

Die Anfälligkeit des Elektrizitätssystems europäischer Staaten gegenüber dem Klimawandel

Daniel R. KLEIN^{1*}, Mady OLONSHECK^{1*x}, Carsten WALTHER¹,
Jürgen P. KROPP^{1,2}

¹Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, P.O. Box 601203, 14412 Potsdam, Germany

²Institut für Erd- und Umweltwissenschaften, Universität Potsdam, Am Neuen Palais 10,
14469 Potsdam, Germany

^xTelefonnr: +49/0331/288-2579, Faxnr: +49/0331/288-20709, Email:
Mady.Olonscheck@pik-potsdam.de

Kurzfassung: Aufgrund der starken Verknüpfung von Wetter und Stromproduktion und –verbrauch, ist das Elektrizitätssystem besonders anfällig gegenüber klimatischen Veränderungen. Auf der Basis von 14 quantitativen Einflussfaktoren erstellen wir für 21 europäische Länder einen relativen Index, der es Stakeholdern ermöglicht, die Haupteinflussfaktoren für die Anfälligkeit des Elektrizitätssystem ihres Landes zu identifizieren und geeignete Anpassungsmaßnahmen zu treffen, um diese Anfälligkeit in der Zukunft zu reduzieren. Weitere Analysen auf der Basis zeitlich höher aufgelöster Daten sollen helfen, das Wissen hinsichtlich des Zusammenhanges zwischen Klimawandel und den Elektrizitätssystemen unterschiedlicher Länder zu erweitern und zu vertiefen.

Keywords: projizierter Temperaturanstieg, Klimaanlage, Strommix, Energieträger

1 Hintergrund

Der Klimawandel wird die Elektrizitätssysteme in der Zukunft in vielerlei Hinsicht beeinflussen. Hierzu zählen neben Auswirkungen v. a. von klimawandelbeeinflussten Extremwetterereignissen auf die physische Versorgungsinfrastruktur auch Effekte auf Stromproduktion, –verbrauch, -import und -export. Letztere werden in der vorliegenden Studie analysiert und sind gemeint, wenn wir vom Elektrizitätssystem sprechen. Obwohl der Klimawandel weit mehr ist als ein bloßer Anstieg der zukünftigen Temperatur, werden andere Einflüsse wie der Meeresspiegelanstieg oder veränderte Niederschlagsmuster hier vernachlässigt. Zwar werden alle 21 betrachteten Länder in der Zukunft von einem Temperaturanstieg betroffen sein, aber die Anfälligkeit ihrer Elektrizitätssysteme hängt sehr stark von dessen Ausmaß sowie länderspezifischen Charakteristika wie Strommix und Heiz- und Kühlgewohnheiten ab. Diese Aspekte versuchen wir durch eine Vielzahl von quantitativen Einflussfaktoren zu berücksichtigen.

2 Methodik

Die Anfälligkeit des Elektrizitätssystems verschiedener Länder gegenüber dem Klimawandel wird durch einen relativen Index ermittelt, welcher auf verschiedenen Einflussfaktoren beruht.

2.1 Daten

Monatliche Elektrizitätsdaten pro Land für den Zeitraum 2000-2011 [1] umfassen Angaben zur Produktion nach Energieträger, Import, Export und Stromabnahme [2]. Wir verwenden darüber hinaus Tagesdurchschnittstemperaturen des Zeitraums 2000-2011 [3], mit einer Gridzellenauflösung von 0,25°, welche wir monatsweise mitteln. Da die den Strom nutzenden Menschen in vielen Ländern nicht gleichmäßig über die Staatsfläche verteilt sind, gewichten wir gerasterte Bevölkerungsdaten [4] mittels ArcGIS gemäß der folgenden Gleichung:

$$T_{weigh,k} = \sum_{j=1}^{n_k} T_{j,k} \cdot \frac{POP_{j,k}}{\sum_{j=1}^{n_k} POP_{j,k}}$$

wobei $T_{weigh,k}$ die bevölkerungsgewichtete durchschnittliche Monatstemperatur ist, n_k die Gesamtanzahl Gridzellen pro Land, j die jeweilige Gridzelle, k das betrachtete Land, $T_{j,k}$ die durchschnittliche Monatstemperatur und $pop_{j,k}$ die Bevölkerung des betrachteten Landes.

Daten von neun globalen Klimamodellen zu projizierten Temperaturveränderungen zwischen 1961-90 und 2070-99 [5] werden gleich gewichtet gemittelt. Länderbasierte Daten zur Anzahl Klimaanlage pro Kopf haben wir ebenfalls verwendet [6]. Aufgrund des nichtlinearen Zusammenhanges zwischen Stromerzeugung bzw. -verbrauch und der Temperatur unterteilen wir die Temperaturdaten in einen Heizbereich, für eine Monatsmitteltemperatur unter 12°C [7,8], einen Kühlbereich ab 21°C [9,10] und einen Bereich dazwischen, in welchem kein heiz- oder kühlungsbezogener Strom verbraucht wird. Die verwendeten Länderkürzel sind der Kodierliste 3166-1 alpha-2 der Internationalen Organisation für Normung (ISO) entnommen. Für erste Analysen auf der Basis von Tagesdaten haben wir beispielhaft Temperatur- und Stromverbrauchsdaten von Frankreich und Griechenland für den Zeitraum 2006 bis 2012 verwendet.

