatz, Umbauten und Erweiterungen, die rund 2 TWh betragen, und die Restwasserbestimmungen, welche bis 2030 eine Minderproduktion von rund 1 TWh zur Folge haben dürften, noch nicht berücksichtigt (Quelle: [13]).

In der parlamentarischen Debatte zum Stromversorgungsgesetz (StromVG) wurde eine Erhöhung der durchschnittlichen Jahreserzeugung von Elektrizität aus erneuerbaren Energien bis 2030 um 5.4 TWh als Ziel vorgeschlagen. Unter dem Referenzszenario und der Annahme einer Klimaerwärmung müssten somit bis ins Jahr 2030 rund 8 TWh zusätzlich aus erneuerbaren Energien produziert werden.

In der Studie der EPFL wird auch die Zeitperiode 2070 – 2099 betrachtet. Bis dann dürften die Auswirkungen noch weit gravierender ausfallen als für die Periode 2020 – 2049. So gehen die Schätzungen von mittleren Temperaturerhöhungen von 3.0 – 4.0 °C aus, was zu einer Jahresniederschlagsreduktion von rund 7% führen wird; im Winter eine Erhöhung um rund 15%, im Sommer eine Reduktion um 25 – 30%, je nach unterstelltem Emissionsszenario. Insgesamt ist bis dann mit einem erwarteten Rückgang des Wasserabflusses um 17% zu rechnen. Die Gletscher dürften in den Testgebieten bis dahin verschwunden sein oder höchstens noch wenige Prozente des heutigen Umfangs betragen.

3.2 Thermische Kraftwerke

Im Hitzesommer 2003 aber auch im Juli 2006 mussten zahlreiche thermische Kraftwerke in Europa infolge fehlender Kühlmöglichkeiten ihre Produktion reduzieren. Da diese stark überdurchschnittlichen Temperaturen aber auch in den nächsten dreissig Jahren Ausnahmen bleiben werden (Quelle: [17]), sind trotz einer Erwärmung auch der Fliessgewässer über das ganze Jahr betrachtet im Mittel keine zusätzlichen Produktionseinschränkungen zu erwarten. Bei Leistungsbetrachtungen müssen solche Ereignisse allerdings berücksichtigt werden (siehe Exkurs: Kälte- und Hitzewellen) und den in solchen Situationen möglichen Nachfragespitzen gegenüber gestellt werden.

3.3 Andere Energieträger

Der Einfluss einer Klimaerwärmung auf andere erneuerbare Energieträger wurde nicht untersucht. Insbesondere ist nicht klar, wie sich die Temperaturerhöhung auf die Biomasseproduktion, die Windverhältnisse und auf die Sonneneinstrahlung auswirkt, die jeweils einen Einfluss auf die entsprechende Energieproduktion haben könnten. Dazu ist zu bemerken, dass der Anteil dieser neuen erneuerbaren Energien in der Schweiz heute gering ist und im Szenario I „weiter wie bisher“ wo nur ein „autonomer“ Zubau unterstellt wird und im Szenario II „Verstärkte Zusammenarbeit“, wo eine zusätzliche Förderung unterstellt wird, auch in 30 Jahren nur einen begrenzten Anteil am Produktionsportfolio haben wird.

4. Endenergienachfrage

Nachfolgend wird der Frage nachgegangen, wie sich eine mögliche Klimaerwärmung auf die Endenergie- und die Stromnachfrage auswirkt. Die Sensitivität Szenario I „Klima wärmer“ unterscheidet sich von Szenario I „Trend“ ausschliesslich durch die Annahme einer im Jahre 2035 um 1.2 °C höheren Jahresmitteltemperatur als im Zeitraum 1984 bis 2002; im Juni bis August +2 °C, September bis Mai +1 °C, was zu einer Zunahme der Sommer- und Hitzetage bei gleichzeitiger Abnahme der Kältetage führt.

4.1 Endenergienachfrage nach Sektoren

4.1.1 Haushaltssektor

4.1.1.1 Annahmen

Als exogene Rahmendaten gehen die Bevölkerungszahl, Haushaltszahl, Grössenstruktur der Haushalte, Energiebezugsflächen und Energiepreise in die Nachfragenmodelle ein.

