

Produktion von »grünem« Wasserstoff

Identifikation von Gunstregionen und Potenzialabschätzung am Beispiel von Georgien

Wolfram Tuschewitzki, Fabian Carels, Martin Kaltschmitt

1. Einleitung

Um das weitere Voranschreiten des anthropogenen Klimawandels wirksam zu begrenzen, müssen die globalen – und damit auch die nationalen – Energieversorgungssysteme, die derzeit häufig nahezu ausschließlich auf der Nutzung fossiler Energieträger basieren, möglichst umgehend transformiert werden. Eine zentrale Maßnahme hierfür ist die weitgehende Umstellung auf Treibhausgas-neutrale Energieträger. Prominentestes Beispiel dafür ist »grüne« elektrische Energie, die aus erneuerbaren Energien wie beispielsweise Windkraft oder Solarstrahlung bereitgestellt werden kann. In vielen Energieverbrauchssektoren, wie beispielsweise dem Verkehr oder der Wärmebereitstellung für Gebäude, können die derzeit genutzten fossilen Energieträger auch durch den direkten und unmittelbaren Einsatz von »grünem« elektrischen Strom einfach und oft unter gleichzeitig merklichen Effizienzgewinnen substituiert werden.

Diese Entwicklungstendenz hin zu einem vermehrten Einsatz elektrischer Energie im Energiesystem wird national wie auch international immer deutlicher; die nationalen Energiesysteme vieler Staaten dieser Welt entwickelten sich in den letzten Jahrzehnten hin zu immer höheren Anteilen elektrischer Energie relativ zum gesamten jeweiligen Primärenergieaufkommen. Dieser allgemeine Trend gilt jedoch zumeist nur für bestimmte Teile der entsprechenden Volkswirtschaft. In einigen Sektoren, wie beispielsweise der Luftfahrt, der chemischen Industrie oder der Stahlherstellung, ist die direkte Nutzung von (erneuerbarem, »grünem«) elektrischen Strom aus technischen Gründen nicht oder nur in einem sehr begrenzten Umfang möglich. Derartige Energieverbrauchssektoren können auch in absehbarer Zukunft nur über den Einsatz »grüner« energiereicher Moleküle defossilisiert werden, da für die jeweiligen Anwendungen entweder hohe Energiedichten oder bestimmte chemische Eigenschaften erforderlich sind, die »grüne« Elektronen nicht aufweisen.

»Grüne« energiereiche Moleküle können entweder aus biogenen Rohstoffen (d. h. Biomasse) bereitgestellt oder mit Hilfe einer elektrochemischen Spaltung von Wasser unter Einsatz elektrischer Energie in Form von Wasserstoff erzeugt werden; dieser »grüne« Wasserstoff kann danach entweder direkt als molekularer Energieträger/

als energiehaltiges Molekül genutzt, oder mittels geeigneter Syntheseverfahren zu energiereichen komplexeren flüssigen oder gasförmigen chemischen Verbindungen weiterverarbeitet werden. Vor dem Hintergrund der a priori beschränkten und regional stark variierenden Verfügbarkeit von Biomasse, die für derartige Zwecke potenziell einsetzbar ist und nicht im Nahrungs- und Futtermittelmarkt bzw. als Industrierohstoff in den bereits etablierten Märkten benötigt wird, spielen »grüne« Moleküle, die mittels elektrischer Energie bereitgestellt werden, aller Voraussicht nach eine Schlüsselrolle für die Defossilierung von Sektoren, die nicht direkt elektrifiziert werden können.

Als die Schlüsseltechnologie hierfür gilt aus heutiger Sicht die Elektrolyse von Wasser, bei der mit Hilfe von aus regenerativen Energien bereitgestellter elektrischer Energie »grüner« Wasserstoff produziert werden kann. Dieses mittels Pipelines gut transportierbare und in Salzkavernen langfristig nahezu verlustfrei speicherbare gasförmige »Plattformmolekül« eröffnet eine Vielzahl weiterer technischer und systemischer Optionen für die Deckung der energetischen und stofflichen Nachfrage bestimmter Sektoren einer Volkswirtschaft.

Energiereiche »grüne« Moleküle lassen sich im Vergleich zu elektrischer Energie i. Allg. effizienter und flexibler über lange Distanzen transportieren. Daher ermöglichen Wasserstoff und insbesondere ausgewählte Wasserstoffderivate neben ihrem möglichen Einsatz in vielen Verbrauchssektoren auch einen internationalen Handel mit erneuerbaren Energien bzw. mit »grünen« Molekülen. Das Ziel derartiger Überlegungen ist es, analog zur heutigen Situation bei fossilem Erdöl und Erdgas, einen globalen Markt für erneuerbare Energien bzw. »grüne« Moleküle aufzubauen und in den kommenden Jahren immer mehr auszuweiten. Auf diese Weise könnten Regionen/Länder mit besonders guten Voraussetzungen für die kostengünstige und großskalige Produktion von »grünem« Wasserstoff und dessen Derivaten (sogenannte Gunstreionen) zu Exporteuren energiereicher »grüner« Moleküle werden. Umgekehrt könnten Länder/Regionen mit einem begrenzten Angebot erneuerbarer Energien oder mit einer (relativ) hohen inländischen Energienachfrage über einen solchen Markt Treibgas-neutrale Energieträger flexibel und nachfrageorientiert importieren. Entsprechende energiepolitische Bestrebungen zum Aufbau eines solchen »grünen« globalen Energiemarktes zeigen sich beispielsweise in der RePowerEU-Strategie der Europäischen Union (EU), die bereits ab dem Jahr 2030 den Import von rund 10^6 t/a bzw. ca. 330 TWh/a an Wasserstoff aus Drittstaaten vorsieht, um die EU-weite Nachfrage an klimaneutralen Energieträgern zu decken und parallel dazu die Abhängigkeit von fossilen Energieimporten sukzessive zu verringern.

Wasserstoff wird typischerweise als »grün« bezeichnet, wenn er ausschließlich durch Elektrolyse von Wasser unter Verwendung von Strom aus erneuerbaren Energien (z. B. aus Windkraft, Solarstrahlung, Wasserkraft, Geothermie) hergestellt wird. Die EU hat im Rahmen der Renewable Energy Directive (RED) darüber hinaus präzisiert, welche Kriterien zwingend erfüllt sein müssen, damit Wasserstoff als »grün« gilt. Nach dieser EU-Vorgabe muss die dafür eingesetzte elektrische »grüne« Energie mittels Anlagen erzeugt werden, die zusätzlich zu bereits bestehenden elektrischen Kapazitäten errichtet werden (»Zusätzlichkeit«), zeitlich mit dem Wasserstoffproduktionsprozess korrelieren (»Zeitgleichheit«) und geografisch innerhalb derselben Strompreiszone erzeugt werden (»geografische Korrelation«). Außerdem muss nachgewiesen werden, dass durch die Produktion und Nutzung des Wasserstoffs min-

destens 70 % weniger Treibhausgasemissionen verursacht werden als bei einer Referenztechnologie auf der Basis fossiler Energieträger. Diese gesetzlich verankerten Anforderungen sollen sicherstellen, dass »grüner« Wasserstoff auch tatsächlich zur Treibhausgasreduktion beiträgt und gleichzeitig eine nachhaltige und klimaneutrale (Weiter)Entwicklung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien unterstützt.