2.2 Einflussfaktoren

Die genutzten Einflussfaktoren werden in fünf Kategorien unterteilt, wobei grün markierte Faktoren die Anfälligkeit verringern und rote zu einer Zunahme derselben führen (Abb.1):

Momentane Einflussfaktoren der Anfälligkeit			
Kategorie 1	Heizen – Anstieg der Geraden zwischen Produktion ~Temperatur	Kühlen – Anstieg der Geraden zwischen Produktion ~Temperatur	Heizen – Anstieg der Geraden zwischen Verbrauch ~Temperatur
			Kühlen – Anstieg der Geraden zwischen Verbrauch ~Temperatur
Kategorie 2	Sommer – Korrelation Produktion ~Verbrauch	Winter – Korrelation Produktion ~Verbrauch	Sommer – Differenz Produktion ~ Verbrauch
			Winter – Differenz Produktion ~ Verbrauch
Kategorie 3			Anteil Produktion aus herköm. Energien (2011)
			Delta Anteil herköm. Produktion (2000-2011)
Kategorie 4			Projektion Anteil Klimaanlage (2030)
			Delta Anteil Klimaanlage (2005-2030)
Kategorie 5		Winter – Projizierter Temperaturanstieg	Sommer – Projizierter Temperaturanstieg

Abbildung 1: Verwendete Einflussfaktoren, welche die Anfälligkeit verringern (grün) oder erhöhen (rot).

2.2.1 Kategorie 1: Anstieg der Regressionsgeraden zwischen Temperatur und Stromproduktion bzw. -verbrauch auf der Heiz- und Kühlseite

Diese vier Einflussfaktoren sagen etwas über die Stärke des Zusammenhanges zwischen Temperatur und Stromproduktion bzw. -verbrauch für die Bereiche Heizen (1.1 und 1.3) und Kühlen (1.2 und 1.4) aus. Pro Einflussfaktor wird je Land die Differenz vom jeweiligen Jahresmittel der Stromdaten verwendet, um deren bevölkerungs- und GDP-bedingten Anstieg über die Zeit herauszurechnen und eine Vergleichbarkeit zwischen den Ländern zu ermöglichen. Je steiler der Anstieg der Geraden durch die Datenpunkte, desto stärker ist die Auswirkung auf die Strommenge je Kelvin Temperaturveränderung. Unterhalb der Heizgrenze wird für eine steile Gerade eine verringerte Anfälligkeit angenommen, weil der Stromverbrauch in solch einem Fall bei einem Temperaturanstieg stärker sinkt als bei einem Land mit einem flacheren Anstieg der Geraden. Wir betrachten solche Länder, in denen monatliche Mitteltemperaturen in der Vergangenheit die Kühlgrenze überschritten haben und solche mit einer steilen Geraden zwischen den Datenpunkten auf der Kühlseite als anfälliger.

2.2.2 Kategorie 2: Korrelation & Differenz zwischen Stromproduktion und -verbrauch

Länder mit einer starken Spearman-Korrelation zwischen Stromproduktion und -verbrauch, welche wir jeweils für den Sommer (JJA) und Winter (DJF) ermitteln, werden als weniger anfällig angesehen, da sie einfacher auf Änderungen in Verfügbarkeit von und Nachfrage nach Strom reagieren können (2.1 und 2.2). Da diese beiden Einflussfaktoren nicht berücksichtigen wie groß die Differenz zwischen Produktion und Verbrauch ist, kann es vorkommen, dass ein Land einen geringen Wert für diese Einflussfaktoren hat, in der Realität aber sehr wohl Verbrauchsschwankungen kompensieren kann, da seine Stromproduktion den -verbrauch deutlich übersteigt. Die beiden anderen Einflussfaktoren (2.3 und 2.4) dieser Kategorie berücksichtigten diesen Aspekt, indem hier betrachtet wird, welche Länder in welchem Ausmaß Nettoproduzenten und welche Nettoverbraucher sind. Produziert ein Land im Durchschnitt mehr Strom als es benötigt, kann es als weniger anfällig gegenüber (klimatischen) Veränderungen betrachtet werden. Für unsere Analyse haben wir die Länder in Netto-Produktions- (Werte größer 1) und Netto-Verbrauchsländer (Werte kleiner 1) unterteilt und diese Untergruppen jeweils mit dem Maximalwert der Gruppe normalisiert.

2.2.3 Kategorie 3: Anteil der Stromproduktion aus herkömmlichen Kraftwerken

Bestimmte Energieträger sind von den Auswirkungen des Klimawandels potenziell stärker betroffen als andere. In zahlreichen Studien wurden fossile und nukleare Energieträger (hier als herkömmliche Energieträger bezeichnet), u. a. aufgrund ihrer Kühlwasserabhängigkeit als besonders vulnerabel identifiziert [11,12]. Daher betrachten wir ein Land als besonders anfällig, wenn es einen großen Teil seiner Stromproduktion mithilfe herkömmlicher Kraftwerke deckt (3.1) und dieser Anteil im betrachteten Jahrzehnt nur wenig ab oder sogar zugenommen hat (3.2).

2.2.4 Kategorie 4: Verfügbarkeit von Klimaanlageanlagen

Sowohl der zu erwartende Anteil Klimaanlageanlagen pro Land im Jahre 2030 (4.1) als auch der potenzielle Anstieg dieses Anteils zwischen 2005 und 2030 (4.2) liefern Informationen über mögliche Änderungen des Stromverbrauchs in der Zukunft. Für beide Einflussfaktoren führen hohe Werte zu einer erhöhten Anfälligkeit des Elektrizitätssystems. Aufgrund von fehlenden

Daten haben wir diese Kategorie bei der Indexberechnung für Norwegen und die Schweiz vernachlässigt.

