

Newiadomsky, Charlotte; Seeliger, Andreas

**Conference Paper — Published Version**

## Klimaveränderungen und deren Einfluss auf Stromerzeugungskosten

*Suggested Citation:* Newiadomsky, Charlotte; Seeliger, Andreas (2020) : Klimaveränderungen und deren Einfluss auf Stromerzeugungskosten, 16. Symposium Energieinnovation (EnInnov 2020), TU Graz, 12.02.-14.02.2020, Technische Universität, Graz,  
[https://www.tugraz.at/fileadmin/user\\_upload/tugrazExternal/4778f047-2e50-4e9e-b72d-e5af373f95a4/files/lf/Session\\_A1/113\\_LF\\_Newiadomsky.pdf](https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/tugrazExternal/4778f047-2e50-4e9e-b72d-e5af373f95a4/files/lf/Session_A1/113_LF_Newiadomsky.pdf)

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/262723>

**Standard-Nutzungsbedingungen:**

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

**Terms of use:**

*Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.*

*You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.*

*If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.*

# Klimaveränderungen und deren Einfluss auf Stromerzeugungskosten

**Charlotte Newiadomsky, Andreas Seeliger**

Hochschule Niederrhein / SWK E<sup>2</sup> - Institut für Energietechnik und Energiemanagement,  
Reinarzstr. 49, 47805 Krefeld, +49 (0)2151 822 4756, charlotte.newiadomsky@hs-niederrhein.de, <https://www.hs-niederrhein.de/swk-e2/>

## **Kurzfassung:**

Seit mehreren Jahrzehnten beschäftigen sich Wissenschaftler mit Klimaprognosen und den möglichen Auswirkungen des Klimawandels. In den letzten Jahren wurde dieses Thema auch in der breiten Bevölkerung durch vermehrte Zeitungsartikel, z.B. zu Problemen der Wasserversorgung in Dürreperioden und hierbei insbesondere im Zusammenhang mit der Stromversorgungssicherheit, bekannt gemacht.

Das Jahr 2018 ist vielen in besonderer Erinnerung geblieben, denn in mehreren europäischen Ländern kam es zu Problemen bei der sicheren Energie- und Wasserversorgung, so dass z.B. die Anlieferung verschiedener Rohstoffe (Kohle, Öl etc.) oder die Kühlung konventioneller Kraftwerke durch die geringe Wasserverfügbarkeit beeinträchtigt wurden.

Die Analyse zeigt, dass je nach genutzter Transportart (Binnenschiff, Güterzug oder LKW) für die Versorgung der Steinkohlekraftwerke, eine Erhöhung der Stromerzeugungskosten um bis zu 0,98 ct/kWh möglich ist. Bei Berücksichtigung einer Luft- und Wassererwärmung um jeweils 1°C und einem eventuell notwendigen Wechsel der eingesetzten Kühltechnik des Steinkohlekraftwerks, steigen die durchschnittlichen Stromerzeugungskosten sogar um bis zu 1,27 ct/kWh.

Die Ergebnisse verdeutlichen die starke Abhängigkeit der Energiewirtschaft, speziell die der Betreiber von Steinkohlekraftwerken, von den vorherrschenden klimatischen Bedingungen und den notwendigen Anpassungen in der Kraftwerksversorgung und Stromerzeugung.

**Keywords:** Stromerzeugungskosten, Klimawandel, Energieversorgungssicherheit, Kraftwerke

## **1 Einflüsse des Klimawandels auf die Stromerzeugung in Deutschland**

### **1.1 Hintergrund**

Die langen und heißen Dürresommer seit der Jahrtausendwende sind vielen ein Begriff. Begonnen mit dem ersten „Jahrhundertsommer“ 2003, der durch die niedrigen Flusspegel starke Auswirkungen auf die Stromerzeugung in Deutschland hatte, bis zuletzt der Sommer 2018, in welchem bereits deutlich Engpässe in der Versorgung mit Wasser, der Belieferung von Treibstoffen wie Benzin oder Diesel und Primärenergieträgern für Kraftwerke bemerkbar wurden.

In den Veröffentlichungen des Weltklimarats werden schon seit vielen Jahren von den Auswirkungen des Klimawandels in Form von beispielsweise verringertem Niederschlag als auch höheren Lufttemperaturen berichtet. Beide genannten Effekte verursachen in Folge z.B. höhere Wassertemperaturen und Verdunstungsraten [1].

In Hinblick auf die vorhandenen Wasserressourcen verändert sich durch den Temperaturanstieg ebenfalls die Nachfrage sowie die Verfügbarkeit von Wasser, so dass die betroffenen Akteure miteinander in Konflikt geraten können, um die für ihre Zwecke notwendigen Wassermengen zu erhalten.

Kraftwerksbetreiber sind besonders anfällig für Wasserknappheit und steigende Umgebungstemperaturen, da Wasser häufig als primäres Kühlmittel eingesetzt wird. In den vergangenen Jahren wurden in ganz Europa aufgrund zu hoher Wassertemperaturen sowie der Nichtverfügbarkeit der benötigten Wassermengen Kraftwerke gedrosselt oder abgeschaltet [2]. Speziell Dürre in Kombination mit hohen Lufttemperaturen führt zu steigenden Verdunstungsraten in Stauseen und Flüssen. Die Wirkungsgrade der Kraftwerke wie auch der Kühltechnik sinken bereits bei kleinsten Temperaturveränderungen der Luft und des Wassers. Dies trägt neben weiteren Aspekten zur Erhöhung der Stromerzeugungskosten bei.