Die Suche nach geeigneten Standorten für eine möglichst kostengünstige Produktion von »grünem« Wasserstoff/»grünen« Wasserstoffderivaten in energiewirtschaftlich relevanten Mengen insbesondere in sogenannten Gunstregionen – und im Speziellen für den Export – stellt somit eine zentrale strategische Herausforderung für die kommenden Jahre dar, wenn die hochgesteckten Klimaschutz- bzw. Wasserstoffimportziele unter Beachtung ökonomischer Kriterien erreicht werden sollen. Deshalb ist es das Ziel der folgenden Ausführungen, aufzuzeigen, wie potenziell geeignete Gunstregionen/Exportregionen für die Produktion von »grünem« Wasserstoff und Wasserstoffderivaten systematisch identifiziert und bewertet werden können. Dazu wird exemplarisch am Beispiel Georgiens untersucht, welche Faktoren bei der Standortwahl zu berücksichtigen sind bzw. wie ein strukturierter Analyseansatz realisiert werden kann. Auf Grundlage der damit ermittelten Fläche der Gunstregionen wird im Anschluss ein maximales Wasserstoffproduktionspotenzial abgeschätzt.

Der hier exemplarisch ausgewählte Staat Georgien liegt an der östlichen Seite des Schwarzen Meeres und hat knapp 4 Mio. Einwohner auf einer Landesfläche von rund 69 700 km². Georgien zeichnet sich durch eine Reihe potenziell vorteilhafter Standortbedingungen für einen Wasserstoffexport aus; dazu zählen umfangreiche Wasserkraftressourcen, die zur Stromerzeugung z.T. bereits genutzt werden bzw. werden könnten, eine günstige geographische Lage an der Schnittstelle zwischen Europa und Asien, sowie eine bereits bestehende Energieinfrastruktur im Um- und Ausbau.

2. Vorgehensweise zur Auswahl von Gunstregionen und zur Potenzialabschätzung

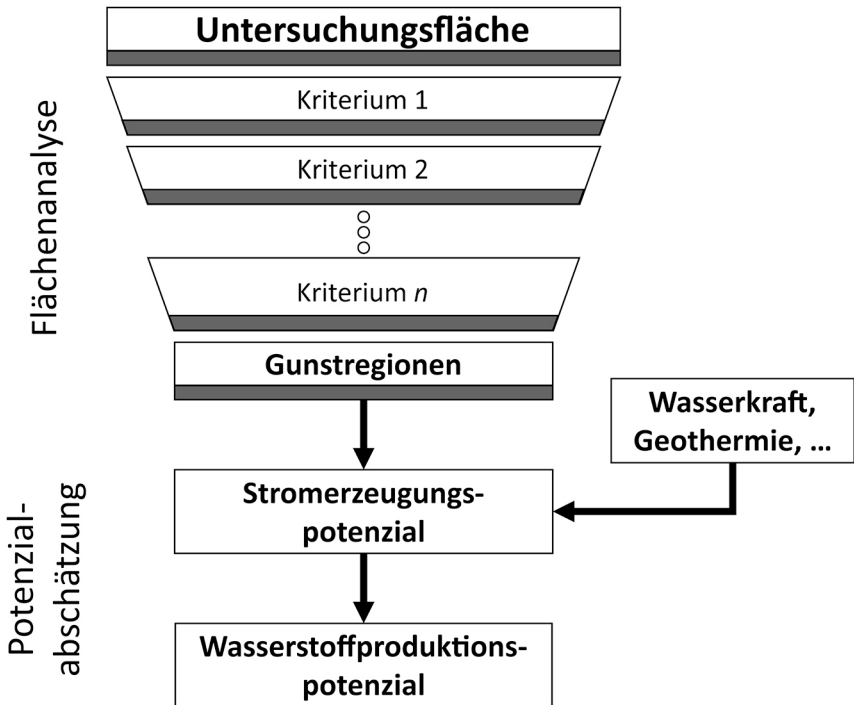
Die Auswahl gut geeigneter Regionen für die Herstellung von »grünem« Wasserstoff ist entscheidend, um möglichst geringe Wasserstoffgestehungskosten zu realisieren. Im Folgenden wird zunächst eine entsprechende Methodik zur systematischen Analyse von Flächen hinsichtlich ihrer Eignung für eine »grüne« Wasserstoffproduktion vorgestellt und diskutiert. Anschließend wird ein Vorgehen zur überschlägigen Abschätzung der auf einer dezidierten Fläche produzierbaren Wasserstoffmenge erläutert. Dazu wird zunächst der allgemeine methodische Ansatz erläutert, bevor die einzelnen Teilaspekte vertieft beschrieben werden.

Bei einer derartigen Analyse ist grundsätzlich zwischen der Potenzialbewertung auf Länderebene (hier: Georgien) und der Bewertung eines einzelnen Standorts (z. B. ein bestimmtes Planquadrat in einem bestimmten Land mit einer definierten räumlichen Auflösung) zu unterscheiden. Eine großflächige Analyse auf Länderebene benötigt insbesondere geografisch aufgelöste Daten, während eine tiefergehende Analyse bestimmter Einzelstandorte eine vertiefte Datendisaggregation und vor allem eine weitergehende zeitliche Auflösung der Daten, beispielsweise der Solarstrahlung und insbesondere der Windkraft, erfordert, um das vorhandene Potenzial möglichst genau ermitteln und damit letztlich bewerten zu können. Im Folgenden wird nur die

Vorgehensweise zur Analyse eines großflächigen Potenzials eines gesamten Landes diskutiert. Die so identifizierten, vielversprechenden Gunstflächen könnten in einer nachfolgenden Detailprüfung genauer untersucht werden, um besonders geeignete Einzelstandorte zu identifizieren und zu bewerten. Eine solche Bewertung von einzelnen Standorten wird hier nicht vorgenommen. Anstatt dessen wird auf Basis der im ersten Schritt identifizierten Gunstflächen die maximal bereitstellbare Wasserstoffmenge abgeschätzt (Abb. 1).

Mengenpotenzial und auch Kosten einer Wasserstoffproduktion sind von sehr vielen Einzelfaktoren abhängig. Diese Einflussgrößen können in zwei Kategorien unterteilt werden: standortabhängige (u. a. geografische) Faktoren, die relativ statisch sind, und Faktoren, die im Wesentlichen von der technologischen Entwicklung abhängen (u. a. Kenngrößen von Konversionsanlagen). Letztere Gruppe von Faktoren, wie beispielsweise der Wirkungsgrad der Elektrolyseure, können als weltweit vergleichbar betrachtet werden, da die entsprechenden Technologien am Weltmarkt angeboten werden und infolge des globalen Wettbewerbs i. Allg. über einen vergleichbaren technischen Stand und damit auch ähnliche Kenngrößen verfügen. Die lokalen Standortbedingungen (z. B. Oberflächenbeschaffenheit, lokale mittlere Windgeschwindigkeit) hingegen variieren demgegenüber häufig regional stark, sind jedoch in vielen Fällen durch die von der Natur vorgegebenen Randbedingungen definiert; deshalb liegt hier der Schwerpunkt dieser Analyse.