2.2.5 Kategorie 5: Projizierter Temperaturanstieg im Winter und Sommer

Da der zu erwartende zukünftige Winter- und Sommertemperaturanstieg (5.1 und 5.2) abhängig vom betrachteten Land sehr unterschiedlich ausfallen wird, ist es sinnvoll, diesen Faktor zu berücksichtigen. Wir nehmen an, dass projizierte Temperaturanstiege im Sommer die Anfälligkeit erhöhen, weil sie einen Anstieg des Kühlenergiebedarfs verursachen, während Temperaturanstiege im Winter zu einer Verringerung der Nachfrage führen werden.

2.2.6 Kategorie 6: Importe und Exporte

Eine sechste Gruppe umfasst die beiden Einflussfaktoren Sommer- und Winterdifferenz zwischen Importen und Exporten. Das Elektrizitätssystem eines Landes gilt als umso anfälliger, je mehr Strom das Land importieren muss, weil dies ein Zeichen für unzureichende Produktionskapazitäten ist und die Abhängigkeit von anderen Ländern erhöht. Diese Kategorie 6 haben wir allerdings aufgrund der Ergebnisse einer Korrelationsanalyse ausgeschlossen, da hier eine hohe Korrelation (Spearman correlation > 0.95) mit der Sommer- und der Winterdifferenz zwischen Produktion und Verbrauch besteht.

2.3 Indexberechnung

Jeder Einflussfaktor wird mit dem Maximalwert aller Länder normalisiert, wobei solche, die die Anfälligkeit verringern, Werte zwischen -1 und 0 zugewiesen bekommen und solche, die die Anfälligkeit erhöhen, Werte zwischen 0 und 1 besitzen. Basierend auf einer Gleichgewichtung der 14 Einflussfaktoren ergibt sich der relative Anfälligkeitsindex pro Land.

2.4 Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse basiert auf einer Methode von Fraiman et al. [13] und wurde mit folgender Formel durchgeführt:

$$Sen_i = \sum_{k=1}^m [I_{i,k} - I_k]^2$$

wobei Sen_i die Sensitivität für einen Einflussfaktor darstellt, m die Gesamtanzahl der Einflussfaktoren, $I_{i,k}$ den Indexwert für Land k bei Vernachlässigung des Einflussfaktors i und I_k den ursprünglichen Indexwert unter Berücksichtigung aller Einflussfaktoren.

3 Ergebnisse

Trotz naturgemäß unterschiedlicher Größenordnung und Spannweite, zeigen doch alle Länder einen typisch europäischen Jahrestemperaturverlauf mit Maximalwerten in den Sommermonaten Juni, Juli, August und Minimalwerten im Dezember, Januar und Februar. Finnland besitzt über das Jahr betrachtet die größte Amplitude der Mitteltemperatur mit mehr als 30 Kelvin, während diese in Ländern wie Portugal und Irland nur bei etwa 17 Kelvin liegt. Mit einer Ausnahme, Ungarn, befinden sich alle Länder, welche die Kühlgrenze überschreiten, am Mittelmeer.

3.1 Kategorie 1: Anstieg der Geraden zwischen Temperatur und Produktion bzw. Verbrauch

Auf der Heizseite verringert ein steiler Anstieg der Geraden die Vulnerabilität, auf der Kühlseite erhöht sich diese bei einer starken Steigung. Auf der Kühlseite zeigen besonders

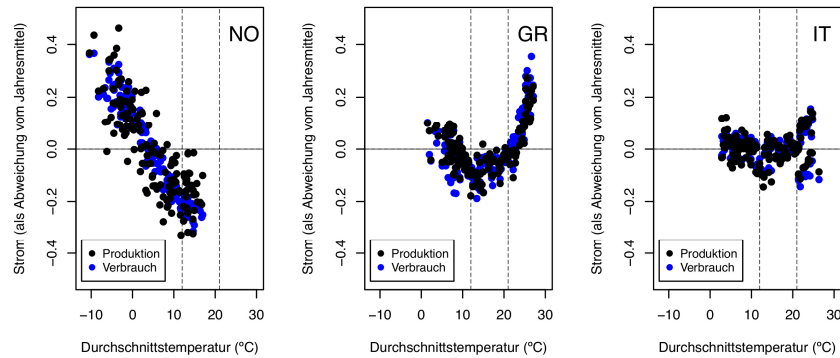


Abbildung 2: Zusammenhang zw. Mitteltemperatur und Stromproduktion bzw. -verbrauch je Monat.

Griechenland (Abb. 2), Spanien und Portugal eine hohe Anfälligkeit, da die durchschnittliche Temperatur in diesen Ländern in vielen Monaten die Kühlgrenze überschreitet. Für die Einflussfaktoren auf der Heizseite haben neben den skandinavischen Ländern (bspw.

Norwegen, Abb. 2) auch Portugal, Frankreich und Großbritannien eine geringe Anfälligkeit, da sie einen relativ steilen Anstieg der Gerade aufweisen. Italien (Abb. 2) hat sowohl auf der Heiz- als auch Kühlseite einen außergewöhnlich flachen Verlauf der Gerade, d.h. Stromproduktion und -verbrauch sind relativ temperaturunabhängig.

