

Forschungsvorhaben „Auswirkungen der Nutzung Erneuerbarer Energien auf den Wasserhaushalt“

Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse und Einordnung der Ergebnisse durch das Umweltbundesamt



HINWEIS: Das Vorhaben wurde bereits im Mai 2020 fachlich abgeschlossen, konnte aber aus verwaltungstechnischen Gründen erst Anfang 2025 veröffentlicht werden. Entsprechend sind darin auch nur technische Entwicklungen und Daten bis 2018 eingeflossen. Da die Ergebnisse jedoch weiterhin für die Einordnung zukünftiger Entwicklungen von Interesse sein dürften, haben wir uns für diese späte Veröffentlichung entschieden.

1 Ziel des Vorhabens

Die Bereitstellung von elektrischer Energie durch konventionelle Kraftwerke ist mit einem hohen Bedarf an Kühlwasser verbunden. Im Vergleich zu den anderen Wassernutzern wie zum Beispiel der Industrie und dem Gewerbe, den privaten Haushalten und der Landwirtschaft hat der Energiesektor die mit Abstand größten Wasserentnahmen in Deutschland. Mit dem steigenden Anteil erneuerbar produzierten Stroms konnte seit dem Jahr 2013 erstmals ein Rückgang der Wasserentnahmen durch den Energiesektor beobachtet werden.

Umfangreiche Wasserentnahmen und die Einleitungen von erwärmtem Kühlwasser in Oberflächengewässer erhöhen den Druck auf die Gewässerökosysteme. Die Auswirkungen auf die aquatischen Lebensgemeinschaften ergeben sich zum einen durch die erhöhten Wassertemperaturen selbst sowie den damit verbundenen abnehmenden Sauerstoffgehalt. Darüber hinaus führt ein abnehmendes Volumen insbesondere bei Niedrigwasser in Folge von Wasserentnahmen zu einer zusätzlichen Einengung des aquatischen Lebensraums und einer Beeinträchtigung der Wanderkorridore der aquatischen Fauna. Vor allem in trockenen und warmen Sommern ist das von Relevanz.

In diesem Projekt wurde untersucht, inwieweit der weitere **Ausbau der Erneuerbaren Energien** zur Stromerzeugung quantitative **Auswirkungen auf den Wasserhaushalt** hat. Dabei wurden drei zentrale Fragen näher betrachtet:

- ▶ Wie wirkt sich der Einsatz erneuerbarer Energien auf die Kühlwasserentnahmen und damit auf den Wasserhaushalt aus?
- ▶ Führt der Anbau von Biomasse durch den Einsatz von Bewässerungswasser zu erhöhten Wasserentnahmen?
- ▶ Welche Auswirkungen hat die veränderte Wasserentnahme durch die Energiewirtschaft aus Oberflächengewässern auf die Gewässertemperaturen?

Im Vorhaben unberücksichtigt blieben die Untersuchung des Wasserbedarfs für die Wasserstofferzeugung mittels Power-to-Liquid Verfahren sowie der mögliche Einfluss auf das Grundwasser durch oberflächennahe Geothermie.

2 Zentrale Ergebnisse

Auswirkungen thermischer Kraftwerke und von Wärmeeinleitungen

Statistische Daten zeigen, dass die Wasserentnahme durch die Energieversorgung in den letzten Jahren deutlich abgenommen hat. In der Studie konnte belegt werden, dass dies auf den steigenden Anteil der Erneuerbaren Energien und vor allem auf den Rückgang der Stromerzeugung aus konventionellen Kraftwerken (Kohlekraftwerke, Gaskraftwerke, Atomkraftwerke) zurückzuführen ist. Eine besondere Bedeutung kommt den Kraftwerken mit einer installierten Leistung > 100 MW zu. Generell muss zwischen zwei verschiedenen Kühlverfahren unterschieden werden: der Kühlturmkühlung und der Durchlaufkühlung.

Bei **Kraftwerken mit Kühlturmkühlung** müssen Verdunstungsverluste durch Zuführung von Wasser ausgeglichen werden. Dieses Wasser wird nicht nur Fließgewässern, sondern auch Standgewässern wie Seen, Kanälen, Speicherbecken und dem Grundwasser (als Teil des Sumpfungswassers und über Tiefbrunnen) entnommen.