Abbildung 1: Vorgehensweise bei der Ermittlung von Gunstregionen und anschließender Abschätzung eines maximalen Wasserstoffproduktionspotenzials



2.1 Flächenanalyse

Für eine belastbare Auswahl von Gunstregionen bei der Analyse einer definierten Untersuchungsfläche (z.B. einem Land) müssen viele unterschiedliche regionale Einflussgrößen beachtet werden. Nachfolgend werden wichtige derartige Faktoren diskutiert, die für eine zu realisierende Fallstudie – beispielsweise für ein bestimmtes Land – von Bedeutung sein können. Dabei können in Abhängigkeit von der untersuchten Fläche und den fallspezifischen Prioritäten zusätzliche Faktoren hinzukommen bzw. bestimmte Einflussgrößen von geringerer Bedeutung sein (und damit ggf. wegfallen); daher kann die dargestellte Vorgehensweise keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben und nur das generelle Vorgehen erläutern, das dann fallspezifisch anzupassen ist.

Eine derartige Analyse startet typischerweise mit der Definition der zu untersuchenden Fläche; diese kann beispielsweise ein Land oder eine definierte Region umfassen (Abb. 1). Darauf folgend wird diese Fläche nach unterschiedlichen Kriterien überprüft, die zum Ausschluss von bestimmten Teilflächen führen können, die aufgrund ihrer derzeitigen Nutzung bzw. Charakteristik nicht für die Errichtung von Energieerzeugungsanlagen und Elektrolyseuren erschließbar sind (z. B. Siedlungsflächen, Wasserflächen). Die sich daraus ergebenden prinzipiell verfügbaren Flächen können dann zusätzlich im Hinblick auf weitere Kriterien untersucht werden.

Sollen vielversprechende Flächen für eine Elektrolyse-basierte Wasserstoffherzeugung identifiziert werden, dann sind unabhängig von der zu untersuchenden Region i. Allg. immer die lokalen Gesteungskosten für Strom eine sehr wichtige Einflussgröße, da die Elektrolyse zur elektrochemischen Spaltung von Wasser in Sauerstoff und Wasserstoff sehr energieintensiv ist – zur Wasserspaltung werden mindestens 283,5 kJ/mol an elektrischer Energie benötigt. In der anlagentechnischen Praxis real existierender Elektrolyseure ist die gegebene Stromnachfrage aufgrund unvermeidbarer Verluste und der, aus technischer Sicht zwingend benötigten Nebenaggregate, nochmals höher. Daher machen üblicherweise die Stromkosten den größten Anteil an den Produktionskosten von »grünem« Wasserstoff aus. Entsprechend haben die Errichtung und der Betrieb der benötigten Anlagen bzw. die Verfügbarkeit günstiger Stromerzeugungsoptionen aus erneuerbaren Energien vor Ort oder ein entsprechender kostengünstiger Einkauf am lokalen Strommarkt (falls möglich und infolge der regulatorischen Rahmensetzung erlaubt) besondere Bedeutung.

Das bedeutet in der Konsequenz, dass für eine kostengünstige Herstellung von »grünem« Wasserstoff gute Bedingungen für die Stromproduktion aus erneuerbaren Energien vorliegen sollten bzw. müssen. Solche vorteilhaften Bedingungen sind, je nach Region, u. a. hohe mittlere Windgeschwindigkeiten, ein hohes Solarstrahlungsangebot, stark wasserführende Flüsse mit einer hohen nutzbaren Fallhöhe und/oder sehr günstige geothermische Gegebenheiten (d. h. hohe erschließbare Temperaturen in geringer Tiefe). Darüber hinaus sollte die Region über eine funktionsfähige und idealerweise gut ausgebaute energetische Infrastruktur verfügen, wie etwa ein stabiles, leistungsfähiges Stromnetz oder zukünftig ein Wasserstoffnetz, um den Transport der erzeugten elektrischen Energie bzw. des erzeugten Wasserstoffs zu ermöglichen. Auch muss möglichst kostengünstig Wasser verfügbar sein, das ohne ökologische und soziale bzw. sonstige Konflikte genutzt werden könnte. Sind derartige – und potenziell weitere Voraussetzungen – erfüllt, kann eine derart identifizierte

Gunstregion in die engere Auswahl für eine weitergehende Standortidentifikation genommen oder als Grundlage für eine Potenzialabschätzung genutzt werden.

2.1.1 Flächenverfügbarkeit

Für die Errichtung von Erzeugungsanlagen für »grünen« Wasserstoff und die erforderliche Elektrizität wird ausreichend Fläche benötigt. Während Elektrolyseure einschließlich der notwendigen Nebenaggregate und der potenziell benötigten Zufahrtswege i. Allg. relativ wenig Fläche beanspruchen, sind die Flächenanforderungen für z.B. Windkraftanlagen und Photovoltaikanlagen im Vergleich dazu meist erheblich höher. Kann der Strom nicht kostengünstiger über Power-Purchase-Agreements (PPAs) aus anderen Regionen bezogen werden, ist daher eine genaue Untersuchung und Identifikation der für die Installation von Windkraftanlagen und Photovoltaiksystemen verfügbaren Flächen zwingend notwendig.

Hierfür können verschiedene öffentlich zugängliche Datensätze kombiniert und durch die Definition bestimmter Ausschlusskriterien (z. B. Naturschutzgebiete) die potenziell nutzbaren Flächen ermittelt werden. Üblicherweise sind derartige Daten der Landnutzung nach Nutzungsklassifikationen aufgeteilt; beispielsweise sind die Landflächen in Kategorien wie u. a. bebaute Flächen, landwirtschaftliche Flächen, Wälder, Feuchtgebiete und Gewässer unterteilt. Dadurch können für die Errichtung derartiger Energieerzeugungsanlagen ungeeignete Flächen – etwa Wasserflächen oder bereits bebaute Gebiete – ausgeschlossen werden. Gleiches gilt darüber hinaus für Schutzgebiete jedweder Art, für militärische Sperrgebiete, für Gebiete mit zu hohen Hangneigungen und bestimmte Höhenlagen bzw. (Hoch)Gebirgsregionen.

Ergebnis dieses Schrittes ist vor allem der Ausschluss von Regionen, in denen mit großer Wahrscheinlichkeit eine Energieerzeugung aus erneuerbaren Energien im großskaligen Maßstab nicht möglich ist. Für die resultierenden Flächen kann ein theoretisches Energieerzeugungspotenzial bestimmt werden. Die Aussagekraft einer derartigen Potenzialbewertung beruht dabei stark auf der Tiefe der Analyse und der jeweils ausgewählten Kriterien; beispielsweise sind in der Regel für eine tatsächliches Bauvorhaben auch die Besitzverhältnisse zu klären, die aus den öffentlich zugänglichen Datenbanken nicht zwingend hervorgehen.

2.1.2 Angebot an Strom aus erneuerbaren Energien

Zur Abschätzung des lokalen Potenzials einer Stromerzeugung aus regenerativen Energien werden u. a. meteorologische, klimatische und geologische Daten herangezogen; dies gilt insbesondere für die lokalen Windgeschwindigkeiten, die vor Ort gegebenen Temperaturen, die örtliche solare Einstrahlung, den gegebenen mittleren Niederschlag sowie im Kontext der Geothermienutzung für die lokalen geothermischen Temperatur-Tiefen-Zusammenhänge bzw. die förderbaren Dampfmengen (so weit bekannt).

Typischerweise wird für die Zusammenstellung derartiger Daten für eine erste (grobe) Potenzialabschätzungen auf entsprechende öffentlich zugängliche Datenbanken zurückgegriffen. Im Falle der Solar- und Windenergienutzung lassen sich anhand historischer Wetterdaten über idealerweise mehrere Jahre und unter Berücksichtigung der Spezifikationen repräsentativer Windkraftanlagen und Photovoltaikmodule zeitliche Verfügbarkeiten und mögliche elektrische Stromerzeugungsmengen für die jeweiligen Kraftwerksarten relativ belastbar ableiten.