3.2 Kategorie 2: Korrelation und Differenz zwischen Stromproduktion und -verbrauch

Sowohl für den Sommer als auch den Winter ergeben sich für Spanien (Abb. 3) und Großbritannien starke Korrelationen zwischen Stromproduktion und -verbrauch. Die Slowakei und die Schweiz hingegen weisen nur schwache Korrelationen auf. Außergewöhnlich sind Länder wie Österreich, in welchen im Winter eine schwache Korrelation zwischen Produktion und Verbrauch besteht, im Sommer hingegen eine starke. Bezüglich der Differenz zwischen Produktion und

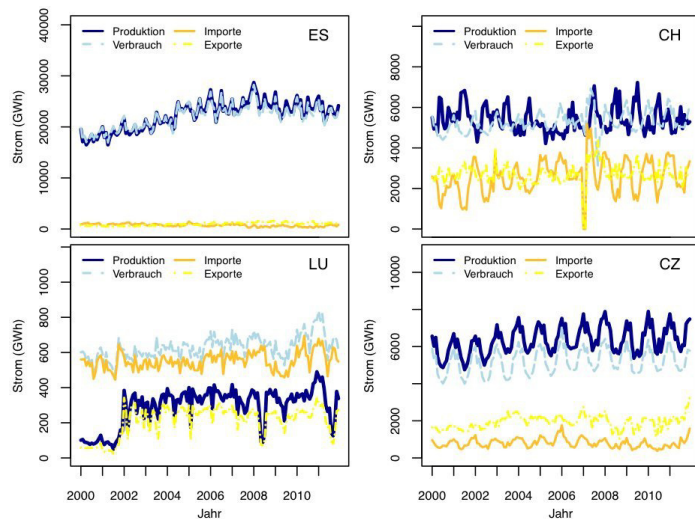


Abbildung 3: Stromproduktion, -verbrauch, -export und -import.

Verbrauch von Strom ist Luxemburg das extremste Beispiel für ein Netto-Verbrauchsland sowohl im Sommer als auch im Winter, denn es deckt nur etwa die Hälfte seiner Nachfrage durch inländische Produktion (Abb. 3). Tschechien und Frankreich hingegen sind das ganze Jahr über Netto-Stromproduzenten. In der Mehrzahl der Länder wird abhängig von der Jahreszeit entweder mehr verbraucht oder produziert. Österreich und die Schweiz sind Netto-Produzenten im Frühling und Sommer und Netto-Konsumenten im Rest des Jahres. Dänemark verbraucht nur im Sommer mehr Strom als es produziert.

3.3 Kategorie 3: Anteil der Stromproduktion aus herkömmlichen Kraftwerken

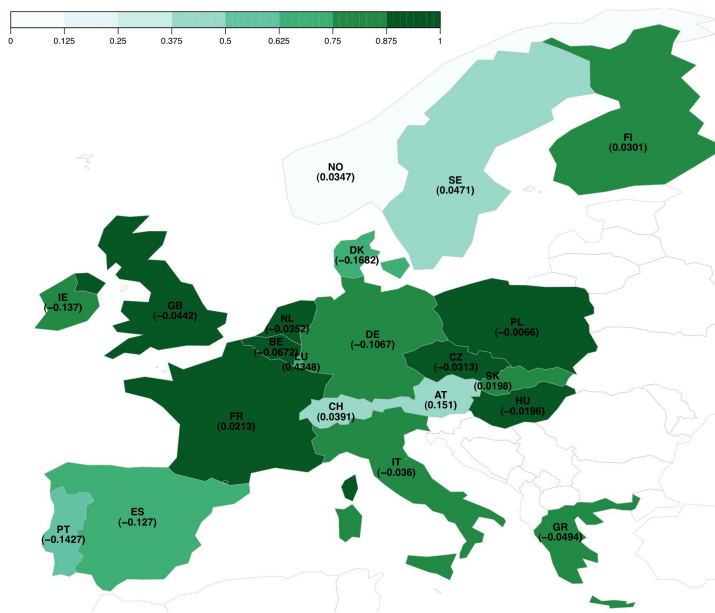


Abbildung 4: Anteil der Stromproduktion in fossilen und nuklearen Kraftwerken im Jahre 2011 (je dunkler ein Land, desto höher ist seine Anfälligkeit). Zusätzlich ist unter jedem Länderkürzel die Veränderung im Zeitraum 2000-2011 dargestellt.

Luxemburg und Frankreich sind die anfälligsten Länder bezüglich der Stromproduktion aus herkömmlichen Kraftwerken (Abb. 4). Bedingt durch die starke Zunahme bei der Nutzung fossiler und nuklearer Energieträger im letzten Jahrzehnt ist Luxemburg fast zweimal so anfällig wie Frankreich. Ungarn, Polen, die Niederlande, Tschechien und Großbritannien produzierten 2011 mehr als 95% ihres Stroms mithilfe herkömmlicher Energieträger. Mit der Ausnahme von Norwegen

(~4%) erzeugen alle Länder mehr als 45% ihres Stroms aus fossilen und nuklearen Energiequellen. Dänemark, Portugal und Irland sind v. a. aufgrund der deutlichen Abnahme des Anteils fossiler Energieträger bei der Stromproduktion zwischen 2000 und 2011 am wenigsten anfällig.