Bedingt durch die wärmere Temperatur nehmen die Heizgradtage und damit der Heizwärme- bzw. der Heizenergiebedarf ab. Die Heizgradtage sind folgendermassen definiert: jeder Tag, an dem die durchschnittliche Temperatur unter eine bestimmte Grenze fällt (in der Regel 12 °C), wird als Heiztag bezeichnet. An jedem dieser Heiztage wird gemessen, um wie viel die Aussenlufttemperatur von der angestrebten Innentemperatur (in der Regel 20 °C) abweicht. Die Heizgradtage sind dann die Summe dieser Abweichungen. Quantifiziert wird die Reduktion der Heizgradtage mit dem Zusammenhang zwischen Gradtagen, Strahlung und Energieverbrauch (Quelle: [7]).

Gleichzeitig ist mit der Erwärmung auch eine Zunahme der Sommer- (Temperaturmaximum über 25 °C) bzw. Hitzetage (Temperaturmaximum über 30 °C) verbunden und damit der Kühlgradtage und des Kühlenergiebedarfs. Die Kühlgradtage sind folgendermassen definiert: jeder Tag, an dem die durchschnittliche Temperatur über eine bestimmte Grenze steigt (in der Regel 18.3 °C was 65 °F entspricht), wird als Kühltage bezeichnet. An jedem dieser Kühltage wird gemessen, um wie viel die Aussenlufttemperatur von der angestrebten Innentemperatur (in der Regel 20 °C) abweicht. Die Kühlgradtage sind dann die Summe dieser Abweichungen. Da es für die Schweiz keine belastbaren Informationen zum Elektrizitätsverbrauch von Klimaanlage im Wohnbereich gibt, ist man auf Schätzungen und Plausibilitätsprüfungen angewiesen.

Bei der Modellierung wurden für das Szenario I „Klima wärmer“ folgende Annahmen getroffen, die detailliert in Tabelle 3 aufgeführt sind (Quelle: [6]):

- Im Jahr 2035 werden 71 Tage eine Tagesmitteltemperatur über 18.3 °C aufweisen, gleichzeitig steigt die Tagesmitteltemperatur an diesen Tagen an.

- Die Kühlgradtage steigen von heute 122 auf 236 im Jahre 2035. Da der Kühlleistungsbedarf in erster Näherung proportional zu den Kühlgradtagen ist, bedeutet dies bei konstanter Technik eine Verdoppelung der erforderlichen Kühlarbeit.
- Der Ausstattungsgrad der Wohnungen bzw. Haushalte mit Klimageräten steigt von heute unter 1% auf 50% im Jahre 2035. Die klimatisierte Fläche steigt von 2 Mio. m² auf 191 Mio. m² in 2035.
- Es wird davon ausgegangen, dass sich in der Schweiz zentrale Klimaanlage im Wohnungsbau in den nächsten 30 Jahren nur selten finden werden, dass also die Klimatisierung im Wohnbereich mit überwiegender Mehrheit dezentral über Kompakt- oder Splitanlagen erfolgen wird.

Tabelle 3: **Die wichtigsten Annahmen im Haushaltsbereich bei Szenario I „Klima wärmer“.**

Um eine Kühlleistung von 30 W/m² bereitstellen zu können, sind 0.015 Geräte mit einer Leistung von 2 kW/m² notwendig. EBF: Energiebezugsfläche.

	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035
Wohnungen (1000)	3706	3863	4004	4132	4240	4339	4419
EBF (Mio m ²)	441	469	494	518	537	556	571
Kühlleistung (W/m ²)	30						
Vollbenutzungsstunden (h)	529						
Kühlgradtage	122						236
Kühlleistung*Vollbenutzungsstunden (kWh/m ²)	15.9						30.7
Leistungsziffer Klimageräte Neugerät	2.3	2.5	2.7	2.9	3.0	3.2	3.3
Leistungsziffer Klimageräte Bestand	2.3	2.3	2.4	2.5	2.7	2.9	3.0
spez.Verbrauch (kWh/m ² *a)	7.1	7.6	8.1	8.6	9.1	9.6	10.1
Geräte a 2 kW/m ²	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015
Sensitivität							
Anteil Wohnungen mit Klima (%)	1	13	23	32	39	45	50
Anteil klimatisierte Fläche/Wohnung (%)	33	40	47	53	58	63	67