- ▶ Im Jahr 2017 waren bundesweit noch 92 konventionelle Kraftwerke mit Kühlturm-Technik in Betrieb.
- ▶ Die Wasserentnahmen dieser Kraftwerke betrugen ca. 935 Mio. m³/a. Dies entspricht einer Verdunstungshöhe von 2,6 mm bezogen auf ganz Deutschland. Gemessen an der durchschnittlichen jährlichen Verdunstungshöhe von 532 mm pro Jahr entspricht dieser Wert einem Anteil von 0,5 Prozent.
- ▶ Bei Betrachtung der einzelnen Flussgebiete, sind deutliche Unterschiede zu erkennen. So betrug die Wasserentnahme im Rhein-Einzugsgebiet 4,3 mm (0,8 % der Verdunstung), im Elbe-Einzugsgebiet 2,1 mm (0,5 %) und im Donau-Einzugsgebiet 1,5 mm (0,3 %).
- ▶ Werden die Entnahmemengen in Beziehung zu ungünstigen Abflusszuständen (langjähriger mittlerer Niedrigabfluss MNQ) gesetzt, zeigte sich, dass für die kühlintensivsten Kernkraftwerke der Anteil nicht über 5 % (KKW Gundremmingen Donau) beziehungsweise nicht über 6 % (KKW Neckarwestheim 2) steigt. Für den mittleren Abfluss lag der Anteil des entnommenen Flusswassers für alle Kraftwerke, auch für die Kernkraftwerke, im Mittel unter einem Prozent.

Bei **Kraftwerken mit Durchlaufkühlung** wird dem Fließgewässer die zur Kühlung des Kraftwerks erforderliche Wassermenge entnommen. Dieses Wasser wird dem Fließgewässer direkt wieder zugeführt. Mengenmäßig entsteht hier bezogen auf den Abfluss kein Verlust. Es findet eine Gewässerbelastung durch Erwärmung statt.

- ▶ Im Jahr 2017 besaßen bundesweit insgesamt 33 Kraftwerke eine Durchlaufkühlung nach der Klassifikation dieser Studie. Der Kühlwasserbedarf betrug insgesamt 11,2 Mrd. m³/a.
- ▶ In besonders trockenen und heißen Sommern sind sowohl Kraftwerke gedrosselt worden als auch Ausnahmegenehmigungen erteilt worden. Eine Drosselung von Kraftwerken sowie die Erteilung von Ausnahmegenehmigungen zur Überschreitung der zulässigen Wärmeeinleitungen hat dabei zum Ziel, einerseits die Gewässer nicht zu sehr zu belasten und andererseits die Stromversorgung sicher zu stellen.

Die **Braunkohle** nimmt unter den Energieträgern eine Sonderrolle ein, da die Braunkohlegewinnung besonders **tiefgreifend in die Wasserhaushalte** der betroffenen Regionen **eingreift**. Da die lockeren Sand- und Kiesschichten, in denen sich die Braunkohle befindet, hervorragende Grundwasserleiter darstellen, muss parallel zum Abbau des Erzes das Grundwasser bis unter die Tagebausohle abgepumpt ("gesümpft") werden. Auch während des Betriebs wird der Untergrund entwässert, um das Eindringen des Grundwassers in die Tagebaue zu verhindern. Mit dem Ende der Braunkohleverstromung und damit des Tagebaus werden die Sümpfungswassereinleitungen eingestellt und die damit einhergehenden Auswirkungen auf die Abflussmenge, die Temperatur sowie den chemischen Zustand der Oberflächengewässer enden. Gleichzeitig endet damit auch die Entnahme großer Mengen Grundwassers, die in der Vergangenheit zu einer starken Absenkung des Grundwasserspiegels in den Tagebaurevieren geführt hat. Für die Wiederherstellung eines ausgeglichenen, sich weitestgehend selbst regulierenden Wasserhaushaltes und die damit verbundene Auffüllung der Grundwasserleiter sowie der entstehenden Tagebaurestlöcher werden mehrere Milliarden Kubikmeter Wasser benötigt.