3.4 Kategorie 4: Verfügbarkeit von Klimaanlage

Länder wie Griechenland, die bereits über einen großen Anteil an Klimaanlage verfügen, werden in der Zukunft nicht mehr so eine starke Zunahme erleben (Abb. 5). In Italien, Griechenland und Spanien wird der Anteil Klimaanlage 2030 relativ groß sein, aber der Zuwachs beginnt bereits auf hohem Niveau. Unter den betrachteten Ländern stellt Portugal eine Ausnahme da, weil es momentan nur eine geringe Durchdringung mit Klimaanlage aufweist und bis 2030 kaum Zuwächse zu erwarten sind. In u.a. Finnland, Schweden und Großbritannien wird sich der Anteil Klimaanlage zwischen 2005 und 2030 mehr als verdreifachen. Trotz der nicht

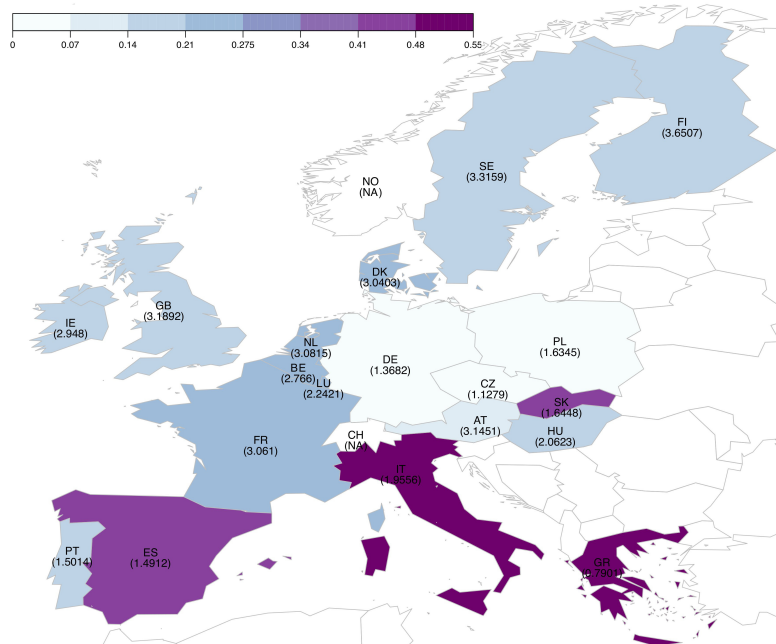


Abbildung 5: Projizierter Anteil Klimaanlage pro Kopf im Jahre 2030 (je dunkler ein Land, desto höher ist seine Anfälligkeit). Zusätzlich haben wir unter jedem Länderkürzel die erwartete Veränderung im Zeitraum 2005-2030 dargestellt.

außergewöhnlich hohen Temperaturen wird für die Slowakei im Jahre 2030 ein großer Klimalanlagenanteil pro Kopf angenommen.

3.5 Kategorie 5: Projizierter Temperaturanstieg

Die stärksten Wintertemperaturanstiege werden in der Zukunft für Finnland, Schweden, Norwegen und Polen erwartet,

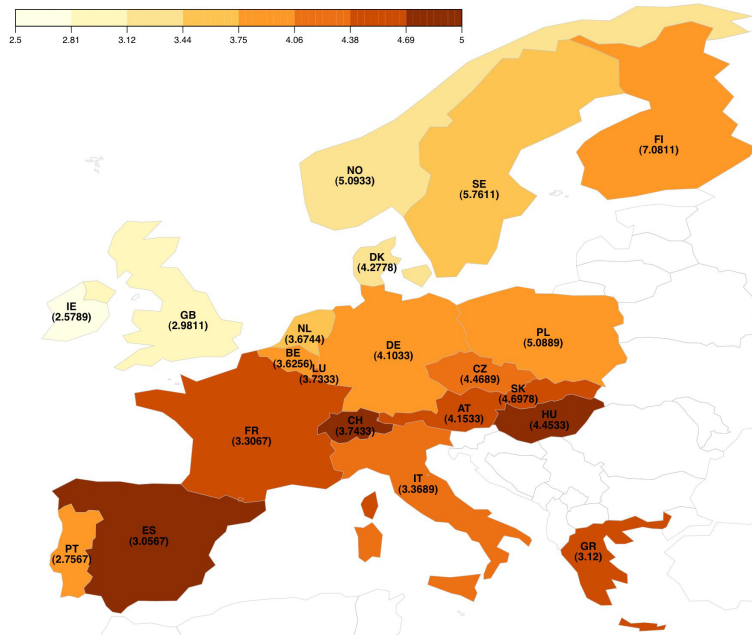


Abbildung 6: Projizierter Sommererwärmung in Kelvin zwischen 1961-90 und 2070-99 nach IPCC-Szenario A2 (je dunkler ein Land, desto höher ist seine Anfälligkeit). Zusätzlich haben wir unter jedem Länderkürzel den erwarteten Temperaturanstieg im Winter dargestellt (ein Land mit einem höheren Wert besitzt hier eine geringere Anfälligkeit).

was zu einer vergleichsweise geringen Anfälligkeit dieser Länder führt (Abb. 6). Dieser Einflussfaktor weist einen starken Nord-Süd-Gradienten auf. Die projizierten zukünftigen Sommererwärmungen sind für diese Länder niedriger als jene für den Winter. Die höchste relative Anfälligkeit ergibt sich im Sommer für die Länder mit dem größten erwarteten Temperaturanstieg - Spanien, Ungarn und die Schweiz. Für Sommer und Winter zeigen Irland und Großbritannien die geringste projizierte Erwärmung.

3.6 Relativer Anfälligkeitsindex

Aufgrund der Relativität des Anfälligkeitsindex (Abb. 7) sind keine Aussagen über die absolute Anfälligkeit des Elektrizitätssystems eines Landes möglich. Im Vergleich zu den anderen Ländern besitzt Luxemburg mit Abstand die höchste Anfälligkeit. Auch Griechenland, die Slowakei und Italien weisen eine hohe Anfälligkeit auf. Demgegenüber besitzen Norwegen, Tschechien und Portugal relativ betrachtet nur eine geringe Anfälligkeit ihres Stromsektors.