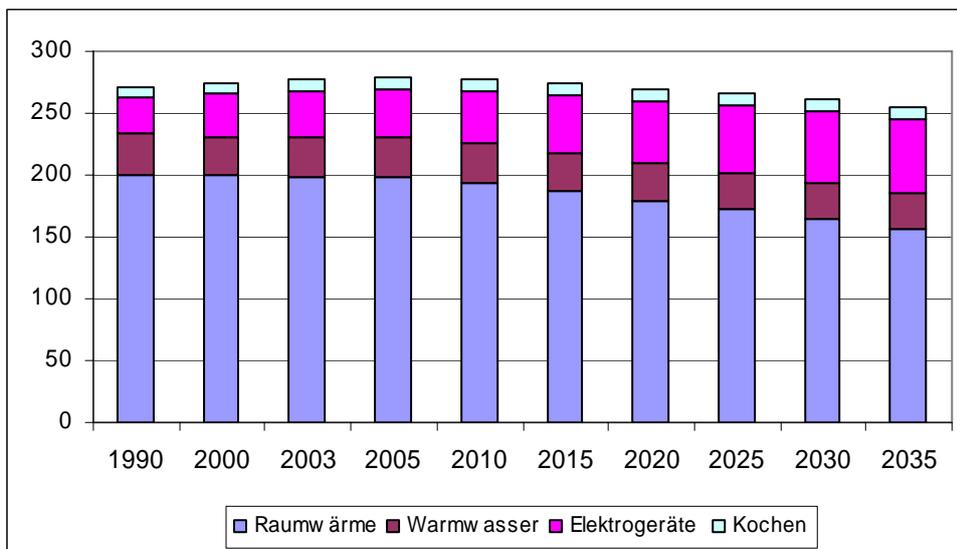
Quelle: [6].

4.1.1.2 Resultate

Figur 5 zeigt, dass die Reduktion des mittleren Heizwärme- und damit des Heizenergiebedarfs im Jahre 2035 gegenüber 2003 rund 10%, des Energiebedarfs für Warmwasser 1 – 2% (geringerer Rückgang wegen wahrscheinlich eher etwas grösseren Duschwasserverbrauchs) beträgt.

Auf der anderen Seite wird ein beträchtlicher Mehrverbrauch für Klimatisierung im Wohnbereich, sowie ein geringer Mehrverbrauch bei Kühl- und Gefriergeräten erwartet, da höhere Temperaturdifferenzen zu bewältigen sind.

Figur 5: Endenergieverbrauch nach Verwendungszwecken im Szenario I „Klima wärmer“, 1990 – 2035 in PJ.



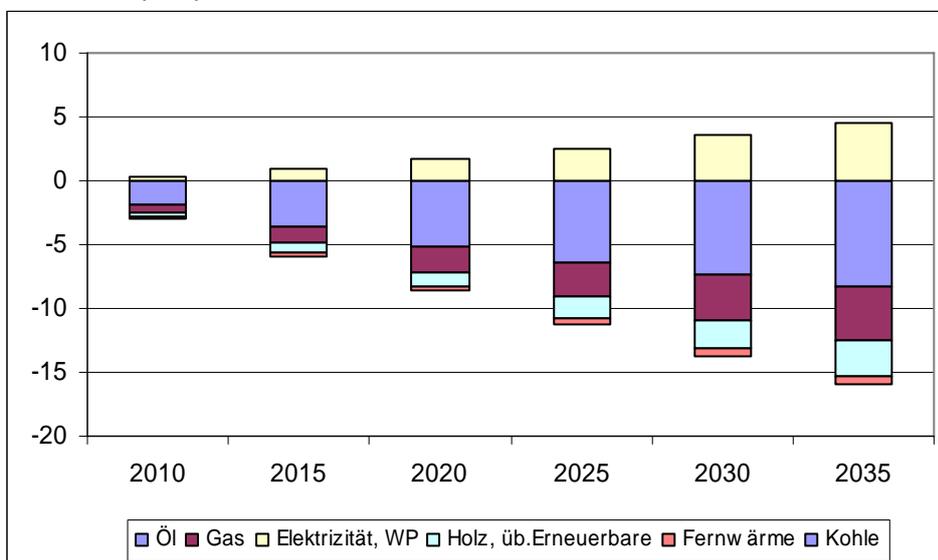
Quelle: [6].