Insbesondere die Betreiber von Steinkohlekraftwerken begegnen während Phasen sinkender Wasserstände logistische Probleme bei der Brennstoffversorgung, da diese im Gegensatz zu Erdgas- oder Braunkohlekraftwerken stark von der Binnenschifffahrt abhängig sind, die nun nur eingeschränkt anliefern kann. Obwohl in Deutschland aufgrund des politischen Kohlekompromisses in naher Zukunft keine Kohlekraftwerke mehr betrieben werden sollen, muss bis zu diesem Zeitpunkt die Versorgung mit Steinkohle gesichert sein. Dies kann beispielsweise durch eine Verlagerung von Binnenschiffen auf kleine Lastkähne oder transmodale Verlagerungen (z.B. von Binnenschiffen auf LKW oder Güterzüge) in den Beschaffungsplänen berücksichtigt werden.

Aufgrund der zukünftigen Auswirkungen des Klimawandels werden die Energieerzeugungskosten der Kraftwerksbetreiber mit hoher Wahrscheinlichkeit steigen. Dies kann sowohl durch die veränderten Kosten für den Transport von Kohle zu den Kraftwerken als auch durch sich verändernde Kosten für den Betrieb der Kühltechnik der Kraftwerke verursacht werden.

## **1.2 Auswirkungen des Klimawandels auf die Kraftwerksversorgung mit Steinkohle**

Die Versorgung konventioneller Kraftwerke mit Steinkohle erfolgt in Deutschland in der Regel über die Binnenschifffahrt, da dieser Transportweg üblicherweise kostengünstiger ist als der Transport über die Straße oder die Schiene [3].

Ab einem bestimmten Pegel oder bei Überschwemmungen, besteht ein generelles Fahrverbot auf den Flüssen, während es bei niedrigen Wasserständen kein solches Verbot gibt. In diesem Fall muss der Steuermann in direkter Verantwortung entscheiden, ob die Wasserstraße noch genug Tiefgang für sein Schiff bietet, welcher durch die Beladung reguliert werden kann. Bei Niedrigwasser laden die Schiffe weniger Kohle für die Fahrt über die Wasserstraßen. Dies wiederum kann zu einer unzureichenden Versorgung der Kraftwerke mit Kohle führen, da die niedrigen Pegel den üblichen Transport von Kohle über die Binnenwasserstraßen einschränkt und die Schiffe nicht zuverlässig liefern können. Im Gegenzug steigen die Kosten für Transport

und Lagerung durch beispielsweise längere Liegezeiten oder erhöhtem Verladeaufwand von größeren auf kleinere Frachtschiffe [4, 5].

Bei zu niedrigen Wasserständen für den üblichen Kohletransport mit schiffstypischen Schlepp- oder Schubverbänden kann die Ladung zunächst auf kleinere Schiffe verlagert werden. Ist der Transport über die Binnenwasserstraße nicht möglich, z.B. aufgrund zu niedriger Pegel, kann eine transmodale Verlagerung vom Schiff auf die Bahn oder den LKW eine Option sein [5].

Der Straßentransport kann wie auch die Wasserstraße durch Effekte des Klimawandels gestört werden. So können Straßen aufgrund von starken Regenfällen, gefolgt von Überschwemmungen oder Erdbeben, blockiert werden. Hohe Lufttemperaturen können zu Beschädigungen der Asphaltoberfläche führen. Zusätzlich nimmt die Konzentration der Fahrer ab, was zu steigenden Unfallraten führt [4].

Der Transport auf der Schiene ist ebenso anfällig für Wetterextreme wie Straßen oder Wasserstraßen. Starke Regenfälle können zu Überflutung oder Unterspülung der Gleise führen, während hohe Umgebungstemperaturen die Gleise verformen können. Infolgedessen fahren die Züge mit verminderter Geschwindigkeit und benötigen eine längere Transportzeit. Unabhängig von Wettereffekten ist das Hauptproblem das Eisenbahnnetz selbst, da nicht viele alternative Strecken zur Verfügung stehen. Dies führt zu Verspätungen und nicht möglichen Transporten, wenn Teile des Netzes nicht genutzt werden können [4].

Abbildung 1 zeigt einen Überblick über die denkbaren Verlagerungsmöglichkeiten für verschiedene Verkehrsträger während niedriger Flusspegel.

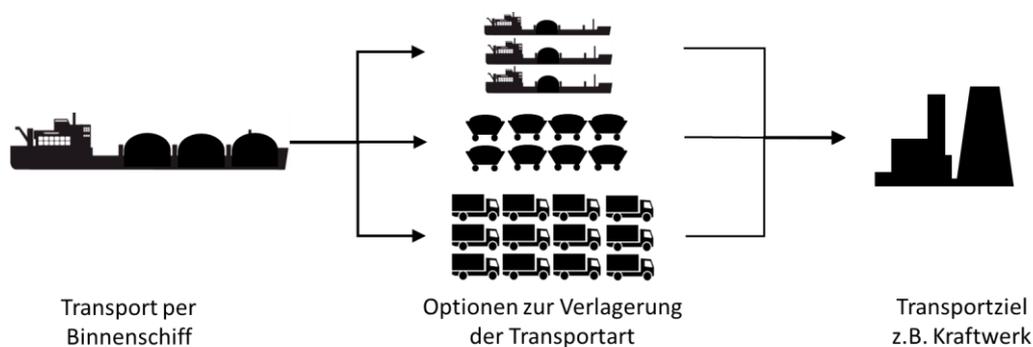


Abbildung 1: Verlagerungsoptionen der Transportmodi während niedriger Flusspegel

Ob und wie eine Verlagerung stattfindet ist abhängig von den anfallenden Mehrkosten, den kraftwerksspezifischen Grenzkosten und der Verfügbarkeit der entsprechenden Verkehrsanbindung des Kraftwerks.