Die **zukünftige Entwicklung** der Stromerzeugung und die daraus resultierenden Auswirkungen auf Wasserentnahmen und Änderungen der Gewassertemperatur wurden in Fallstudien abgeschätzt. Demnach werden die Wasserentnahmen für den Betrieb der Kühltürme in Deutschland 2025 auf 56 % und 2040/2050 auf 10 % der Wasserentnahmewerte von 2017 sinken, so dass auch die Relevanz für die Wasserbilanz weiter abnimmt. Für die einzelnen Flussgebiete variieren diese Zahlen je nach Anzahl der Kraftwerke. So nehmen die Entnahmen im Elbe-Einzugsgebiet entsprechend der Szenarien in den Case Studies beispielsweise von 100 % im Jahr 2017 auf 87 % im Jahr 2025 und auf 0,8 % 2040/2050 ab.

Wasserbedarf Erneuerbarer Energien

Der **tatsächliche im Betrieb anfallende Wasserbedarf** der Technologien Windkraft, Photovoltaik, Bioenergie und Geothermie konnte auf Grund einer unzureichenden Datenlage nur abgeschätzt werden. Die Abschätzungen beruhten dabei auf einer Vielzahl vereinfachter Annahmen (zum Beispiel jährliche Reinigung aller Windkraft- und PV-Anlagen) und können von der Praxis abweichen.

- ▶ für **Windenergieanlagen** liegt der für 2018 hochgerechnete absolute Wasserbedarf bei 600 bis 3.000 m³, was 11 bis 56 m³/GW installierter elektrischer Leistung entspricht.
- ▶ für **Photovoltaik-Anlagen** liegt der für 2018 hochgerechnete absolute Wasserbedarf bei 330.500 m³, was 7.300 m³/GW installierter elektrischer Leistung entspricht.
- ▶ Der für **Bioenergie** relevante Wasserbedarf zur Bewässerung von Energiepflanzen lag bei etwa 20,7 Mio. m³ absolut und 2,5 Mio. m³ / GW installierter elektrischer Leistung. Eine flächendeckende Abschätzung des Wasserbedarfs für den Betrieb von Bioenergieanlagen erfolgte nicht.
- ▶ Für die Kühlung von tiefen **Geothermiekraftwerken** wird im Vergleich zu den anderen erneuerbaren Technologien ein höherer leistungsbezogener Wasserbedarf (bis etwa 113 Mio.

m³/GW installierter elektrischer Leistung) benötigt. Aufgrund der aktuell nur geringen installierten elektrischen Leistung der tiefen Geothermie spielt der absolute Wasserbedarf (ca. 170.000 m³/a) der tiefen Geothermie jedoch bisher eine untergeordnete Rolle.

- ▶ Betrachtet man die Vorkette der Produktion von (bewässerten) Energiepflanzen mit, ist der **Wasserbedarf für Bioenergie** in seiner Größenordnung unter den Erneuerbaren Energien in Deutschland **als der bedeutendste** einzuordnen.
- ▶ Der Wasserbedarf für Erneuerbare Energien insgesamt ist mit 0,11 % im Verhältnis zu den gesamten Wasserentnahmen zur nichtöffentlichen Versorgung in Deutschland (2016: 18,75 Mrd. m³) und im Speziellen mit 0,13 % zu den Wasserentnahmen für Energieerzeugung (2016: 16,64 Mrd. m³) als sehr gering einzuschätzen.
- ▶ Auf Basis von **Szenarien** wurde die Bandbreite möglicher Entwicklungslinien des Energiesystems untersucht (sogenannte GreenSzenarien). Die ermittelten Abschätzungen für den zukünftigen Wasserbedarf bis 2050 geben Auskunft, in welcher Größenordnung Veränderungen zu erwarten sind und wie sich die Verhältnisse zwischen den unterschiedlichen Technologien darstellen werden. Abschätzungen für 2050 ergeben für die Windenergie maximal eine Verdreifachung des Wasserbedarfs auf 8.400 m³/a und für die Photovoltaik eine Verfünffachung auf ca. 1,6 Mio. m³/a.
- ▶ Da in den Szenarien kein Einsatz von Energiepflanzen für Bioenergie mehr angenommen wird, entfällt der Wasserbedarf für Bioenergie vollständig.
- ▶ Bei der tiefen Geothermie wird zukünftig bei verzehnfachter elektrischer Leistung ein Wasserbedarf von 1,5 bis 22,5 Mio. m³/a errechnet. Da der Wasserbedarf zwischen möglichen Kühlverfahren sehr stark schwankt und nicht abschätzbar ist, welche Verfahren zukünftig eingesetzt werden, ist die Spanne des Wasserbedarfs hier besonders groß.
- ▶ Insgesamt kann der Wasserbedarf für die Erneuerbaren Energien mit einer Summe von 3,1 bis 24,1 Mio. m³/a für das Jahr 2050 abgeschätzt werden.