Gegenüber dem Szenario I „Trend“ ist der Endenergieverbrauch im Jahre 2035 knapp 3% niedriger, da der Saldo aus verbrauchsreduzierendem Temperaturanstieg und den verbrauchssteigernden Effekten durch die zunehmende Nutzung von Klimageräten positiv ist.

Wie Figur 6 zeigt, ist der Verbrauch an Heizöl, Erdgas, Holz und Fernwärme niedriger. Deutlich höher ist jedoch der Elektrizitätsverbrauch. Der Elektrizitätsverbrauch liegt im Haushaltsektor im Jahr 2035 10% über dem Szenario I „Trend“.

Figur 6: Veränderung des Energieverbrauchs in Szenario I „Klima wärmer“ nach Energieträgern gegenüber Szenario I „Trend“ in PJ.

WP: Wärmepumpe



Quelle: [6].

Der Energieverbrauch pro Energiebezugsfläche sinkt stärker als im Szenario I „Trend“ und die CO₂-Emissionen sind ohne Bewertung der Elektrizität knapp 9% tiefer als Folge des geringeren Verbrauchs von fossilen Energieträgern.

4.1.2 Andere Sektoren

Nachfolgend werden für die anderen Sektoren spezifische Ergänzungen angebracht.

4.1.2.1 Industrie

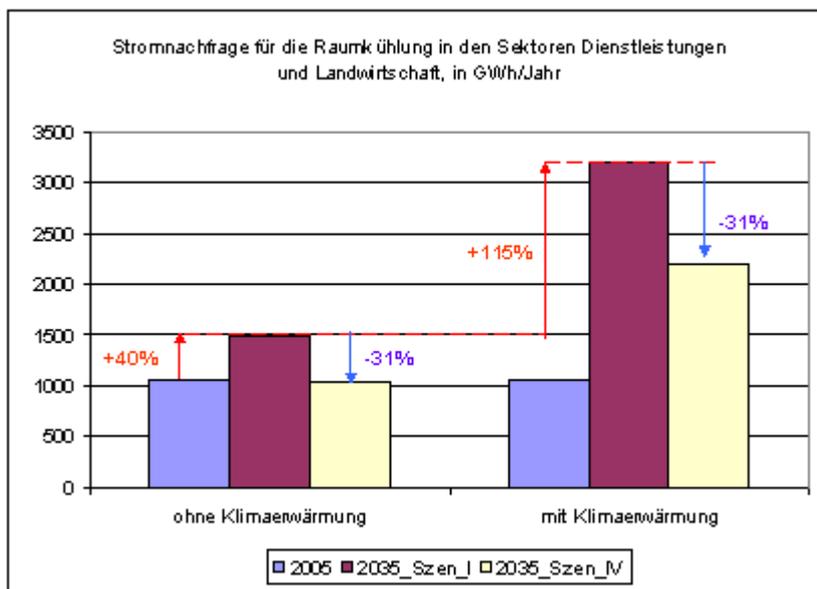
Nebst dem geringeren Verbrauch an Raumwärme während der Heizperiode und dem zusätzlichen Kühlungsbedarf während des Sommers, ergibt sich noch eine Reduktion des Prozesswärmebedarfs, doch ist diese sehr klein und wurde deshalb vernachlässigt.

Offen bleibt die Frage, wie die industrielle Produktion auf ein wärmeres Klima durch andere Produkte und/oder eine andere zeitliche Staffelung der Produktion reagieren könnte. Diese Frage dürfte vermutlich aber erst im zweiten Teil des 21. Jahrhunderts an Bedeutung gewinnen, wenn die Temperaturerhöhung weit stärkere Dimensionen annehmen wird (Quelle: [3]).