### 1.3 Technische Auswirkungen auf die Stromerzeugung

Die Effizienz der Stromerzeugung in konventionellen Kraftwerken ist anfällig für den Klimawandel. Wie eingangs erwähnt, kann eine geringe Wasserverfügbarkeit zu Problemen bei der Kühleffizienz der Kraftwerke führen, die eine reduzierte Stromerzeugung zur Folge hat. Die Auswirkungen der geringen Wasserverfügbarkeit auf die Stromerzeugung hängen stark von der Art des verwendeten Kühlsystems ab, da mehrere Technologien zur Verfügung stehen

(Durchlaufkühlung, Nasskühlung mit geschlossenem Kreislauf, Kühlteich, Trockenkühlung, Hybridkühlung) [6, 7].

Zu warmes Wasser verursacht ähnliche Probleme, zusätzlich können aber höhere Kosten für die Wartung der Kraftwerke entstehen. Ursache hierfür kann z.B. eine erhöhte Biofilmbildung durch Mikroorganismen im Rohrleitungssystem des Kraftwerks sowie auf den Lamellen der Kühltürme oder vermehrte Muschelansiedlung an den Kühlwasserzuläufen der Kraftwerke sein [8]. Zudem kann die Vermehrung von Legionellen sowie eine beschleunigte Korrosion innerhalb der Zuleitungen auftreten und muss mit zusätzlichen, kostensteigernden Maßnahmen verhindert werden [9].

Trotz der angesprochenen Maßnahmen nimmt die Temperaturdifferenz innerhalb des Kraftwerks ab, wenn das einströmende Frischwasser wärmer als üblich ist. Aufgrund von Beschränkungen der Kühlwasserrückführung der Kraftwerke in die Flüsse, die von den Wasserbehörden festgelegt werden, führen hohe Wassertemperaturen zu einer Verringerung der Stromerzeugungskapazität [10].

Die Stromerzeugung aus Laufwasserkraftwerken ist sowohl von der Durchflussmenge als auch von der Fallhöhe abhängig. Während niedriger Flusspegel steigt die Fallhöhe an, während gleichzeitig die Durchflussmenge abnimmt und insgesamt weniger Wasser für die Stromerzeugung verfügbar ist. Das Wasserkraftwerk kann Elektrizität erzeugen, solange die Mindestdurchflussmenge zum Betrieb der Turbinen sichergestellt werden kann [11].

Während hoher Pegel steigt die Stromerzeugung aus Laufwasserkraftwerken entsprechend der steigenden Durchflussmenge an, bis die Turbine nicht mehr in der Lage ist diese zu bewältigen. In diesem Fall sinkt die Stromerzeugung aufgrund der abnehmenden Fallhöhe. Im Extremfall muss die Stromerzeugung gestoppt werden, wenn der Höhenunterschied zu gering wird [11, 12].

Pumpspeicherkraftwerke sind je nach Konfiguration (mit oder ohne Zufluss, oberirdisch, unterirdisch) ebenfalls anfällig für hohe Lufttemperaturen und damit einhergehender, erhöhter Verdunstungsraten. Im Regelfall ist das Oberbecken ein natürlicher See oder ein künstlich angelegtes Becken, während unten Wasser zum Zurückpumpen verfügbar sein muss. Dies kann ein Fluss oder ein weiterer See bzw. ein weiteres Becken sein [11].

Hierbei können hohe Lufttemperaturen zu starken Verdunstungsraten und somit zu Niedrigwasser führen, die im ungünstigsten Fall das Zurückpumpen von Wasser in das Oberbecken nicht mehr ermöglichen. Eine letztmalige Erzeugung von Elektrizität ist dann noch möglich, jedoch kann der Speicher anschließend nicht mehr befüllt werden. Da Pumpspeicherkraftwerke speziell zur Last- und Einspeiseglättung eingesetzt werden, können sie während Dürren bzw. langanhaltender Hitzewellen und gleichzeitig geringem Niederschlag gerade während der Sommermonate nur noch eingeschränkt oder überhaupt nicht mehr arbeiten.

## 2 Methodik

Im Rahmen dieses Beitrages werden zum einen die Kosten verschiedener Transportalternativen für Steinkohle im Falle eines wetter- bzw. klimabedingten Ausfalls der Haupttransportroute zu Kraftwerken berechnet und miteinander verglichen. Zum anderen werden die Auswirkungen von Temperaturerhöhungen der Luft und des Wassers auf die Steinkohlekraftwerke monetär auf Basis der durchschnittlichen Stromerzeugungskosten bewertet.

Zunächst werden die Kosten für die Kohleanlieferung mit unterschiedlichen Transportmodi für alle noch in Betrieb befindlichen Steinkohlekraftwerke in Deutschland mit Hilfe einer umfangreichen Literaturrecherche ermittelt. Beispielhafte Daten sind Bereitstellungskosten, Mautgebühren oder Personalkosten. Die Berechnungen sind angelehnt an [13].

Für die Berechnung der verschiedenen Transportoptionen von Kohle von internationalen Häfen (mehrheitlich ARA-Häfen) zu den Kraftwerken müssen drei verschiedene Basisberechnungen für den Transport über die Binnenschifffahrt, über Güterzugstrecken und über die Straße durchgeführt werden. Für die Kostenberechnung des benutzten Transportmittels werden verschiedene Transportszenarien angenommen, die auf einem Worst-Case-Szenario basieren. Hierbei ist der Transport von Kohle über die Binnenschifffahrt nicht mehr möglich.

