

Wasserkraft



Die Kraft von fließendem Wasser wird schon seit sehr langer Zeit für den Antrieb von Mühlen genutzt. Hierfür kommen unterschiedliche Prinzipien zum Einsatz. Obwohl auch Prinzipien bekannt sind, die die Fließgeschwindigkeit einer Flussströmung nutzen, wurde üblicherweise ein Gefälleunterschied genutzt, um Turbinen anzutreiben. Dabei wurde das Wasser eines Baches oder Flusses über einen Mühlenkanal (Oberwasser) dem Mühlrad zugeführt und an tieferer Stelle (Unterwasser) wieder dem Gewässer zugeführt. Um die Fallhöhe zu erhöhen, wurde in vielen Fällen zusätzlich das Gewässer mit Hilfe eines Wehrs angestaut. Durch die Veränderung des Stauziels konnte damit zusätzlich eine gewisse Speicherbarkeit erzielt werden, um das Wasserdargebot in gewissen Grenzen an den Wasserbedarf beim Mahlen anzupassen. Im Laufe der Zeit wurden an vielen dieser Mühlenstandorte die Mühlräder durch Wasserturbinen ersetzt, um damit elektrische Generatoren anzutreiben.

Wasserkraft ist damit die älteste Form erneuerbarer Stromerzeugung und war Ausgangspunkt für die Industrialisierung und Elektrifizierung Deutschlands. Das Potenzial der Wasserkraft wurde rasch erkannt, so dass insbesondere auch an den größeren Flüssen mit entsprechendem Gefälle Wasserkraftwerke gebaut wurden. An manchen Standorten sind die Staustufen auch gekoppelt mit Schleusenbauwerken für die Flussschifffahrt. Neben diesen sog. Laufwasserkraftwerken gibt es auch noch Speicher-Wasserkraftwerke. Bei dieser speziellen Bauform wird das Wasser in großen Stauseen oder Talsperren für eine begrenzte Zeit zwischengespeichert. Diese Anlagen dienen vorrangig der saisonalen Wasserverregulierung, um eine gewisse Wassermenge in den Flüssen zu garantieren sowie dem Hochwasserschutz (z.B. als Rückhaltebecken nach der Schneeschmelze oder bei Starkregen) und in vielen Fällen auch noch der Trinkwasserversorgung. Die Stromerzeugung ist dabei häufig ein willkommener Zusatznutzen. Häufig werden diese Speicherseen auch für die Naherholung und Freizeitaktivitäten genutzt. Wasserkraftanlagen zeichnen sich durch eine sehr lange Nutzungsdauer (bis 100 Jahre) aus.

Kann man neben dem Turbinenbetrieb das Wasser bei Bedarf für eine spätere erneute Nutzung aus einem Unterbecken wieder zurück in ein Oberbecken pumpen, spricht man von Pumpspeicher-Kraftwerken. Diese werden in dem vorliegenden Papier jedoch nicht weiter behandelt.

In Abhängigkeit der Fallhöhe und der nutzbaren Wassermengen kommen unterschiedliche Bauarten der Wasserturbinen zum Einsatz:

Bauart der Wasserturbine	Kaplan	Francis	Pelton
Zuströmungsrichtung	axial	radial	tangential
Bauart	Rohrturbine	Spiralturbine	Freistrahl- Turbine
Bevorzugte Einsatzgebiete	Laufwasserkraftwerke		Speicherwerkwerke
Typische Fallhöhen	2 – 60 m	40 – 400 m	100 – 2000 m

Wasserkraftanlagen zeichnen sich durch relativ hohe Wirkungsgrade aus. Der Gesamtwirkungsgrad, bei dem Verluste durch Reibung, Umlenkungen, Getriebe, Generatoren etc., berücksichtigt werden, liegt je nach Turbinentyp und Fallhöhe typischerweise im Bereich von 70 bis 90 %.

Aktuell (2024) gibt es in Deutschland etwa 7.300 Wasserkraftanlagen (ohne Berücksichtigung der Pumpspeicher-Kraftwerke). Die installierte Leistung beträgt insgesamt etwa 6.440 MW. Die elektrische Energie der Strom einspeisung aus Wasserkraft betrug im Jahr 2024 etwa 20,6 TWh/a, entsprechend etwa 5 % der Bruttostromerzeugung in Deutschland. An der erneuerbaren Stromerzeugung hatte die Wasserkraft im Jahr 2024 einen Anteil von knapp 8 %. Der größte Anteil der Anlagen (6.900 Anlagen, also etwa 94 %) verfügt über eine installierte Leistung von unter 1 MW und gelten dementsprechend als Kleinwasserkraftanlagen. Der durch Kleinwasserkraft