4.1.2.2 Dienstleistungen und Landwirtschaft

Im Dienstleistungssektor liegt der Stromverbrauch im Jahr 2035 etwa 9% über Szenario I „Trend“ (Quelle: [1]). Dabei sind vor allem der höhere spezifische Stromverbrauch infolge der höheren durchschnittlichen Temperatur und das schnellere Wachstum der teil- und vollklimatisierten Flächen zu berücksichtigen. Dabei ist die Zunahme zu 40% auf die Temperaturerhöhung und die damit verbundene Erhöhung der Kühlgradtage und zu 60% auf das Wachstum der gekühlten Flächen zurückzuführen. Dies führt dazu, dass sich der Anteil des Stromverbrauchs zur Raumkühlung an der Gesamtstromnachfrage im Dienstleistungssektor im Jahre 2035 von 6.5% im Szenario I „Trend“ auf 13.1% bei Szenario I „Klima wärmer“ erhöht, was gegenüber 2005 einem Mehrverbrauch von 2.1 TWh entspricht (siehe Figur 7).

Figur 7: Mögliche Entwicklung des Strombedarfs 2005-2035 für die Raumkühlung im Schweizer Dienstleistungssektor.



Quelle: [2]

4.1.2.3 Verkehr

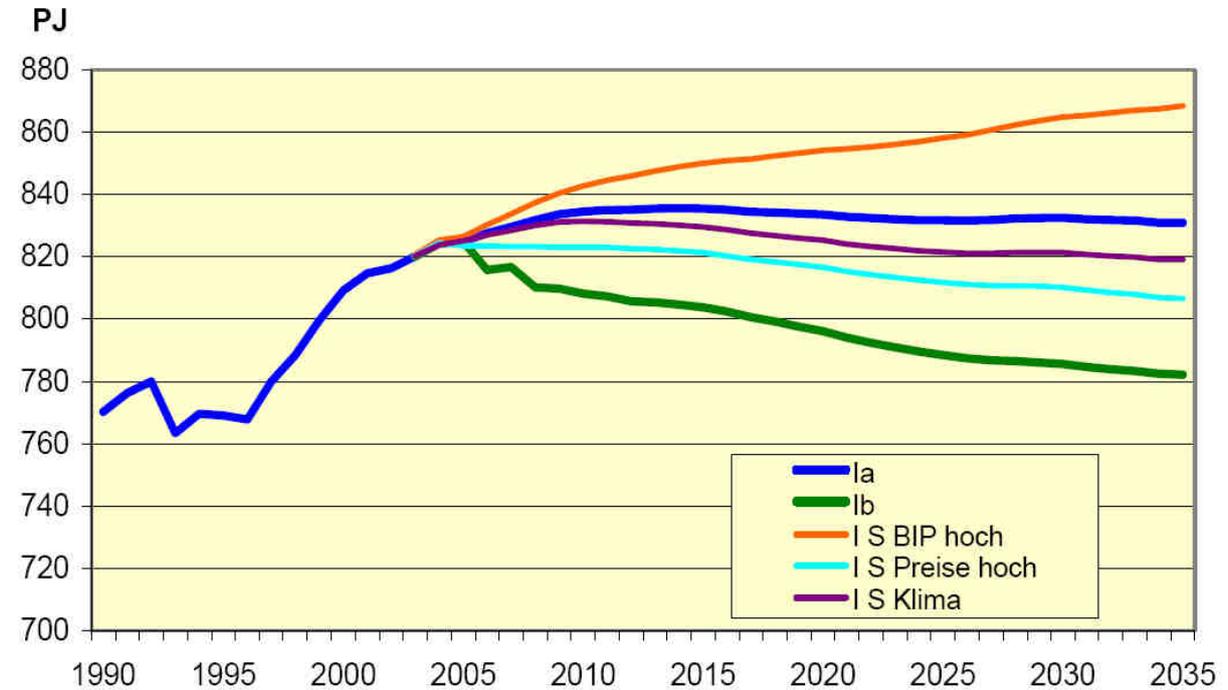
Im Verkehr beschränkt sich ein wärmeres Klima hauptsächlich auf den verstärkten Einsatz von Klimaanlagen. Da aber bereits heute rund 70% der Fahrzeugkilometer in der Schweiz von Personenwagen mit Klimaanlage zurückgelegt werden und der Ausstattungsgrad von neuen Personenwagen über 90% beträgt, fällt der zusätzliche Energieverbrauch gegenüber Szenario I „Trend“ gering aus. Auf die Schweiz hochgerechnet, beträgt der durch Klimaanlagen verursachte Mehrenergieverbrauch rund 4% des durch Personenwagen bedingten Treibstoffverbrauchs. Eine Temperaturerhöhung um +2 °C entspricht einer Erhöhung des Basiseffektes um rund 10%, also 0.4% (Quelle: [10]).