Je nach Transportart werden unterschiedliche Routen bzw. Entfernungen bei den Berechnungen berücksichtigt. Für die Ermittlung dieser Werte werden verschiedene Onlinedatenbanken bzw. Routensuchmaschinen hinzugezogen, die auf die verschiedenen Transportarten zugeschnitten sind. So werden die Entfernungen für die Binnenschifffahrt mit der Plattform "NavShip", die Entfernungen für den LKW Transport mit der Routensuche per Google Maps und die Streckenermittlung für Güterzüge mit dem Infrastrukturregister der DB Netze und der Informationsplattform der Schienengüterverkehrskorridore (CIP-RFC) ermittelt [14, 15, 16, 17].

Es werden alle Steinkohlekraftwerke in Deutschland analysiert, die sowohl über eine Schiffsanbindung verfügen als auch eine Anlieferung per Güterzug und LKW ermöglichen. Kraftwerke ohne Anbindung an Schiffe bzw. Schienen werden aus der Analyse ausgenommen. Von den 55 noch in Betrieb befindlichen Steinkohlekraftwerken in Deutschland sind 25 aufgrund ihrer Liefersituation nicht betroffen, so dass nur 30 Steinkohlekraftwerke berücksichtigt werden.

Basierend auf den Ergebnissen der Transportkosten für Steinkohle zu den Kraftwerken wird eine zusätzliche Berechnung für die Auswirkungen von steigenden Lufttemperaturen in Kombination mit geringer Wasserverfügbarkeit für die Kraftwerkskühlung nach [18], [19] und [20] durchgeführt. Mit Hilfe des durchschnittlichen Brennwertes von Steinkohle kann berechnet werden, wieviel eine Kilowattstunde erzeugten Stroms je nach gewählter Transportoption und genutzter Kühltechnik kostet.

Darauf aufbauend werden die Kosten für die Kraftwerksversorgung und die Kühlung aufaddiert, um den Einfluss von Klimaveränderungen ökonomisch darstellen zu können.

Die in diesem Beitrag errechneten Kosten sind notwendig für die Berechnung der Stromerzeugungskosten der einzelnen Steinkohlekraftwerke, die über die Methode der nivellierten Stromkosten (LCOE) für die verschiedenen Kraftwerke berechnet werden.

Die für die Berechnung der Stromerzeugungskosten (1) verwendete Gleichung lautet nach [21] wie folgt:

$$LCOE = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{A_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{M_{t,el}}{(1+i)^t}} \quad (1)$$

Während die LCOE die Stromerzeugungskosten in €/kWh sind, ist  $I_0$  der Investitionsaufwand in Euro,  $A_t$  sind die jährlichen Gesamtkosten in Euro für das Jahr  $t$ ,  $M_{t,el}$  ist die produzierte Strommenge eines bestimmten Jahres  $t$  in kWh,  $i$  ist der reale kalkulatorische Zinssatz in %,  $n$

stellt die wirtschaftliche Lebensdauer in Jahren dar, während  $t$  das Jahr der wirtschaftlichen Lebensdauer darstellt (1, 2, ...,  $n$ ).

Im Rahmen der vorgestellten Analyse wird allerdings nur der Anteil der variablen Kosten von den jährlichen Gesamtkosten  $A_t$  als wichtiger Faktor untersucht.

Hierbei gilt für die Berechnung von  $A_t$  [21]:

$$A_t = K_{fix} + K_{var} + R \quad (2)$$

Während  $A_t$  die jährlichen Gesamtkosten in Euro für das Jahr  $t$  sind, sind  $K_{fix}$  die fixen Betriebskosten in Euro für das Jahr  $t$ ,  $K_{var}$  sind die variablen Betriebskosten in Euro für das Jahr  $t$ ,  $R$  ist der Restwert der Anlage im jeweiligen Jahr  $t$  bzw. entspricht den Entsorgungskosten der Anlage in Euro, während  $t$  das Jahr der wirtschaftlichen Lebensdauer darstellt (1, 2, ...,  $n$ ).

### 3 Ausgewählte Ergebnisse zu alternativen Transportwegen

Um die Stromversorgung trotz der Auswirkungen des Klimawandels zu sichern, müssen mehrere Anforderungen berücksichtigt werden. Zum einen muss die Kraftwerksversorgung mit Primärenergieträgern sichergestellt werden, damit der Strombedarf gedeckt werden kann. Zum anderen muss die Wasserversorgung der Kraftwerke für Kühlprozesse gewährleistet sein. Im folgenden Kapitel werden die anfallenden Kosten für die Sicherung des Strombedarfs zunächst aus logistischer und dann aus technischer Sicht dargestellt.

#### 3.1 Kosten für Engpassmanagement zur Versorgung von Steinkohlekraftwerken

Der übliche Transport von Kohle zu den Kraftwerken in Deutschland wird mit durchschnittlich über 40 % Zügen (Zugkapazität ca. 2.600 t), zu einem Drittel über die Binnenschifffahrt (Binnenschiffskapazität zwischen 1.200 - 16.800 t) und einem Viertel Seeschiffen und Lastwagen durchgeführt [22]. Mit Bezug auf die Importrouten werden 2/3 aller Kohleimporte in den ARA-Häfen und 1/3 in den Nord-/Ostseehäfen umgeschlagen [23]. Kohlekraftwerke in Küstennähe, wie beispielsweise in Wilhelmshaven, werden direkt von Seeschiffen versorgt, so dass Kosten für eine Verkehrsverlagerung entfallen.