VDE Verband der Elektrotechnik
Elektronik Informationstechnik e.V.
Energietechnische Gesellschaft
(ETG)
Merianstraße 28
63069 Offenbach
Tel. +49 69 6308-346
etg@vde.com

erbrachte Anteil an der Stromproduktion beträgt etwa 14 %. Der größte Anteil wird von Anlagen mit einem Leistungsvermögen von über 1 MW erzeugt [1–3]

Im Vergleich zu manchen anderen Ländern können in Deutschland nur relativ kleine Anlagen realisiert werden. Das Kraftwerk mit der höchsten Leistung befindet sich in Iffezheim am Rhein, in dem fünf Kaplan-Rohrturbinen mit einer Gesamtleistung von 146 MW ihren Dienst tun. Die Maschine 5 ist mit 36 MW auch gleichzeitig die leistungsstärkste Turbine in Deutschland. Die größten Wasserkraftwerke der Welt befinden sich in China (Drei-Schluchten mit 18 Turbinen/Generatorenätzen und einer elektrischen Gesamtleistung von 22,5 GW) und in Brasilien/Paraguay (Itaipu mit 20 Turbinen/Generatorenätzen und einer elektrischen Gesamtleistung von 14 GW). Die Turbinen/Generatoren haben dabei eine Einzelleistung von 700 MW und mehr.

Der Anteil der Wasserkraft an der **Nettostromerzeugung** in Deutschland lag im Zeitraum von 2020 und 2024 zwischen **16,3 und 20,6 Mrd. kWh** [4]. Bezogen auf die Erzeugung aus erneuerbaren Quellen nimmt der Anteil durch den verstärkten Zubau von PV und Windkraft jedoch ab.

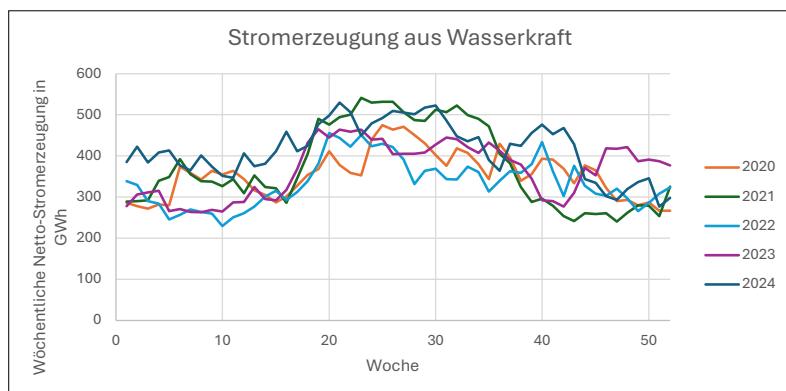


Abbildung 1: Wöchentliche Stromerzeugung aus Wasserkraft in Deutschland (ohne Pumpspeicherkraftwerke) für die Jahre 2020–2024. Eigene Darstellung, Datenquelle [4].

Wie bei anderen Optionen der erneuerbaren Stromerzeugung ist auch hier die jährliche Stromerzeugung von Jahr zu Jahr unterschiedlich. Die aktuell möglich Erzeugungsleistung schwankt im Jahresverlauf in Abhängigkeit vom Wasserdargebot in gewissen Grenzen. Beispielhaft sind in Abbildung 1 die Verläufe der wöchentlichen Stromerzeugung der Wasserkraftanlagen in Deutschland für die letzten fünf Jahre dargestellt. Wie die Verläufe zeigen, sind die jahreszeitlichen Unterschiede nicht sehr stark ausgeprägt; geringere Leistungen sind jedoch eher im Winterhalbjahr zu beobachten. Im Gegensatz zu Wind- und Solarenergie gibt es bei der Wasserkraft in der Regel jedoch so gut wie keine Zeiten ganz ohne Wasser. Die wöchentliche Stromerzeugung aus Wasserkraft sinkt auch im Winterhalbjahr nicht unter 250 GWh, also immer noch etwa 50 % der im Sommer erreichbaren Maximalwerte. Bei extremen Hochwassersituationen kann es vorkommen, dass die Wehre derart überflutet werden, dass trotz hohem Wasserdargebot zwischen Ober- und Unterwasser praktisch kein Gefälle existiert, um die Turbinen betreiben zu können.