4.2 Endenergie- und Stromnachfrage

Eine Klimaerwärmung führt in allen Sektoren mit Ausnahme des Verkehrs im Vergleich zum Szenario I „Trend“ zu einem tieferen Gesamtendenergieverbrauch, wobei sich bis 2035 die Effekte im Haushaltssektor mit minus 3% am stärksten auswirken. Figur 8 zeigt die aggregierten Resultate auch für weitere

Sensitivitäten. Dabei zeigt sich, dass eine CO₂-Abgabe (Szenario Ib), gefolgt von deutlich höheren Preisen für fossile Energieträger (Szenario I „Preise hoch“) den gesamten Endenergieverbrauch stärker reduzieren als die Temperaturerhöhung.

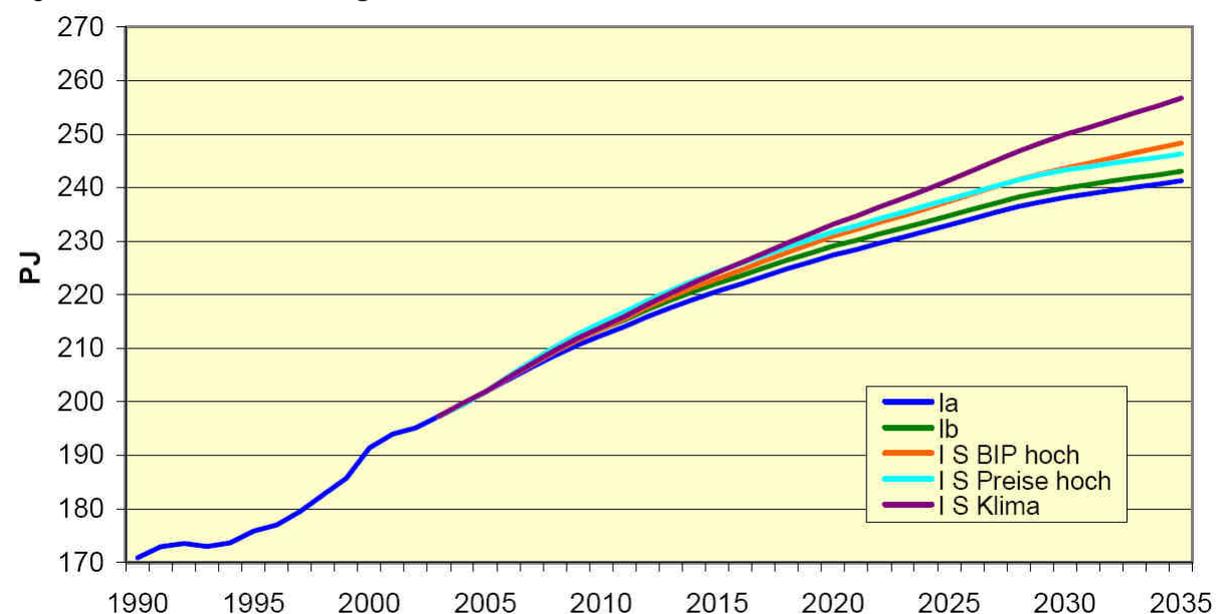
Figur 8: Endenergienachfrage in PJ für Szenario I mit den verschiedenen Sensitivitäten.



Quelle: [11].

Beim Elektrizitätsverbrauch, der im Szenario I „Trend“ zwischen 2003 und 2035 bereits um gut 22% zunehmen wird, führt eine Klimaerwärmung in Folge des stark zunehmenden Kühlbedarfs in allen Sektoren mit Ausnahme des Verkehrs zu einer noch deutlicheren Erhöhung des Verbrauchs, so dass gegenüber 2003 mit einem Mehrverbrauch von 30% zu rechnen ist. Am stärksten ist diese im Haushalts- und im Dienstleistungsbereich. Aus Figur 9 wird ersichtlich, dass der Stromverbrauch auch bei höherem Wirtschaftswachstum („BIP hoch“) sowie höheren Preisen für fossile Energien („Preise hoch“) steigt, wobei der Anstieg beim wärmeren Klima mit Abstand am deutlichsten ausfällt.