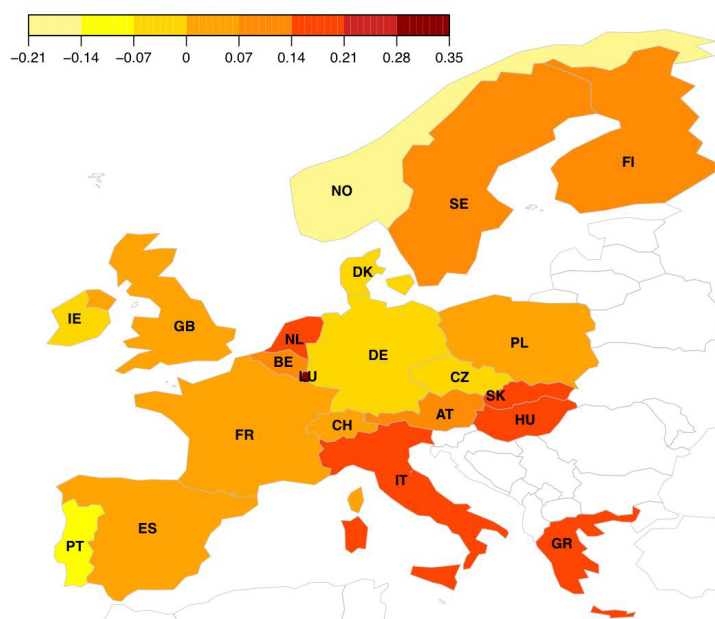


Abbildung 7: Relativer Anfälligkeitsindex (je dunkler ein Land, desto höher ist seine Anfälligkeit).

3.7 Sensitivitätsanalyse

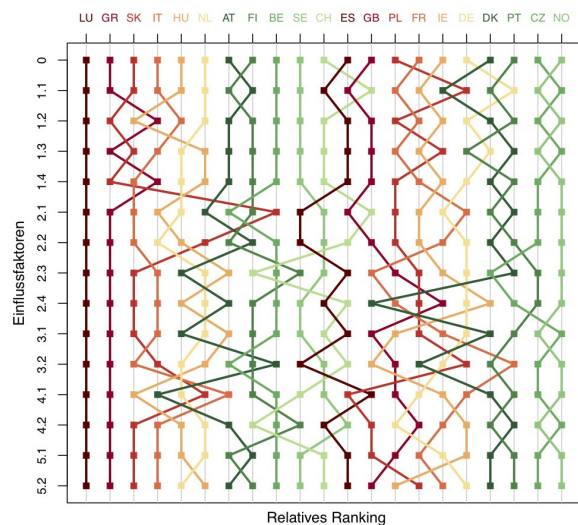


Abbildung 8: Sensitivitätsanalyse der Einflussfaktoren auf den relativen Anfälligkeitsindex (der Einflussfaktor 0 stellt das ursprüngliche Ranking dar).

Um den Einfluss der einzelnen Faktoren auf den Anfälligkeitsindex und damit das Ranking zu ermitteln, haben wir eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Diese ergab, dass der Index besonders anfällig ist gegenüber dem projizierten Sommertemperaturanstieg (Kategorie 5.2) und dem aktuellen Anteil der Stromproduktion mithilfe nuklearer und fossiler Energieträger (Kategorie 3.1). Den geringsten Einfluss auf das Ergebnis haben der Anstieg der Geraden zwischen Produktion bzw. Verbrauch und der Temperatur auf der Kühlseite (Kategorie 1.2 und 1.4), was dadurch bedingt sein kann, dass momentan lediglich fünf Länder die Kühlgrenze überschreiten. Der Anfälligkeitsindex von

Luxemburg ist am wenigsten sensitiv gegenüber dem Ausschluss bestimmter Einflussfaktoren (Abb. 8), während bspw. der von Dänemark oder der Slowakei sehr stark von den betrachteten Einflussfaktoren abhängt.

3.8 Erste Gedanken zur Ausweitung der Analyse auf Tagesdaten

Extremwetterereignisse wie der Hitzesommer 2003 hatten in vielen Ländern weitreichende Auswirkungen auf die Stromversorgung. Aufgrund der zeitlich sehr begrenzten Dauer solcher Phänomene erscheinen diese jedoch nicht in den Monatsdaten [11, 12, 14]. Daher wäre die Verwendung von Tagesdaten wie in Abbildung 9 sinnvoll. Hierbei ergeben sich jedoch einige Herausforderungen, denn Tagesstromverbrauchsdaten werden sehr stark von besonderen Ereignissen wie Feiertagen oder Ferien beeinflusst, die je nach Land und ggf. sogar Jahr unterschiedlich sind. Zudem hat fast jeder Wochentag ein eigenes Verbrauchsmuster. Die Auswahl einzelner Wochentage verringert die eigentlich gewünschte große Menge an Daten jedoch wieder erheblich.