Ein häufig auftretender methodischer Zielkonflikt besteht in der Nutzung von Wetterdaten. Hier muss oft eine Entscheidung getroffen werden zwischen einer höheren geografischen Auflösung (wie es beispielsweise bei der Windgeschwindigkeitsverteilung sinnvoll sein kann, die regional sehr stark variieren kann) oder einer höheren zeitlicher Auflösung (z. B. bei der Variation der Solarstrahlung zwischen Tag/Nacht und Sommer/Winter). Beides zusammen führt schnell zu einem kaum beherrschbaren Datenaufkommen und dadurch zu einem sehr rechenintensiven Vorgehen zur Abschätzung der entsprechenden Stromerzeugungspotenziale.

Bei einer ersten (überschlägigen) Abschätzung auf Länderebene wird deshalb i. Allg. auf eine höhere zeitliche Auflösung zugunsten einer besseren räumlichen Disaggregation verzichtet. Ein möglicher Kompromiss kann beispielsweise eine Vorauswahl von (mehr oder weniger) repräsentativen Standorten auf Basis von Wetterdaten mit einer geringen zeitlichen Auflösung sein, die dann nachfolgend im Detail mit einer hohen zeitlichen Auflösung weitergehend untersucht werden.

Beispielsweise sind auf globaler Ebene Daten mit einer hohen zeitlichen Auflösung (z.B. Stundenmittelwerte im Jahresverlauf) öffentlich verfügbar, die jedoch oft nur mit einer relativ groben räumlichen Auflösung von ca. $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ geografischer Länge und Breite (für Georgien entspricht dies ca. $30 \text{ km} \times 30 \text{ km}$) abrufbar sind. Während regionale Unterschiede bei der solaren Einstrahlung in dieser räumlichen Auflösung in der Regel eher gering ausfallen, hängen die mittleren Windgeschwindigkeiten stark von den lokalen Gegebenheiten (u. a. Topographie) ab. Daher können die öffentlich zugänglichen Informationen häufig nur großflächige Mittelwerte abbilden, sodass einzelne Standorte in der Realität erheblich höhere oder deutlich geringere Windenergiepotenziale aufweisen können. Dies ist bei der Ergebnisinterpretation von auf dieser Basis ermittelten Windenergiepotenzialen zu berücksichtigen.

Wind- und Photovoltaikanlagen sind i. Allg. vergleichsweise flexibel installierbar. Im Unterschied dazu sind die Potenziale der Wasserkraft und der Geothermie regional erheblich stärkeren Variationen unterworfen und daher sehr standortabhängig; deshalb ist für diese Energiequellen eine derartige Standortanalyse für gewöhnlich nochmals deutlich aufwändiger (sie kommt aber nur sehr selten zum Tragen, da (a) vielversprechende Wasserkraft-Standorte aufgrund der oftmals langjährigen Nutzung häufig bereits aus anderen Untersuchungen bekannt sind und (b) potenziell erschließbare Geothermie-Standorte global selten vorkommen und speziell vor Ort untersucht werden müssen).

Ergebnis dieses Schrittes sind Flächen mit gutem Potenzial erneuerbarer Energien und damit die räumliche Verfügbarkeit der potenziell kostengünstigen Stromerzeugung. Bei der Verwendung von Daten mit ausreichender zeitlicher Auflösung steht zudem die entsprechende zeitliche Verfügbarkeit der potenziellen Stromerzeugung zur Verfügung. Die Stromerzeugungspotenziale können als Erzeugungspotenziale pro Fläche und Zeit ($\text{MWh}/(\text{a km}^2)$) oder als jährliche Volllaststunden (h/a) angegeben werden.

2.1.3 Nähe zu vorhandener Infrastruktur

Neben dem Angebot an erneuerbaren Energien, z. B. Windkraft und Solarstrahlung, das mithilfe entsprechender Anlagen erschlossen werden kann, ist die Nähe zu bestehender Infrastruktur (u. a. Strom- und Gasleitungen, Straßen- und Schienenverbindungen, Wasserversorgung, Siedlungen mit qualifizierten Arbeitskräften) ein weiterer wesentlicher Standortfaktor. Beispielsweise kann eine günstige Lage bezogen

auf vorhandene (Energie)Infrastrukturelemente erhebliche Kosten einsparen, eine potenzielle Umsetzung vor Ort erleichtern sowie die Effizienz und Nachhaltigkeit der Wasserstoffherzeugung und -verteilung signifikant erhöhen.

Der Zugang zu einem vorhandenen und nutzbaren Stromnetz ist aufgrund der für den Betrieb der Elektrolyseure benötigten elektrischen Energie meist von besonderer Bedeutung. Eine gute Anbindung an ein stabiles und leistungsfähiges Netz mit idealerweise vorhandenen freien (Leitungs- bzw. Transport-)Kapazitäten ermöglicht einen effizienten Strombezug aus dem Netz (z. B. über PPAs) und potenziell auch die Einspeisung einer etwaigen Überschussproduktion von Stromerzeugungsanlagen, die direkt mit dem Elektrolysestandort verbunden sind. Ein entsprechender Anschluss an das Netz der öffentlichen Versorgung eröffnet darüber hinaus auch die Option, den Elektrolyseur netzdienlich zu betreiben, wodurch dieser potenziell zur Stabilisierung des Stromnetzes beitragen kann. Je nach Region, Energieversorger und/oder lokaler Versorgungsstruktur kann dies zusätzlich die Wasserstoffgestehungskosten positiv beeinflussen. Wird die für die Elektrolyse genutzte »grüne« Elektrizität vollständig oder teilweise aus dem Stromnetz bezogen, dann müssen nach der EU-RED bestimmte Voraussetzungen erfüllt sein. Die entsprechenden Kriterien für den »grünen« Strombezug nach der RED III erlauben auch die Nutzung von PPAs; demnach müssen die Elektrolyseure und die Stromerzeugungsanlagen nicht am gleichen Ort liegen, jedoch über das lokal vorhandene Netz der öffentlichen Versorgung miteinander verbunden sein.

Ein bestehendes Gasnetzwerk, das für den Transport des erzeugten »grünen« Wasserstoffs genutzt werden kann, kann ebenfalls von großem Vorteil sein, da der Neubau von Pipelines i. Allg. einen wesentlichen Kostenfaktor darstellt. Beispielsweise kann der erzeugte Wasserstoff entweder direkt oder mit einer kurzen Zuleitung in bestehende Wasserstoffnetze (falls verfügbar) eingespeist werden. Additiv oder eher alternativ können auch bestehende Erdgaspipelines (falls technisch möglich) zu Wasserstoffpipelines umgerüstet werden. Aus Sicht eines Exportlandes ist die Verfügbarkeit von Pipelines besonders vorteilhaft, weil so der Wasserstoff im Binnenland in der Nähe der Stromerzeugungseinrichtungen erzeugt und anschließend vergleichsweise einfach an die Küste zu einer Hafenanlage/zu der jeweiligen Exporteinrichtung (z. B. einer internationalen Pipeline) transportiert werden kann.