Figur 9: Elektrizitätsnachfrage in PJ für Szenario I mit den verschiedenen Sensitivitäten.



Quelle: [11].

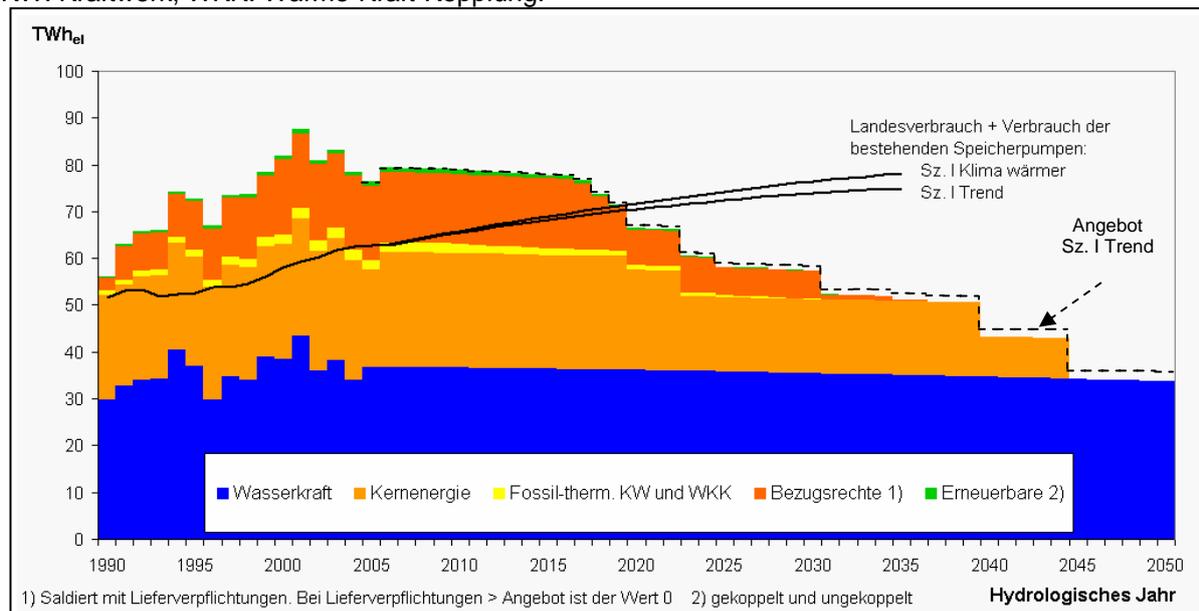
5. Fazit

Eine Klimaerwärmung setzt gegenläufige Trends in Gang. Wird das Energiesystem ohne Umwandlungssektor betrachtet, so kann von einer Reduktion des Verbrauchs und des CO₂-Ausstosses ausgegangen werden, was für ein Land wie die Schweiz, das keine wesentlichen fossilen Rohstoffe besitzt, zu einer etwas geringeren Auslandsabhängigkeit führt.

Betrachtet man allerdings die Entwicklung der Stromnachfrage und des –angebots, so ist die Situation besorgniserregend, da bei gleichzeitiger Nachfragerhöhung die Wasserkraftproduktion zusätzlich zu schrumpfen droht, so dass sich die ab 2020 drohende Angebotslücke noch akzentuiert. Figur 10 zeigt die Entwicklung der Stromnachfrage und des –angebots für das Szenario I „Trend“ und die Sensitivität „Klima wärmer“.

Figur 10: Darstellung der Stromnachfrage und des –angebots für Szenario I Trend (Sz I) und die Sensitivität Klima wärmer.

KW: Kraftwerk, WKK: Wärme-Kraft-Kopplung.



Quelle: Prognos.

Im Rahmen des Szenario I, das heisst bei einer Politik „weiter wie bisher“ und mit einer Rahmenentwicklung „Klima wärmer“ kann die Lücke nur durch Importe, den Zubau von fossil-thermischen Kraftwerken oder Kernkraftwerken geschlossen werden. Inländische fossil-thermische Kraftwerke würden die momentan in der Stromproduktion günstige CO₂-Bilanz der Schweiz beeinträchtigen.