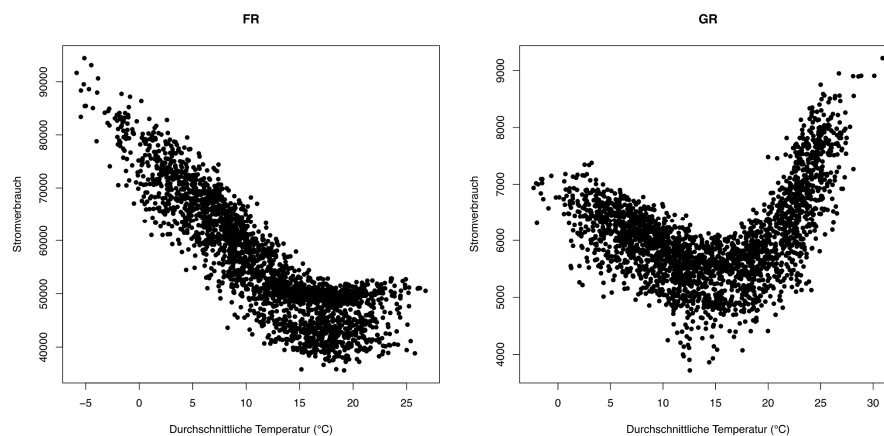


Abbildung 9: Zusammenhang zwischen Durchschnittstemperatur und Stromverbrauch mit Tagesdaten für den Zeitraum 2006-2012.

4 Diskussion und Schlussfolgerungen

In diesem Abschnitt werden einige Gründe für die unterschiedliche Anfälligkeit der Länder hinsichtlich ihres Stromnetzes benannt und diskutiert. Zudem werden Erweiterungsmöglichkeiten vorgestellt.

4.1 Diskussion der Ergebnisse

Norwegen und Tschechien sind die Länder mit der relativ gesehen geringsten Anfälligkeit des Elektrizitätssystems gegenüber dem Klimawandel und können daher anderen Ländern als Vorbild dienen. Bei der folgenden Betrachtung der wichtigsten Einflussfaktoren sollte allerdings berücksichtigt werden, dass der Indexwert für Norwegen bei Verfügbarkeit von Daten zum Anteil Klimaanlage höher wäre. Norwegen und insbesondere Tschechien produzieren sowohl im Sommer als auch im Winter mehr Elektrizität als sie verbrauchen. Vor allem in Norwegen wird der Anstieg der Wintertemperatur und der damit verbundene Rückgang des Strombedarfs wesentlich größer ausfallen als die Zunahme des stromgedeckten Kühlenergiebedarfs infolge höherer Sommertemperaturen. Auch in Tschechien wird der deutlich geringere projizierte Temperaturanstieg im Winter stärker ausfallen als im Sommer, was ebenfalls zu einem geringen Anfälligkeitsindex beiträgt. Da Norwegen's Elektrizitätsproduktion fast ausschließlich durch Wasserkraft gedeckt wird, welche im Zuge des Klimawandels aufgrund zunehmender Niederschläge weiter an Bedeutung gewinnen wird, besitzt das Land eine geringe Anfälligkeit bezüglich der Elektrizitätsproduktion. Obwohl Tschechien bedingt durch seinen großen Anteil fossiler und nuklearer Energieträger potenziell relativ anfällig gegenüber dem Klimawandel ist, verfügt das Land über große inländische Reserven an Kohle und Uran. Dies könnte die Versorgungssicherheit auch in der Zukunft gewährleisten.

Luxemburg und Griechenland besitzen relativ zu den anderen Ländern die höchste Anfälligkeit ihres Elektrizitätssystems. Beide Länder verbrauchen über das Jahr gesehen mehr Strom als sie erzeugen. Luxemburg ist besonders anfällig, da es nur weniger als die Hälfte seines Strombedarfs selber decken kann und daher sehr abhängig von Importen ist. Grund für diese Tatsache könnten die geringe Größe des Landes und der hohe industrielle Stromverbrauch sein. Sowohl Luxemburg als auch Griechenland produzieren einen großen Anteil ihres Stroms mithilfe nuklearer oder fossiler Energieträger, wobei die Anfälligkeit von Griechenland jedoch geringer ist, da das Land diesen Anteil im letzten Jahrzehnt deutlich verringert hat, wohingegen der von Luxemburg sogar stark anstieg. Da die Gerade des Anstiegs zwischen Produktion bzw. Verbrauch und Temperatur auf der Heizseite in Luxemburg nicht besonders steil ist, wird der projizierte Anstieg der Wintertemperatur nur zu einem leichten Rückgang des Strombedarfs führen. Griechenland, das bereits heute im Sommer viel Energie zum Betrieb von Klimaanlage benötigt, ist aufgrund des erwarteten Temperaturanstiegs in dieser Jahreszeit besonders anfällig. Bezüglich der Gründe für die Rankingposition anderer Länder verweisen wir auf [15].

Für fast alle betrachteten Länder ergibt sich für den Zeitraum 2000 bis 2011 ein ansteigender Trend bezüglich der Stromproduktion und –nutzung. Obwohl aufgrund der Kürze des Zeitraums nur schwer eindeutig verifizierbare Ursachen hierfür genannt werden können, scheint für viele Länder ein Anstieg der Bevölkerung eine mögliche Erklärung. Wenn auch in unterschiedlichem Maße zeigt sich für alle Länder eine auffällige Zunahme des

Stromverbrauchs zwischen Februar und März, welche durch die Zeitumstellung auf Sommerzeit verursacht wird. Zwar ist diese Maßnahme eigentlich dafür gedacht, den Elektrizitätsbedarf zu verringern, aber in den ersten zwei Wochen erhöht die noch vorhandene Dunkelheit am Morgen den Stromverbrauch für Heizen und Beleuchtung [16,17].