Eine Verlagerung der Kohle von den Binnenschiffen auf andere Transportmittel wird notwendig, wenn das Kraftwerk nicht direkt mit den Seeschiffen erreicht werden kann. Dies wiederum verursacht weitere Umschlagskosten, da die Kohle nicht nur vom Seeschiff in ein Lager transportiert, sondern zusätzlich wieder auf ein Binnenschiff und ggf. weitere Transportmittel verlagert werden muss, bis der Zielort erreicht wird. Diese Kosten sind von der zu verlagernden Kohlemenge und der Art der eingesetzten Verlagerungstechnik (z.B. Förderbänder) abhängig. Darüber hinaus fallen unterschiedliche Kosten für die Nutzung anderer Transportmittel an. Die Verlagerung der Kohle vom Schiff auf die Bahn oder den LKW hängt neben der zu transportierenden Menge im Allgemeinen von der Tiefe der Wasserstraße sowie von der Verfügbarkeit von Zügen bzw. LKW ab. Wenn eine vollständige Verlagerung vom Schiff auf einen anderen Verkehrsträger nicht möglich ist, ist eine Verlagerung auf beide Verkehrsträger, Bahn und LKW, denkbar. Eine vollständige Verlagerung vom Schiff auf die Bahn bzw. den LKW ist jedoch nicht realistisch, da in der Regel nur die Menge der Frachten auf der Binnenwasserstraße reduziert wird [24].

### 3.2 Berechnungsergebnisse

Die berechneten Transportkosten für ein Standardszenario werden mit den Kosten des analysierten Worst-Case-Szenarios verglichen, bei dem ein Transport der Kohle über die Binnenschifffahrt nicht möglich ist, so dass eine vollständige Verlagerung auf die Schiene und/oder die Straße notwendig wird. Im Allgemeinen bedeutet die Verlagerung von Transporten von der Binnenschifffahrt auf andere Verkehrsträger unterschiedliche Kosten für die analysierten Transportwege, da jeder Verkehrsträger unterschiedliche Gebühren hat (z.B. Mautgebühren für die Straße oder Kanalnutzungsgebühren für die Binnenschifffahrt [13]). Daher werden nur die Kosten in €/t miteinander verglichen.

Während normaler klimatischer Bedingungen betragen die Kosten für den Kohletransport über die Binnenwasserstraße von den Überseehäfen zu den verschiedenen Kohlekraftwerken durchschnittlich 3,50 €/t. Ein beispielhafter Transportweg vom Hafen Rotterdam mit dem Binnenschiff ist in Abbildung 2 zu sehen.

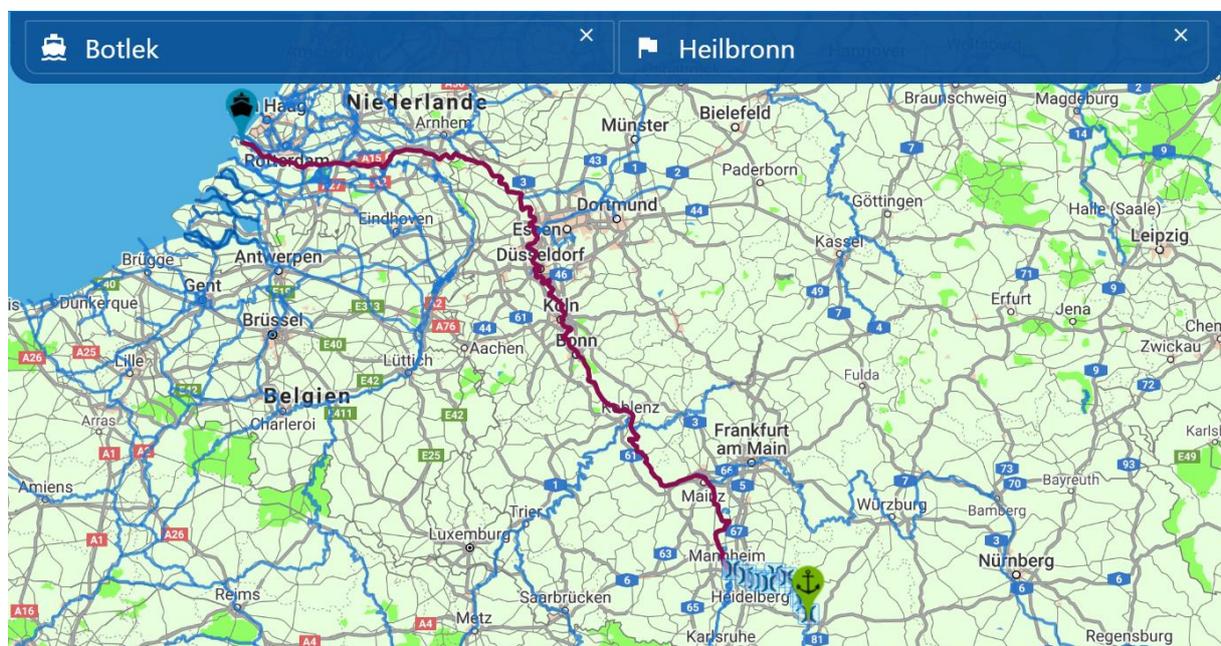


Abbildung 2: Transportweg mit dem Binnenschiff vom Hafen Rotterdam zum Heizkraftwerk Heilbronn mit Anzeige der Schleusen [14]

Im Worst-Case-Szenario, wenn ein Kohletransport über die Binnenschifffahrt nicht mehr möglich ist, wird eine Verlagerung des Verkehrsträgers auf Schiene und Straße notwendig, um die Versorgung der Kohlekraftwerke sicherzustellen. Unter Berücksichtigung der sich ändernden Kosten z.B. für Personalkosten, Brennstoffe oder Fahrzeugbereitstellungen ist der Transport auf der Straße teurer als die Nutzung der Binnenwasserstraßen. Der Transport von einer Tonne Kohle auf der Straße kostet durchschnittlich 51,40 €/t, was einen Kostenanstieg von mehr als 1.470 % im Vergleich zu den Kosten für die Binnenschifffahrt bedeutet. Der Transport auf der Schiene ist im Durchschnitt günstiger (7,24 €/t) als der Transport auf der Straße, aber weiterhin teurer als über die Binnenwasserstraße (3,50 €/t bzw. führt die Verlagerung auf die Schiene zu einem Kostenanstieg über 207 %).