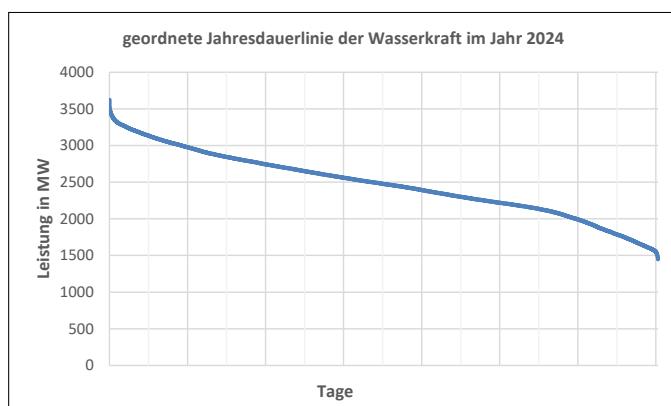


Abbildung 2: Geordnete Jahressdauerlinie für Wasserkraft in Deutschland (ohne Pumpspeicherkraftwerke) für das Jahr 2024 Eigene Darstellung, Datenquelle [4].

Auch die Jahresdauerlinie, beispielhaft in Abbildung 2 für das Jahr 2024 dargestellt, bestätigt die hohe Verfügbarkeit der Wasserkraft.

Die Auslegung einer Wasserkraftanlage (Typ, Größe und Anzahl von Turbinen) wird u.a. von der möglichen Fallhöhe bestimmt. Neben der an einem Standort realisierbaren Fallhöhe orientiert sich die Einzelleistung der Turbinen und die Anzahl der Turbinen üblicherweise an einem mittleren Wasserdargebot. In der Regel werden an einem Standort statt einer großen Turbine mehrere kleinere verbaut, die sich dann entsprechend dem Wasserdargebot zu- und abschalten lassen. Die Turbinen lassen sich dadurch jeweils in der Nähe des Bestpunktes betreiben und die Revisionen können bei Bedarf nacheinander durchgeführt werden, ohne gleich die gesamte Anlage abschalten zu müssen.

Da bei Laufwasserkraftwerken das Wasserdargebot an einem Standort vorgegeben ist, sind die möglichen Vollaststunden der gesamten Anlage abhängig von der dort installierten Gesamtleistung. Mit höherer Gesamtleistung der Turbinen/Generatoren an einem Standort steigt zwar die maximal erzielbare Leistung, jedoch nehmen dadurch auch die erzielbaren Vollaststunden der gesamten Anlage entsprechend ab. Bei der Planung von Wasserkraftanlagen wird üblicherweise ein betriebswirtschaftliches Optimum aus Investitionen und möglichen Erlösen angestrebt. Die im folgenden gemachten Aussagen zu den mittleren Vollaststunden sind daher für die Beurteilung der Verfügbarkeit der Wasserkraft nur bedingt aussagefähig. Des Weiteren ist zu beachten, dass Speicher-Wasserkraftwerke (nicht zu verwechseln mit Pumpspeicherwerkwerken) heute i.d.R. so betrieben werden, dass sie bevorzugt bei Mangelsituationen von Wind und PV zu Einsatz kommen.

Die Wasserkraft in Deutschland erreicht insgesamt etwa 3500 Vollaststunden im Jahr. Dennoch sind Wasserkraftwerke i.d.R. hochverfügbar und im Mittel 8.000 h pro Jahr in Betrieb, dann allerdings nur mit einer Teilleistung.

Entsprechend den Berechnungen des Umweltbundesamtes (UBA) wurden im Jahr 2023 durch die Nutzung der Wasserkraft in Deutschland rd. 16 Mio. t CO₂-Emissionen vermieden, was rd. 6,4 % der nationalen Emissionen entspricht. Die Wasserkraft weist mit 807 g/kWh verminderter CO₂-Äquivalente [2, 5] einen der größten CO₂-Vermeidungsfaktoren auf. Wasserkraft leistet also einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz und zur Erreichung der deutschen Klimaschutzziele.

Für die Stromversorgung stellt die Wasserkraft eine zuverlässige und in gewissen Grenzen flexible, plan-, steuer- und speicherbare Energiequelle dar. Sofern die Anlagen dafür ausgelegt sind, können Wasserkraftwerke bei Bedarf auch netzdienlich eingesetzt werden. Während volatile Einspeiser die Verteilnetze mit erheblichen Einspeisespitzen belasten, speisen Wasserkraftwerke ihre Leistung überwiegend stetig und mit hohen Vollastbenutzungsstunden ein, ohne temporäre Netzüberlastungen zu verursachen.