Die sichere und ausreichende Versorgung der Elektrolyseurstandorte mit Wasser ist ebenfalls wichtig, da Wasser als Ausgangsstoff für die Elektrolyse unerlässlich ist. Der Standort sollte daher eine unkomplizierte Anbindung an optimalerweise vorhandene Wasserversorgungsnetze ermöglichen, um den Aufwand für Aufbereitung und Zuführung gering zu halten. Alternativ dazu kann – insbesondere an Küstenstandorten – auch die Anbindung an eine vorhandene und ggf. zu erweiternden Meerwasserentsalzungsanlage sinnvoll sein; insbesondere dann, wenn in der zu untersuchenden Region Süßwasser eine stark begrenzt verfügbare Ressource ist.

Zusätzlich ist die Nähe zum öffentlichen Straßennetz für die Bau- und Betriebslogistik unerlässlich. Dies gilt auch für den täglichen Transport der Arbeitskräfte, die den Betrieb derartiger komplexer Anlagen sicherstellen.

Insgesamt kann durch eine gut ausgebaute und nutzbare Infrastrukturanbindung der zusätzliche Aufwand von Projekten zur Wasserstoffherzeugung reduziert werden. Sollte der Bau neuer Infrastruktur unvermeidbar sein, ist eine Priorisierung erforderlich.

Ergebnis dieses Schritts sind identifizierte Flächen, bei denen der Aufwand für die Erschließung als gering einzuschätzen ist. Da je nach geplanter Größe des jewei-

ligen Vorhabens und des entsprechenden vorhandenen Energieerzeugungspotenzials auch die Neuerrichtung von größeren Infrastrukturanlagen (Straßen, Stromtrassen, Pipelines) denkbar ist, sind i. Allg. derartige Aspekte kein vollständiges Ausschlusskriterium. Vor diesem Hintergrund sollte ein vollständiger Ausschluss von Standorten anhand dieser Kriterien im Rahmen einer techno-ökonomischen Detailprüfung sorgfältig überprüft werden.

2.1.4 Ermittlung der Gunstregionen

Die diskutierten Standortfaktoren werden zunächst einzeln betrachtet und fließen anschließend in eine entsprechende integrale Gesamtbewertung ein. Einige Kriterien führen zu sofortigen Ausschlüssen (beispielsweise Naturschutzgebiete), während andere Aspekte die Standorteignung ggf. nur graduell beeinflussen können. Eine Auswahl geeigneter Standorte erfordert somit eine gewichtete Bewertung der Faktoren, die fallspezifisch angepasst werden muss. So ergibt sich zunächst eine Übersicht über potenziell gut geeignete Standorte/Gunstregionen. Für eine grobe Potenzialabschätzung können diese Regionen direkt verwendet werden. Soll hingegen ein einzelner Standort für die Umsetzung eines Einzelprojektes ausgewählt werden, können ausgehend von dieser groben Analyse Standorte zur weiterführenden, detaillierteren Untersuchung ausgewählt werden. Dabei werden dann lokale ökonomische Faktoren und lokale Wetterbedingungen mit hoher zeitlicher Auflösung verwendet, um das standortspezifische Potenzial möglichst genau abzuschätzen.

2.2 Potenzialabschätzung

Zur Abschätzung des maximalen Wasserstoffproduktionsvolumens dient die zuvor ermittelte Fläche der Gunstregionen als Grundlage. Zunächst wird die installierbare Leistung (Windkraft- und Photovoltaik-Anlagen) beispielsweise in Megawatt pro Quadratkilometer angesetzt; dabei werden typischerweise die Belegungsdichten existierender Wind- und Solarparks zugrunde gelegt. Diese sogenannten »Land use requirements« (LURs) beschreiben i. Allg. die durchschnittliche Flächennutzung, die erforderlich ist, um eine Anlage mit einer bestimmten Stromerzeugungskapazität zu errichten. Bei der Verwendung von derartigen LURs ist darauf zu achten, dass diese in Abhängigkeit der lokalen Gegebenheiten sehr große Unterschiede aufweisen können, wie eine kürzlich veröffentlichte Studie, in der eine Vielzahl an LURs untersucht wurden gezeigt hat. Der dort ermittelte Median für die installierbare Kapazität pro Fläche liegt für die Windkraft bei Miteinbezug des Abstandes zwischen den Anlagen bei $3,9 \text{ MW/km}^2$ und für die Photovoltaik bei $32,4 \text{ MW/km}^2$.

Mit Hilfe der ermittelten Fläche, der installierbaren Leistung pro Fläche (LURs) und einer Annahme für die lokal erreichbaren Volllaststunden für Windkraft- und Photovoltaik-Anlagen – d.h. die Anzahl an Stunden, die eine Anlage bei Volllast betrieben werden müsste, um die tatsächlich erzeugbare Energiemenge zu produzieren – kann eine potenzielle absolute Energieerzeugung abgeschätzt werden. Die Volllaststunden können aus dem Wind- und Solarstrahlungsangebot und ggf. unter Berücksichtigung weiterer Wetterbedingungen mit Hilfe einer Referenzturbinen/eines Referenzmoduls abgeschätzt werden; sie werden in der Regel auf ein Jahr bezogen.

Aufgrund des hohen Aufwands einer flächenübergreifenden Analyse des Wasserkraft- und des Geothermiepoteziels kann der ermittelten potenziellen Energieerzeu-

gung aus Windkraft und Photovoltaik ein Potenzial aus Wasserkraft und Geothermie hinzugefügt werden, ohne dieses flächengenau abzubilden (Abb 1).

In einem letzten Schritt wird die ermittelte elektrische Energie unter Berücksichtigung von Verlusten, wie beispielsweise beim Stromtransport und durch den Wirkungsgrad der Elektrolyse, in eine potenziell bereitstellbare Wasserstoffmenge umgerechnet. Die dabei ermittelten Werte sind zwingend als eine erste grobe Abschätzung anzusehen, welche die Größenordnung der theoretisch möglichen Wasserstoffproduktionsmenge auf der untersuchten Gebietsfläche/in dem betrachteten Land anzeigt.

3. Definition Fallstudie

Zahlreiche Länder sehen in der Produktion und Vermarktung von Wasserstoff große Chancen für ihre lokale Wirtschaft. In der Folge entstehen verschiedenste Studien zur Erfassung von Wasserstoffherzeugungspotenzialen und zur Standortwahl für die Produktion. Daher wird hier die Identifikation von Gunstregionen exemplarisch am Beispiel Georgiens diskutiert.

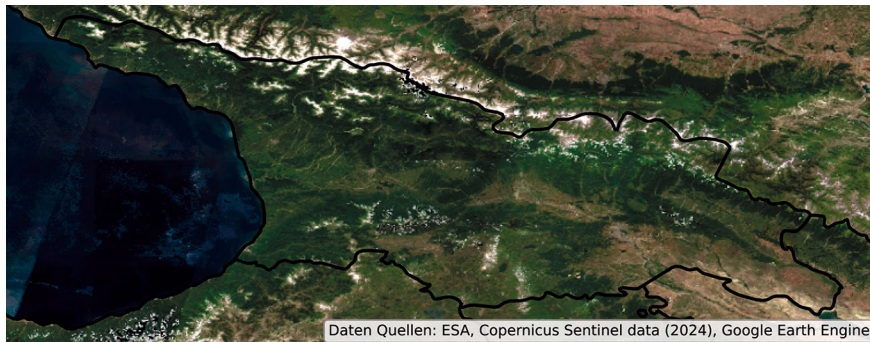
Georgien liegt im Kaukasus-Gebirge, einem etwa 1 100 km langen Gebirgszug, der sich von Nordwest nach Südost zwischen dem Schwarzen und dem Kaspischen Meer erstreckt. Der Kaukasus ist ein Teil des Alpidischen Gebirgssystems und gliedert sich in den Großen Kaukasus im Norden Georgiens sowie den Kleinen Kaukasus im Süden des Landes (Abb.2). Der Staat Georgien grenzt im Westen an das Schwarze Meer, im Norden an Russland sowie im Süden und Südosten an Aserbaidschan, Armenien und die Türkei.