6. Literatur

- [1] Aebischer B.: Energieverbrauch der Dienstleistungen und Landwirtschaft: Ergebnisse der Szenarien Ia und Ib (Stand 15.8.2005). Cepe, Zürich, 2005. Erhältlich unter <http://www.energie-perspektiven.ch/>.
- [2] Aebischer B. und G. Catenazzi: Energieverbrauch der Dienstleistungen und der Landwirtschaft. Ergebnisse der Szenarien I-IV. Schlussbericht. Bundesamt für Energie, Bern, 2006.
- [3] Baumgartner W.: Energieverbrauch Industrie: Ergebnisse der Szenarien Ia und Ib (Stand 15.7.2005). Basics, Zürich, 2005. Verfügbar unter <http://www.energie-perspektiven.ch/>.
- [4] Bundesamt für Energie: Schweizerische Elektrizitätsstatistik 2004. Bern, 2005.
- [5] Frei Ch.: Die Klimazukunft der Schweiz – Eine probabilistische Projektion. Zürich, 2004. Erhältlich unter <http://www.occc.ch/Products/CH2050/CH2050-Scenarien.pdf> (Stand 31.01.06).
- [6] Hofer P.: Der Energieverbrauch der Privaten Haushalte 1990 – 2035: Ergebnisse der Szenarien I a Trend und I b Trend und der Sensitivitäten Preise hoch, BIP hoch und Klima wärmer (Stand 08.08.2005). Prognos, Basel, 2005. Erhältlich unter <http://www.energie-perspektiven.ch/>.
- [7] Hofer P.: Einfluss von Temperatur- und Globalstrahlungsschwankungen auf den Energieverbrauch der Gebäude. Interner Bericht. Prognos, Basel, 2003.
- [8] Hohmann R., U. Neu: Klimaentwicklung in der Schweiz bis 2050. OcCC, Bern, 2004. Erhältlich unter <http://www.energie-perspektiven.ch/>.
- [9] Horton, P. et. al.: Prediction of climate change impacts on Alpine discharge regimes under A2 and B2 SRES emission scenarios for two future time periods. Bundesamt für Energie, Energiewirtschaftliche Grundlagen, Bern, 2005. Erhältlich unter <http://www.energie-perspektiven.ch/>.
- [10] Keller M.: Energieverbrauch Sektor Verkehr: Ergebnisse der Szenarien Ia und Ib (Stand 30.7.2005). Infrac, Bern, 2005. Erhältlich unter <http://www.energie-perspektiven.ch/>.
- [11] Kirchner A.: Energieperspektiven Schweiz 2035/2050: Energienachfrage in den Sensitivitäten zu Szenario I. Interner Bericht. Prognos, Basel, 2005.
- [12] Kirchner A., V. Rits: Resultate Sensitivität Klima wärmer. Interner Bericht. Prognos, Basel, 2006.
- [13] Laufer, F. et. al.: Ausbaupotential der Wasserkraft. Bundesamt für Energie, Energiewirtschaftliche Grundlagen, Bern, 2004. Erhältlich unter <http://www.energie-perspektiven.ch/>.
- [14] Piot, M.: Auswirkungen der Klimaerwärmung auf die Wasserkraftproduktion in der Schweiz. Wasser Energie Luft, Heft 11/12, pp. 365-367. Baden, 2005.
- [15] Schaepli, B.: Quantification of modeling uncertainties in climate change impact studies on water resources: application to a glacier-fed hydropower production system in the Swiss Alps. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, 2005. Erhältlich unter: <http://library.epfl.ch/theses>.
- [16] Schaepli, B. et. al. : Impacts potentiels d'un changement climatique sur les régimes hydrologiques alpins. Wasser, Energie, Luft, Heft 11/12, Baden, 2005.
- [17] Schär, Ch. et. al.: The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. Nature, 2004.
- [18] SwissTopo: Digitale Landeskarten der Schweiz - Massstab 1:25'000, Wabern, 1997.
- [19] Warthmann P: Energie sparen dank Free Cooling. HK-Gebäudetechnik 5/06, Aarau 2006.