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass der Ausbau der Erneuerbaren Energien und die damit einhergehende Reduzierung der Anzahl konventioneller Kraftwerke zu einer Verbesserung des Wasserhaushalts der Gewässer führen werden. Sowohl in Bezug auf die Wassermenge als auch in Bezug auf die Temperatur werden verringerte Kühlwasserentnahmen zu geringeren Belastungen der Gewässer führen. Nichtsdestotrotz werden sich die Oberflächengewässer zukünftig in Folge des Klimawandels und steigender Lufttemperaturen weiter erwärmen. Damit wird auch die ausschöpfbare Spannbreite an zulässiger Temperaturerhöhung in den Gewässern weiter abnehmen. Diese Entwicklung kann eine Anpassung der Kühltechnik auf Luftkühlung erforderlich machen. Zudem müsste geprüft werden, ob künftige Einleitungserlaubnisse an die Aufstellung von Wärmelastplänen oder eine detaillierte Temperaturmodellierung im Fließgewässer geknüpft werden sollten.

3 Einordnung der Ergebnisse durch das Umweltbundesamt

Die vorliegende Studie wurde von 2018 bis 2020 durchgeführt und untersuchte den zukünftigen Wasserbedarf des Energiesystems auf Basis von Szenarien zum Ausbau der Erneuerbaren Energien in Deutschland. Auf Grund der langen Zeitspanne zwischen dem Studiendesign im Jahr 2018 und der Veröffentlichung der Ergebnisse im Jahr 2025 wurden in dieser Studie zwei nach jetzigem Wissensstand wesentliche Elemente eines künftigen Energiesystems nicht hinsichtlich ihres Wasserbedarfs bzw. hinsichtlich der Auswirkungen auf den Temperaturhaushalt der Gewässer berücksichtigt: Dies sind die Wasserstoffproduktion mittels power-to-liquid Verfahren sowie die oberflächennahe Geothermie zur Wärme- und Kälteerzeugung. Während eine großskalige Produktion von Wasserstoff mit dem Verbrauch großer Mengen Wasser verbunden wäre, wirkt sich die Anwendung oberflächennaher Geothermie auf den Temperaturhaushalt von Grundwasser und Oberflächengewässern aus. Um die Auswirkungen dieser Technologien auf den Wasserhaushalt abzuschätzen, wurden mittlerweile separate Forschungsvorhaben gestartet.

Da die Ergebnisse für die in dieser Studie untersuchten Technologien Windkraft, Photovoltaik, Bioenergie und Geothermie jedoch weiterhin gültig und von Interesse sein dürften, haben wir uns für eine Veröffentlichung entschieden.