Die gebirgige Landschaft prägt maßgeblich die natürlichen Ressourcen Georgiens. Insbesondere das umfangreiche Wasserkraftpotenzial, das sich aus der Lage im Kaukasus ergibt, trägt bereits heute wesentlich zur inländischen Stromerzeugung bei (81 % im Jahr 2021); außerdem ist ein weiterer Ausbau der Wasserkraft von ca. 3,4 GW installierter Leistung im Jahr 2023 auf 7,2 GW im Jahr 2033 vorgesehen. Auch ist das Potenzial für die Stromerzeugung aus Windkraft und Photovoltaik in Georgien noch kaum gehoben; d.h. es können die vielversprechendsten Standorte noch erschlossen werden. Dieses Erzeugungspotenzial bietet in Kombination mit der schon heute zu großen Teilen Treibhausgas-neutralen Deckung der nationalen Stromnachfrage eine stabile Grundlage für die zukünftige Nutzung erneuerbarer Energien zur Produktion von »grünem« Wasserstoff.

Die Wasserstoffproduktion in Georgien könnte verschiedenste positive volkswirtschaftliche Auswirkungen entfalten. Einerseits eröffnet sie beispielsweise eine mögliche Einnahmequelle durch Exporte. Andererseits kann sie potenziell einen Beitrag zur Verringerung der Abhängigkeit der nationalen Volkswirtschaft von fossilen Energieträgerimporten leisten und z. B. die Diversifizierung der Wirtschaft unterstützen. Insbesondere könnte Georgien dafür sein hohes Wasserkraftpotenzial, das zu einem großen Teil aus der Schneeschmelze in den Höhenlagen des Kaukasus gespeist wird, gemeinsam mit den vorhandenen und bisher praktisch unerschlossenen Wind- und Solarressourcen nutzen. Die intermittierende Verfügbarkeit von Wind- und Solarenergie könnte dabei durch die relativ flexible Wasserkraft ausgeglichen werden; dies könnte die Auslastung von Elektrolyseuren erhöhen und daher positive Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit der Wasserstoffherzeugung haben. Diese Fallstudie verdeut-

licht am Beispiel Georgiens, wie die Identifikation von Gunstregionen für die »grüne« Wasserstoffproduktion in Regionen mit vielfältigen erneuerbaren Energiepotenzialen erfolgen kann und welche Faktoren dabei zu berücksichtigen sind.

Abbildung 2: Satellitenbild von Georgien



Daten Quellen: ESA, Copernicus Sentinel data (2024), Google Earth Engine

4. Ergebnisse und Diskussion

Im Folgenden wird die zuvor beschriebene Methodik zur Identifikation von Gunstregionen für die »grüne« Wasserstoffproduktion exemplarisch auf Georgien angewandt. Dazu wird zunächst die entsprechende Flächenanalyse vorgestellt. Anschließend wird auf dieser Grundlage ein maximales Wasserstoffproduktionspotenzial abgeschätzt.

4.1 Flächenanalyse

Zunächst werden Gunstregionen mit einem guten Potenzial für die Stromproduktion zur Wasserstoffelektrolyse ermittelt. Die Analyse ist gegliedert in die Untersuchung der Flächenverfügbarkeit, die Quantifizierung des Angebots an erneuerbaren Energien und die Analyse der Nähe zu vorhandener Infrastruktur. Auf der Grundlage dieser Faktoren werden dann entsprechende Gunstregionen identifiziert.

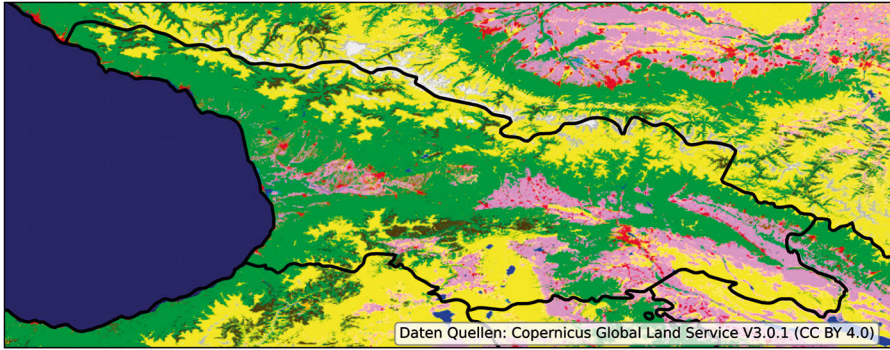
4.1.1 Flächenverfügbarkeit

Die Errichtung von Anlagen zur »grünen« Stromerzeugung und anschließenden Nutzung dieser elektrischen Energie zur Wasserelektrolyse erfordert ausreichend verfügbare Flächen. Dabei sind die Platzansprüche für Wind- und Photovoltaikanlagen erheblich, während Elektrolyseure selbst nur relativ wenig Raum benötigen. Daher schränkt die entsprechende Flächenverfügbarkeit die potenzielle Standortauswahl signifikant ein.

Für die hier durchgeführte Analyse Georgiens wurden Daten der Landnutzung auf einer Basis von 100 m × 100 m verwendet (Abb. 3). Dabei werden in der entsprechenden Datenbank die Landflächen in 22 verschiedene Klassen eingeteilt; darunter sind verschiedene Arten von Bewaldung bzw. agrarischer Nutzung, aber auch Siedlungs- und Infrastrukturflächen. Über diese Klassifizierung können nun bestimmte Flächen gänzlich oder teilweise ausgeschlossen werden. So sind beispielsweise die roten Flächen in Abb. 3 vollständig auszuschließen, da es sich um bereits bebautes Land handelt. Auch permanente Wasserflächen, Feuchtbiotope oder Flächen, die dauerhaft

mit Schnee und Eis bedeckt sind, sind für eine potenzielle technische Nutzung zur Energiegewinnung auszuschließen. Tab. 1 zeigt den Anteil der wichtigsten Landflächenklassifizierungen an der Gesamtfläche Georgiens.