Hinsichtlich der Transportkapazitäten ist zu berücksichtigen, dass ein Schiffsverbund bis zu 16.800 t auf einmal transportieren kann [25], während für den Transport der gleichen Menge Kohle auf der Straße rund 670 LKW (Kapazität je 25 t) und auf der Schiene mehr als sechs Züge (Kapazität je 2.600 t) mit einer Länge von 700 m benötigt werden.

In Bezug auf die vorherrschenden Stromerzeugungskosten zeigen die Ergebnisse, dass die Kosten von konventionellen Kraftwerken immer noch niedriger sind als die von Kraftwerken mit erneuerbaren Energien. Nur Onshore-Windkraftwerke und Freiflächen-PV-Anlagen können mit konventionellen Kraftwerken (Braunkohle-, Steinkohle- und GuD-Kraftwerke) mit Stromerzeugungskosten zwischen 4,59 und 9,96 ct/kWh konkurrieren. Braunkohlekraftwerke verursachen 4,59 bis 7,98 ct/kWh Stromerzeugungskosten, während die Stromerzeugungskosten von Steinkohlekraftwerken zwischen 6,27 und 9,86 ct/kWh und von GuD-Kraftwerken zwischen 7,78 und 9,96 ct/kWh liegen. Die Stromerzeugungskosten von Gasturbinen liegen im Gegensatz zu den zuvor genannten konventionellen Kraftwerken zwischen 11,03 und 21,94 ct/kWh. Obwohl Steinkohlekraftwerke bei den Stromerzeugungskosten um ca. 1 ct/kWh günstiger sind als Gasturbinen, sind sie immer noch teurer als Braunkohlekraftwerke [21].

### 3.3 Klimawandelinduzierte Änderungen des Elektrizitätspreises

Die Verlagerung des Kohlentransports mit der Binnenschifffahrt auf andere Verkehrsträger wirkt sich nicht nur auf die Preise für die Logistik, sondern auch auf die Kosten der Stromerzeugung aus. Steigende Kosten für den Transport können zu veränderten Stromerzeugungskosten führen. Bei Vernachlässigung der Fremdkapitalkosten und Berechnung des LCOE mit den gleichen Parametern wie beim normalen Transport über die Binnenschifffahrt, werden zusätzlich anfallende Transportkosten direkt in die Stromerzeugungskosten berücksichtigt.

Betrachtet man die Ergebnisse für den durchschnittlichen Transportweg per Binnenschiff, so würden die Stromerzeugungskosten mit dem ausschließlichen Kohletransport auf der Schiene zu einem durchschnittlichen Anstieg um 0,45 ct/kWh führen. Danach liegen die Stromerzeugungskosten zwischen 6,72 ct/kWh und 10,31 ct/kWh, was zu einem prozentualen Anstieg um 4,56 bis 7,18 % führt. Für die Verlagerung des Kohletransports von der Binnenschifffahrt auf die Straße gelten erhöhte Stromerzeugungskosten von durchschnittlich 0,98 ct/kWh. Dieser Anstieg führt zu Stromerzeugungskosten zwischen 7,25 ct/kWh und 10,84 ct/kWh, was einen prozentualen Anstieg um 9,94 bis 15,63 % bedeutet (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1: Übersicht über die anfallenden Stromerzeugungskosten je genutzter Transportart

Transportart	LCOE absolut in ct/kWh	LCOE-Änderung in %
Binnenschifffahrt	6,27 – 9,86	-
Güterzug	6,72 – 10,31	4,56 – 7,18
LKW	7,25 – 10,84	9,94 – 15,63

Nach [18] sinkt der Kraftwerkswirkungsgrad in geringen Mengen bis zu 0,03 % (im Durchschnitt etwa 0,01 %), wenn die Lufttemperaturen um 1°C ansteigen, während eine Erhöhung der Wassertemperatur um 1°C zu einem sinkenden Kraftwerkswirkungsgrad von bis zu 0,06 % (im Durchschnitt 0,02 %) führt. Im Gegensatz dazu führen höhere Wassertemperaturen zu

steigenden Verdampfungsraten und damit zu sinkenden Flusswasserständen, was sich hauptsächlich auf die Kraftwerkskühlung auf Basis der Wasserkühlung im offenen Kreislauf auswirkt. Um die Stromerzeugung bei Trockenheit oder zu hohen Wassertemperaturen aufrechtzuerhalten, können Kraftwerksbetreiber, falls verfügbar, auf Kühltürme als Alternative umsteigen. Im Vergleich zur Wasserkühlung mit offenem Kreislauf führen Nasskühltürme zu einem geringeren Kraftwerkswirkungsgrad von 1 %, während der Wirkungsgradverlust bei Trockenkühltürmen 2 % ausmacht [19]. Nach [20] führt die Abnahme des Kraftwerkswirkungsgrades um 1 % zu einer Erhöhung der Stromerzeugungskosten um 0,1 ct/kWh.

Insgesamt erhöhen die relevanten Klimaauswirkungen (Verlagerung des Kohletransports, steigende Luft- und Wassertemperaturen um jeweils 1°C) die Stromerzeugungskosten von Kohlekraftwerken um insgesamt zwischen 0,09 ct/kWh und 1,07 ct/kWh. Daraus ergeben sich Kosten zwischen 6,81 ct/kWh und 10,40 ct/kWh für den Bahntransport. Beim LKW-Transport liegen die Kosten zwischen 7,34 ct/kWh und 10,93 ct/kWh (vgl. Tabelle 2).