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass der geplante Ausbau der Erneuerbaren Energien sowie die Reduzierung der Anzahl der thermischen Kraftwerke und die damit einhergehende geringere Nutzung von Kühlwasser zu einer Verbesserung des Zustands des Wasserhaushalts der Gewässer sowohl in Bezug auf die Wassermengen als auch in Bezug auf die Temperatur führen. Mit kritischen Temperatur- und/oder Abflusszuständen der Gewässer ist zukünftig jedoch auf Grund des Klimawandels vermehrt zu rechnen. Um diese, durch die Klimaerwärmung hervorgerufenen Veränderungen im Wasser- und Temperaturhaushalt der Gewässer zu berücksichtigen, sollte geprüft werden, ob künftige Einleitungserlaubnisse an die Aufstellung von Wärmelastplänen oder eine detaillierte Temperaturmodellierung im Fließgewässer geknüpft werden sollten. Auch eine Umstellung der Kühltechnik auf Luftkühlung beim Neubau von Kühlanlagen sollte berücksichtigt werden.

Um die positiven Effekte der Energiewende auf den Wasserhaushalt zu bewahren, ist bei der Nutzung alternativer Energie- und Speicherformen der Einfluss auf den Wasserhaushalt zu prüfen. Die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens zeigen, dass sich der Wasserhaushalt der Gewässer durch den Ausbau der Erneuerbaren Energien in Zukunft höchstwahrscheinlich nur in zwei Fällen deutlich verschlechtern wird: Wenn große Flächen für die Bewässerung von Energiepflanzen mit Oberflächenwasser genutzt werden und/oder wenn die tiefe Geothermie mit wasserintensiver Kraftwerks- und Kühltechnologie großflächig ausgebaut wird. Um dabei künftig robuste Aussagen zum Bewässerungsbedarf von Energiepflanzen machen zu können, müsste die Datenlage zu Wasserentnahmen in der Landwirtschaft wesentlich verbessert werden.

Die Arbeiten im Projekt haben auch gezeigt, dass vorhandene Daten für den vorliegenden Zweck nur eingeschränkt geeignet und teilweise mit hohen Unsicherheiten behaftet sind. Während für die hydrologischen Parameter ein gutes Netz an Pegeln mit langen Beobachtungszeitreihen zur Verfügung steht, gibt es deutlich weniger Messstellen zur Erfassung der Gewassertemperatur,

und die Daten dieser Messstellen sind häufig lückenhaft oder ungeprüft. Die bestehenden Messnetze und Monitoringprogramme zur Beobachtung der hydrologischen Kenngrößen sowie Güteparameter sollten deshalb konsequent fortgeführt und weiterentwickelt werden. Gewässerdaten von Kraftwerksbetreibern sollten nicht nur in Ausnahmesituationen, sondern kontinuierlich und automatisiert erhoben und digital gespeichert und dann veröffentlicht werden, um sie im Sinne von open science nutzen zu können.

Fazit

In diesem Projekt wurde bis zum Jahr 2020 untersucht, inwieweit der weitere **Ausbau der Erneuerbaren Energien** zur Stromerzeugung quantitative **Auswirkungen auf den Wasserhaushalt** in Deutschland hat. Durch den steigenden Anteil erneuerbarer Energien und den Rückgang konventioneller Kraftwerke, wird sich die Wasserentnahme zu Kühlzwecken bis 2050 um 90 % im Vergleich zum Jahr 2017 reduzieren. Auch Wärmeeinleitungen von Kraftwerken werden mit dem Umbau des Energiesystems stark abnehmen. Gleichzeitig ist der Wasserbedarf für den Betrieb von Windenergie- und Photovoltaik-Anlagen vergleichsweise gering. Auf Basis von **Szenarien** wurde die Bandbreite möglicher Entwicklungslinien des Energiesystems untersucht (ohne Berücksichtigung der Wasserstofferzeugung durch power-to-liquid Verfahren sowie oberflächennaher Geothermie) und der zukünftige Wasserbedarf des Energiesystems abgeschätzt. Trotz des Rückgangs von Wärmeeinleitungen durch den Ausstieg aus der Atomenergie und das Abschalten konventioneller Kohlekraftwerke kann es zukünftig infolge des Klimawandels erforderlich werden, Genehmigungsauflagen anzupassen, da die ausschöpfbare Spannbreite an zulässiger Gewässertemperaturerhöhung abnimmt.

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Autorenschaft, Institution

Matthias Rothe, Umweltbundesamt

Stand: Mai 2025

Abschluss der Studie: Mai 2020