Abbildung 3: Landflächenklassifizierung



Klassifizierung	
■ Strauchvegetation	■ Geschlossener Wald, immergrüne Nadelbäume
■ Krautige Vegetation	■ Geschlossener Wald, sommergrüne Laubbäume
■ Kultivierte und bewirtschaftete Vegetation / Ackerbau	■ Geschlossener Wald, Mischbestand
■ Urbanes Gebiet / Siedlungsfläche	■ Geschlossener Wald, unbekannter Typ
■ Kahle / spärliche Vegetation	■ Offener Wald, immergrüne Nadelbäume
■ Schnee und Eis	■ Offener Wald, sommergrüne Laubbäume
■ Permanente Gewässer	■ Offener Wald, Mischbestand
■ Krautiger Feuchtbiotop	■ Offener Wald, unbekannter Typ
■ Moose und Flechten	■ Offenes Meer

Tabelle 1: Anteile verschiedener Klassifizierungen an der Landesfläche Georgiens

Kategorie	Anteil an der Landesfläche
Flächen mit Wald (geschlossen und offen)	51 %
Krautige Vegetation	28 %
Kultivierte und bewirtschaftete Vegetation/Ackerbau	16 %
Urbanes Gebiet/Siedlungsfläche	2 %
Permanente Wasserflächen, Feuchtbiotope, Flächen mit Schnee und Eis	1,5 %

Zur weiteren Eingrenzung wurden topografische Daten zur Höhenlage (Abb. 4) und zur Hangneigung herangezogen (Abb. 5). Die geografische Lage Georgiens zwischen dem Großen Kaukasus im Norden und dem Kleinen Kaukasus im Süden spiegelt sich deutlich in der Topografie wider: Das Land steigt von der Küste des Schwarzen Meeres kommend kontinuierlich an und reicht bis in die Höhenlagen des Kaukasus. Die höchsten Gipfel Georgiens liegen auf einer Höhe von über 5 000 m über dem Meeresspiegel. Auch befindet sich zwischen den beiden Gebirgsketten des Großen und des Kleinen Kaukasus eine zentrale Tiefebene (Kolchische Tiefebene), die auf geringer Höhe liegt und durch geringe Hangneigungen geprägt ist.

Demgegenüber sind im Gebirge überwiegend Hangneigungen von mehr als 15 % vorherrschend. Insgesamt liegen ca. 45 % der Landesfläche unterhalb von 1 000 m Höhe und etwa 58 % der Fläche des Landes weisen eine Hangneigung von unter 15 % auf.

Während Höhenlagen unterschiedlich bewertet werden können (z.B. sind Hochebenen für Windparks oft günstig), stellen geringe Neigungen (Hangneigung < 15 %) häufig eine wichtige Voraussetzung für die kostengünstige Errichtung von Photovoltaik- oder Windkraftanlagen dar; d. h. typischerweise werden größere Flächenanteile aufgrund einer zu großen Hangneigung ausgeschlossen.

Abbildung 4: Topografische Höhe über dem Meeresspiegel

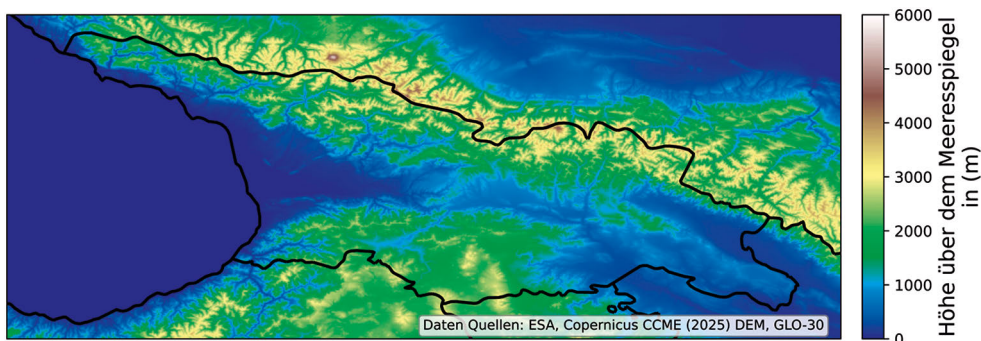
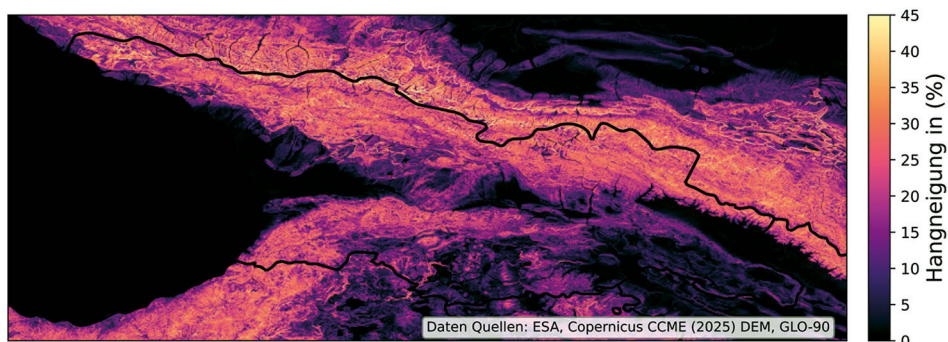
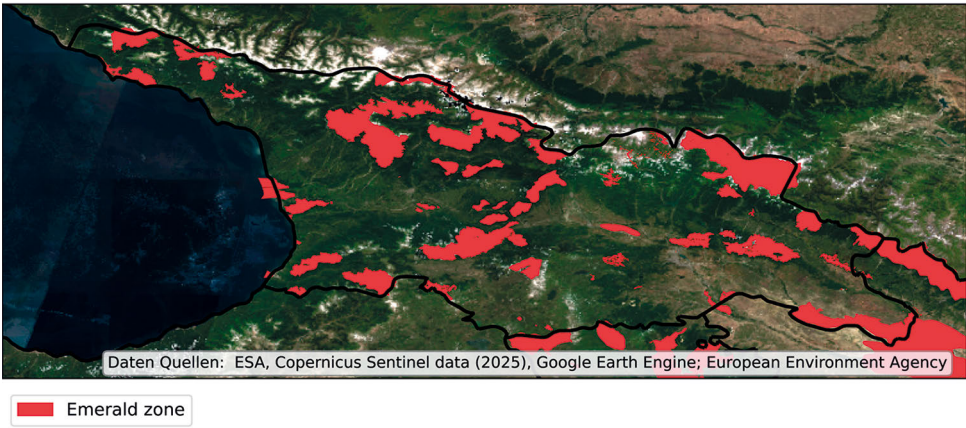


Abbildung 5: Mittlere Hangneigung



Neben der Landnutzung und den vor allem baulich und logistisch bedingten Einschränkungen bezüglich Höhenlage und Hangneigung gibt es weitere Ausschlussgründe für Flächen. Dies umfasst beispielsweise ökologisch sensible Regionen wie Naturschutzzonen und weitere Schutz- oder z.B. militärische Sperrgebiete. Exemplarisch sind die Naturschutzgebiete Georgiens in Abb. 6 dargestellt; sie kommen für eine groß angelegte »grüne« Energieerzeugung nicht in Frage. Dabei wird deutlich, dass ein relevanter Anteil (ca. 18 %) der Gesamtfläche des Landes unter Naturschutz steht. Auch sind diese Schutzgebiete relativ gleichmäßig über das ganze Land verteilt, wobei der Schwerpunkt eher im Norden im Großen Kaukasus liegt.