Tabelle 2 zeigt die unterschiedlich anfallenden Kosten für die Stromerzeugung in Abhängigkeit von der genutzten Transportart für Kohle und der angegebenen Kühltechnik bei gleichzeitiger Erhöhung der Luft- und Wassertemperaturen um 1°C.

Tabelle 2: Übersicht über die klimawandelbeeinflussten Stromerzeugungskosten in ct/kWh

Transportart	Kühltechnik		
	Frischwasserkühlung	Nasskühlturm	Trockenkühlturm
Binnenschifffahrt	6,36 – 9,95	6,46 – 10,05	6,56 – 10,15
Güterzug	6,81 – 10,40	6,91 – 10,50	7,01 – 10,60
LKW	7,34 – 10,93	7,44 – 11,03	7,54 – 11,13

Durchschnittlich entstehen den Steinkohlekraftwerken dadurch zusätzliche Kosten zwischen 0,90 €/MWh (0,09 ct/kWh) und 12,70 €/MWh (1,27 ct/kWh).

## 4 Diskussion und Ausblick

Die Ergebnisse lassen auf einen starken Einfluss der Klimaveränderungen auf die Stromerzeugungskosten von Steinkohlekraftwerken, speziell bei den jährlichen variablen Gesamtkosten, erkennen.

Es muss aber beachtet werden, dass bei den Berechnungen nicht nur mit realen Daten der Kraftwerksbetreiber gearbeitet werden konnte und Annahmen getroffen werden mussten, beispielsweise bei der Menge der angelieferten Steinkohle je Transportmittel oder der Art der Anlieferung. Einige Kraftwerke liegen nicht an einer Wasserstraße, werden laut eigener Aussage trotzdem hauptsächlich per Binnenschiff mit Steinkohle beliefert, da die letzten Kilometer vom Lagerplatz bzw. Hafen zum Kraftwerk per LKW durchgeführt werden.

Problematisch hat sich während der Datenrecherchen ebenfalls herausgestellt, dass es nicht möglich ist, eine auch nur grobe Kostenspanne der Steinkohlelieferung zu den Kraftwerken zu erhalten, da jedes Kraftwerk mit den Transporteuren individuelle Preise aushandelt. Zudem hat sich herausgestellt, dass die Lieferketten häufig durch mehr als drei Vertragspartner ausgeführt werden und eventuelle Unterauftragnehmer diese Anzahl weiter erhöhen.

Die Ermittlung der Routen für Binnenschiffe, Güterzüge und LKW ist bisher machbar, aber häufig umständlich. Speziell in Hinblick auf die Routenermittlung der Güterzüge mussten zwei unterschiedliche Datenbanken hinzugezogen werden, um die Art der Trassenführung (elektrifiziert oder nicht) zu ermitteln. Kleinere bzw. private Gleisanlagen sind bisher in keinen der beiden genutzten Routenplaner hinterlegt, so dass hier auf Luftbildaufnahmen zurückgegriffen werden musste, um eine Schienenanbindung des Kraftwerks feststellen zu können.

Für zukünftige Forschungsarbeiten wäre es daher wünschenswert, wenn beispielsweise mehr Daten in Hinblick auf die Lieferketten für Steinkohle zu Kraftwerken öffentlich verfügbar wären. Häufig ist schon die Angabe der Standard-Lieferkette (ohne die Nennung der individuell ausgehandelten Transportkosten) hilfreich, um bessere Ergebnisse für den Vergleich der unterschiedlichen Transportarten erzielen zu können.

In Hinblick auf den vorgezogenen Kohleausstieg Deutschlands bis spätestens 2038 kann die Aussage getroffen werden, dass die in diesem Beitrag untersuchte Problematik für Deutschland bald nicht mehr von Relevanz sein wird. Für andere Länder, in denen ein Kohleausstieg allerdings erst später in Betracht gezogen wird oder in denen entsprechende Ausbaupläne sogar den Neubau von Kohlekraftwerken vorsehen, können die vorgestellten Ergebnisse und mögliche zukünftige Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet von hohem Interesse sein. Dies gilt vor allem für Länder, die bisher noch einen hohen Anteil an Kohlekraftwerken im Gesamtkraftwerkspark aufweisen (Polen) oder in denen bereits heute weitere Einschränkungen in der Wasserverfügbarkeit für die Kraftwerkskühlung und weitere Akteure der Wasserwirtschaft prognostiziert werden (Marokko).

Die vorgestellte Analyse könnte bei Anwendung in diesen Ländern ebenfalls zu einem beschleunigten Kohleausstieg führen.

## 5 Literaturverzeichnis

[1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 23. Europe, in Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, And Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution Of Working Group II To The Fifth Assessment Report Of The Intergovernmental Panel On Climate Change. Volume 2. Regional Aspects, (Barros, Vicente R.; Field, Christopher B.; Dokken, David Jon; Mastrandrea, Michael D.; Mach, Katharine J.; Bilir, T. Eren; Chatterjee, Monalisa; Ebi, Kristie L.; Estrada, Yuka Otsuki; Genova, Robert C.; Girma, Betelhem; Kissel, Eric S.; Levy, Andrew N.; MacCracken, Sandy; Mastrandrea, Patricia R. and White, Leslie L. (eds.)), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2014, pp. 1267-1326.

[2] Schaeffer, Roberto; Szklo, Alexandre Salem; Pereira de Lucena, André Frossard; Soares Moreira, Bruno; Borba, Cesar; Pupo Nogueira, Larissa Pinheiro; Pereira Fleming, Fernanda; Troccoli, Alberto; Harrison, Mike; Boulahya, Mohammed Sadeck, Energy sector vulnerability to climate change: A review, Energy, Volume 38, (2012), pp. 1-12, DOI: 10.1016/j.energy.2011.11.056.