4.2 Schwächen der vorliegenden Studie

Jede wissenschaftliche Studie ist nur so gut wie die ihr zugrundeliegenden Daten. Die vorliegende Analyse könnte bei Verfügbarkeit der folgenden Informationen ggf. verbessert oder erweitert werden:

- Monatliche Daten zum Elektrizitätssystem, die über den Zeitraum 2000 bis 2011 hinausgehen.
- Daten für weitere (europäische) Länder.
- Quantitative Angaben zur Anfälligkeit unterschiedlicher Energieträger gegenüber dem Klimawandel.
- Ausreichende Informationen zur Berücksichtigung der Tatsache, dass der Zusammenhang zwischen Stromverbrauch bzw. –produktion und Temperatur v. a. auf der Kühlseite nicht linear ist.
- Aktuellere Informationen zum Anteil Klimaanlage pro Land, zur Häufigkeit der Nutzung sowie generell zur Durchdringungsrate in der Schweiz und Norwegen.
- Quantitative Daten zum monatlichen Anteil von Heizen, Kühlen und Beleuchtung am Stromverbrauch je Land.
- Adäquate Daten zu Stromspeicherkapazitäten für alle Länder, welche über Angaben zu Pumpspeicherkraftwerken hinausgehen.
- Verlässliche Informationen über politische Weichenstellungen pro Land und auf EU-Ebene in Bezug auf den zukünftigen Strommix.
- Genauere Informationen bezüglich der Entscheidungsprozesse von Ländern hinsichtlich des (preisbedingten) Imports von Strom trotz ausreichender Verfügbarkeit eigener Produktionsmengen.

Trotz der Komplexität der Anfälligkeit des Stromnetzes gegenüber dem Klimawandel ist uns mit der vorliegenden Studie gelungen, 21 europäische Staaten auf der Basis einer Vielzahl aktueller und zukünftiger quantitativer Einflussfaktoren bezüglich dieser Thematik zu untersuchen und zu ranken. Obwohl die Analyse auf bereits existierenden Studien aufbaut, ist sie doch hinsichtlich des Umfangs der betrachteten Länder und Einflussfaktoren ein wichtiger erster Schritt zu einem umfassenden Verständnis der potenziellen Auswirkungen des Klimawandels auf Stromverbrauch, -produktion, -export und -import in Europa. Die Ergebnisse ermöglichen es insbesondere Entscheidungsträgern jene Einflussfaktoren zu identifizieren, welche die Anfälligkeit des Elektrizitätssektors ihres Landes erhöhen oder verringern. Sie bilden damit auch die Basis für geeignete Veränderungs- und Anpassungsprozesse.

5 Quellen

- [1] IEA. Monthly electricity statistics archives. Retrieved: 12/11/2013. URL, http://www.iea.org/stats/surveys/elec/_archives.asp; 2013.
- [2] EUROSTAT. Energy statistics database. Retrieved: 12/11/2013. URL, <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/energy/data/database>; 2013.
- [3] European climate assessment and dataset, E-OBS gridded dataset. Retrieved: 25/11/2013. URL, <http://eca.knmi.nl/download/ensembles/download.php/#datafiles>; 2013.
- [4] EUROSTAT, GEOSTAT 1 km² population grid dataset. Retrieved: 2/12/2013. URL, [http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/gisco/Geographical information maps/popups/references/population distribution demography](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/gisco/Geographical%20information/maps/popups/references/population_distribution_demography); 2006.
- [5] Mitchell T, Hulme M, New M. Climate data for political areas. Tyndall Centre; 2002.
- [6] Adnot J, Grignon-Masse L, Legendre S, Marchio D, Nermond G, Rahim S, et al. Preparatory study on the environmental performance of residential room conditioning appliances (airco and ventilation) - economic and market analysis. European Commission; 2008.
- [7] Matzarakis A, Thomsen F. Heating and cooling degree days as an indicator of climate change in Freiburg. Tech. rep. Freiburg: University of Freiburg; 2007.
- [8] Christenson M, Manz H, Gyalistras D. Climate warming impact on degree-days and building energy demand in Switzerland. Energy Conversion and Management 2006;47(6):671-86.
- [9] Valor E, Meneu V, Caselles V. Daily air temperature and electricity load in Spain. Journal of Applied Meteorology 2001;40:1413-21.
- [10] Prek M, Butala V. Base temperature and cooling degree days. Tech. rep. University of Ljubljana; 2010.
- [11] Flörke M, Bärlund I, Kynast E. Will climate change affect the electricity production sector? A European study. Journal of Water and Climate Change 2011;3(1):44.
- [12] Rübhelke D, Vögele S. Distributional consequences of climate change impacts on the power sector: who gains and who loses?. Tech. Rep. 349. Brussels: Centre for European Policy Studies; 2011.
- [13] Fraiman R, Justel A, Svarc M. Selection of variables for cluster analysis and classification rules. Journal of the American Statistical Association 2008;103(483):1294-303.
- [14] Rebetz M, Dupont O, Giroud M. An analysis of the July 2006 heatwave extent in Europe compared to the record year of 2003. Theoretical and Applied Climatology 2008;95(1-2):1-7.
- [15] Klein D, Olonscheck M, Walther C, Kropp J. Susceptibility of the European electricity sector to climate change. Energy 2013; 59:183–193.
- [16] Kellogg R, Wolff H. Does extending daylight saving time save energy? Evidence from an Australian experiment. Tech. rep.. Bonn: Institute for the Study of Labor (IZA); 2007.
- [17] Kotchen MJ, Grant LE. Does daylight saving time save energy? Evidence from a natural experiment in Indiana. Working Paper 2008.