In einem zellulären Energieversorgungssystem können kleine Wasserkraftwerke durch ihre dezentrale Einspeisung und hohe Verfügbarkeit vielerorts für die lokale Stromversorgung von großer Bedeutung sein. Hier liefert die Wasserkraft z. T. schon heute Beiträge zur Energieeffizienz, Systemstabilität und Versorgungssicherheit. Dort kann ihr Einsatz ggf. auch den Netzausbaubedarf reduzieren und somit zu einer Kostensenkung beitragen, da gerade die Mittel- und Niederspannungsebenen die höchsten netzspezifischen Kosten aufweisen.

Als regelbare dezentrale Erzeuger wären Kleinwasserkraftwerke nach technischen Modifizierungen in der Lage, bei einem großflächigen Blackout einen wertvollen Beitrag zu einer gesicherten Weiterversorgung lokaler Inselnetze zu leisten. Dies erhöht die Versorgungszuverlässigkeit und kann insbesondere für die Versorgung kritischer Infrastruktur von hoher Bedeutung sein.

Bei großflächigen Blackouts können inselnetz- und schwarzstartfähige Wasserkraftwerke einen wichtigen Beitrag zum anschließenden Netzwiederaufbau leisten.

Außerdem kann die Wasserkraft durch ihre rotierenden Massen Momentanreserve bereitstellen, um die Netze bei sehr kurzfristigen Schwankungen stabil zu halten [6].

Neben der Stromversorgung dient Wasserkraft der öffentlichen Daseinsvorsorge. So liegen die Errichtung und der Betrieb von Wasserkraftanlagen samt Nebenanlagen nach der Novelle des EEG 2023, wie auch andere EE-Anlagen, im überragenden öffentlichen Interesse und dienen der öffentlichen Sicherheit [7].

Zugleich muss die Wasserkraft die ebenfalls im öffentlichen Interesse liegenden Kriterien des Naturschutzes und Gewässerschutzes gemäß der Europäischen Wasserrahmen-Richtlinie und des Wasserhaushaltsgesetzes einhalten. Wesentlich ist hierbei die Einhaltung von Kriterien der artenschonenden Durchgängigkeit der Anlagen für Fische und andere Lebewesen, z.B. durch Fischtreppen und innovative Einlassrechen[8]. Dies kann z.B. durch innovative Einlassrechen erfolgen. Ebenso sind gesetzliche Anforderungen für Mindestwassermengen im Flusslauf einzuhalten. Umweltverbände betonen hierbei das Primat der ökologischen Gewässerqualität, da der Strombeitrag der Wasserkraft auch durch andere Techniken mit geringeren Umwelteinwirkungen und kostengünstiger leistbar ist [9, 10].

Literatur

- [1] Statistisches Bundesamt, Bruttostromerzeugung in Deutschland. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Energie/Erzeugung/Tabellen/bruttostromerzeugung.html#fussnote-3-103884> (Zugriff am: 26. September 2024).
- [2] Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) am Umweltbundesamt, Erneuerbare Energien in Deutschland: Daten zur Entwicklung im Jahr 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/erneuerbare-energien-in-deutschland-2023> (Zugriff am: 26. September 2024).
- [3] Bundesverband Deutscher Wasserkraftwerke e.V., Wasserkraft in Zahlen. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.wasserkraft-deutschland.de/wasserkraft/wasserkraft-in-zahlen.html>.
- [4] Bruno Burger, Energy-Charts. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.energy-charts.info>.
- [5] Umweltbundesamt, Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/emissionsbilanz-erneuerbarer-energietraeger-2022> (Zugriff am: 26. September 2024).
- [6] M. Knechtges und A. Moser, „Beitrag der deutschen Wasserkraftanlagen zur Momentanreserve“, VGB Power-Tech, Nr. 9, S. 64–68, 2021.
- [7] Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare- Energien-Gesetz): EEG 2023, 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/
- [8] J. Knott, M. Mueller, J. Pander und J. Geist, „Fischökologisches Monitoring an innovativen Wasserkraftanlagen: Zusammenfassung zum Abschlussbericht 2022“, Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) Band 12: Gesamtbewertung, Juli 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.lfu.bayern.de/wasser/fischschutz_fischabstieg/ergebnisse/index.htm. Zugriff am: 17. Februar 2025.
- [9] NABU. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.nabu.de/umwelt-und-ressourcen/energie/erneuerbare-energien-energiewende/wasserkraft/30246.html> (Zugriff am: 17. Februar 2025).
- [10] BUND. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bund.net/energiwende/erneuerbare-energien/wasserkraft/> (Zugriff am: 17. Februar 2025).

Autoren

Dr. Werner Neumann, BUND

Dr. Martin Kleimaier, Leiter ETG Fachbereich V1

Prof. Dr.-Ing. Hendrik Lens, Universität Stuttgart

Stand: Juni 2025