[3] U.S. Energy Information Administration (EIA), Coal Transportation Rates to the Electric Power Sector, <https://www.eia.gov/coal/transportationrates/>, release date February 23rd, 2016.

- [4] Marscheider, Nils; Schäfer, Laura; Rotter, Maja, Arbeitspapier zur Vorbereitung des Stakeholderdialogs zur Klimaanpassung – Logistik und Supply Chain, 1, Institut für ökologische Wirtschaftsforschung, Berlin, Germany, 2013.
- [5] Deutsche Post AG, Delivering Tomorrow – Logistik 2050. Eine Szenariostudie, Deutsche Post AG, Konzernzentrale, Bonn, Germany, 2012.
- [6] Strauß, Karl, Kraftwerkstechnik zur Nutzung fossiler, nuklearer und regenerativer Energiequellen, Springer, Berlin, Heidelberg, Germany, 2009.
- [7] King, Carey W., Thermal Power Plant Cooling – Context and Engineering, ASME, New York, USA, 2014.
- [8] Rothstein, Benno; Müller, Ulrike; Greis, Stefanie; Scholten, Anja; Schulz, Jeannette; Nilson, Enno, Auswirkungen des Klimawandels auf die Elektrizitätsproduktion unter besonderer Berücksichtigung des Aspekts Wasser, Symposium Klimawandel - Was Kann die Wasserwirtschaft Tun?, Nuremberg, Germany, 2008, Vol. 24, pp. 193-214.
- [9] Rothstein, Benno, Elektrizitätswirtschaft als Betroffene des Klimawandels – Eine Identifikation von Betroffenheiten und Ansätze zur Anpassung an den Klimawandel dargestellt am Beispiel der Energieunternehmen EnBW und EDF, Habilitation, Universität Würzburg, Würzburg, Germany, 2007.
- [10] Oeding, Dietrich & Oswald, Bernd R., Elektrische Kraftwerke und Netze, Springer, Berlin, Heidelberg, Germany, 2011.
- [11] Kaltschmitt, Martin; Streicher, Wolfgang; Wiese, Andreas, Erneuerbare Energien – Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, Germany, 2014.
- [12] Diekmann, Bernd & Rosenthal, Eberhard, Energie – Physikalische Grundlagen ihrer Erzeugung, Umwandlung und Nutzung, Springer Spektrum, Wiesbaden, Germany, 2014.
- [13] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Ed.), Entwicklung eines Modells zur Berechnung von modalen Verlagerungen im Güterverkehr für die Ableitung konsistenter Bewertungsansätze für die Bundesverkehrswegeplanung. Endbericht, BVU Beratergruppe Verkehr + Umwelt GmbH, TNS Infratest GmbH, Karlsruher Institut für Technologie, Freiburg, München, Karlsruhe, Germany, 2016.
- [14] Michel, Chris, NavShip – Der Routenplaner fürs Wasser, [Online]. Verfügbar unter: <https://boatrouting.com/app/> (Zugriff am 30. Januar 2020).
- [15] DB Netz AG, GeoViewer | DB Netze Fahrweg, [Online]. Verfügbar unter: <https://geovdbn.deutschebahn.com/isr> (Zugriff am 25. Januar 2020).
- [16] RailNetEurope -Association for facilitating traffic on European rail infrastructure, RNE CIP Customer Information Platform of RFCs Rhine-Alpine, North Sea-Med, ScanMed, Atlantic, Baltic-Adriatic, Mediterranean, Orient/East-Med and North Sea-Baltic, [Online]. Verfügbar unter: <https://cip.rne.eu/apex/f?p=212:65> (Zugriff am 25. Januar 2020).
- [17] Google Maps, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.google.de/maps/> (Zugriff am 25. Januar 2020).

- [18] Colman, Jesse, The Effect Of Ambient Air And Water Temperature On Power Plant Efficiency, Master Project Report, Duke University, Durham, USA, 2013.
- [19] Leuschner, Udo, Kondensation erhöht den Wirkungsgrad – wozu Kühltürme dienen, [Online]. Verfügbar unter: <http://www.udo-leuschner.de/basiswissen/SB105-05.htm> (Zugriff am 01. Dezember 2019).
- [20] Wissel, S.; Fahl, U.; Blesl, M.; Voß, A., Erzeugungskosten zur Bereitstellung elektrischer Energie von Kraftwerksoptionen in 2015, Nr. 8, University of Stuttgart – Institute of Energy Economics and the Rational Use of Energy, Stuttgart, Germany, 2010.
- [21] Kost, Christoph; Shammugam, Shivenes; Jülch, Verena; Nguyen, Huyen-Tran; Schlegl, Thomas, Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien, Version März 2018, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg, Germany, 2018.
- [22] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Verkehr in Zahlen 2016/2017, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Hamburg, Germany, 2016.
- [23] Reich, Jens; Benesch, A., Wolfgang, Steinkohlekraftwerke: Konzepte und Faktoren der Standortauswahl, VGB Power Tech, 87, (2007), 9, pp. 117-122.
- [24] Scholten, Anja; Rothstein, Benno, Auswirkungen von Niedrigwasser und Klimawandel auf die verladende Wirtschaft, Binnenschifffahrt und Häfen entlang des Rheins, Selbstverlag des Institutes für Geographie und Geologie der Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Würzburg, Germany, 2012.
- [25] Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (GDV), Schiffe [Online]. Verfügbar unter: <http://www.tis-gdv.de/tis/tagungen/svt/svt07/renner/inhalt04.htm> (Zugriff am 30. Januar 2020).