Abbildung 6: Naturschutzgebiete (»Emerald Zones«)

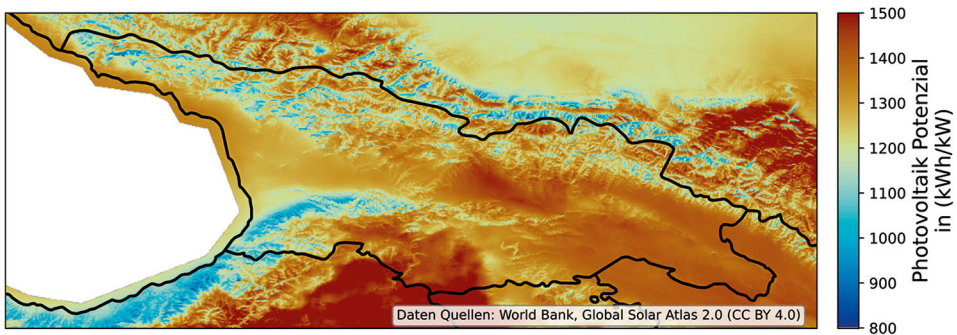


4.1.2 Angebot an Strom aus erneuerbaren Energien

Die Verfügbarkeit erneuerbarer Energieressourcen ist einer der entscheidenden Faktoren für die Standortwahl von Anlagen zur Erzeugung von »grünem« Wasserstoff. Zunächst wird das Potenzial für Photovoltaik (PV) und Windenergie in Georgien analysiert. Zusätzlich werden Standorte von Wasserkraftwerken aufgezeigt, ohne genauer auf das (zusätzliche) Energieerzeugungspotenzial einzugehen

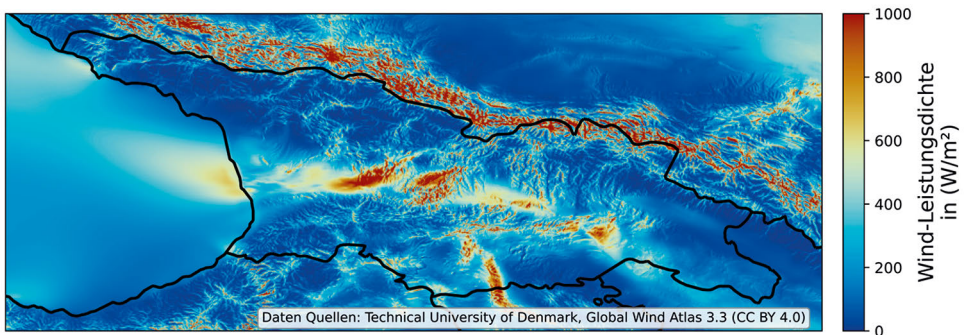
Photovoltaik. Das jährliche gemittelte Photovoltaik-Potenzial in Georgien (Abb. 7) ist als moderat bis gut einzuschätzen. Dabei haben die Grenzregion zur Türkei, die zentrale Hochebene und der Westen des Landes die höchsten Potenziale, während die gebirgsreichen Regionen im Norden etwas geringere Werte aufweisen. Große Teile Georgiens (ca. 74 %) sind beispielsweise durch Werte einer potenziellen jährlichen Photovoltaik-Stromerzeugung zwischen 1 250 und 1 500 kWh/kW gekennzeichnet; dies liegt deutlich über dem im Durchschnitt in Deutschland gegebenen Wert von etwa 1 100 kWh/kW.

Abbildung 7: Gemitteltes jährliches Photovoltaik Potenzial (Durchschnitt der Jahre 1999 bis 2018)



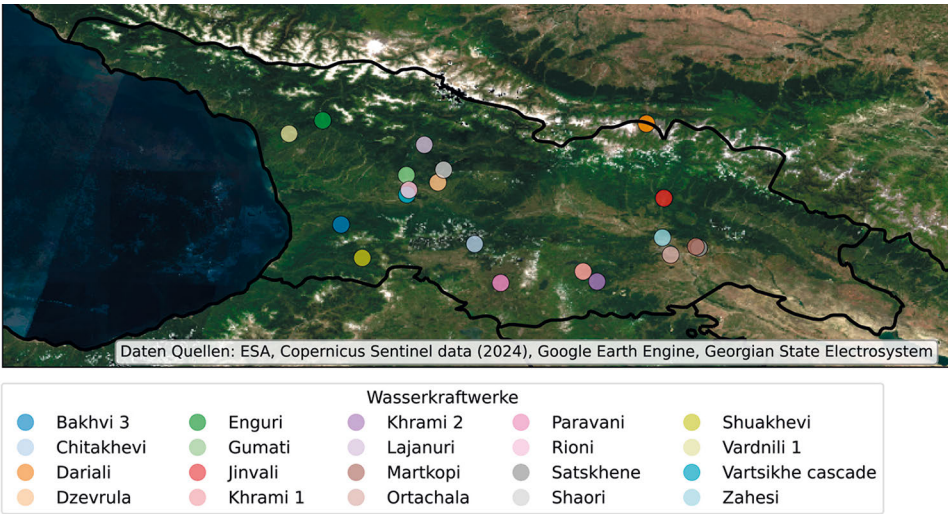
Windkraft. Die gemittelte Wind-Leistungsdichte (Abb. 8) zeigt eine starke räumliche Variabilität des Windpotenzials. Große Teile Georgiens verfügen demnach nur über ein geringes Windpotenzial. Jedoch wird ein in West-Ost Richtung verlaufender Korridor zwischen den Gebirgsketten im Norden und im Süden als windstarker Bereich deutlich. Zusätzlich gibt es eine windreiche Region, die von der Mitte des Landes Richtung Süden verläuft. Insgesamt ist das landesweite Potenzial aber als vergleichsweise gering einzustufen; auf nur ca. 7 % der Landesfläche liegt das Windpotenzial über 600 W/m^2 und nur auf ca. 3 % der Fläche über 800 W/m^2 . Jedoch gibt es einzelne Standorte mit beachtlichen Windressourcen, wie z.B. Betriebsdaten des 2017 in Betrieb genommenen Gori-Windparks verdeutlichen, der etwa 4 000 Volllaststunden pro Jahr erreicht.

Abbildung 8: Gemittelte Wind-Leistungsdichte (Durchschnitt der Jahre 2008 bis 2017)



Wasserkraft. Die gebirgige Topografie Georgiens begünstigt die großskalige Nutzung der Wasserkraft zur Stromerzeugung. Dies spiegelt sich in der hohen Anzahl installierter Wasserkraftwerke wider, die im Jahr 2021 etwa 81 % der inländischen Stromerzeugung ausmachten. Abb. 9 zeigt exemplarisch die Lage des Großteils (85 % der installierten Leistung) der vorhandenen Wasserkraftwerke innerhalb Georgiens, die elektrische Leistungen von wenigen MW bis zu 1 300 MW aufweisen. Die restlichen 15 % des existierenden Anlagenparks an Wasserkraftwerken verteilen sich auf eine Vielzahl an Kleinanlagen mit geringerer Leistung. Mit einer installierten Leistung von 1,3 GW ist das Enguri-Kraftwerk im Nordwesten Georgiens mit Abstand die größte Anlage des Landes. Weitere größere Anlagen sind das Vardni 1 bzw. das Vartsikhe Kraftwerk mit 220 bzw. 184 MW. Bei den meisten dieser teils relativ alten Anlagen handelt es sich um Speicherkraftwerke mit Stauseen, die eine flexible, teilweise nachfrageorientierte Stromproduktion ermöglichen und damit die fluktuierende Erzeugung aus Windkraft und Photovoltaik partiell ausgleichen könnten. Allerdings ist die Stromerzeugung aus Wasserkraft in Georgien im Jahresverlauf nicht konstant, da sie insbesondere von der Schneeschmelze und Regen in den Bergen abhängt und daher im Winterhalbjahr (kaum Schneeschmelze, Niederschlag überwiegend in Form von Schnee) gering ist. In welchem Umfang ein weiterer Ausbau der Wasserkraftnutzung in Georgien (Ziel: 7,2 GW bis 2033) unter technoökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten tatsächlich realisiert werden kann ist unklar. Auf eine genaue Untersuchung der noch gegebenen Verfügbarkeit kann hier nicht weiter eingegangen werden.

Abbildung 9: Existierende Wasserkraftwerke mit Leistung im MW-Bereich

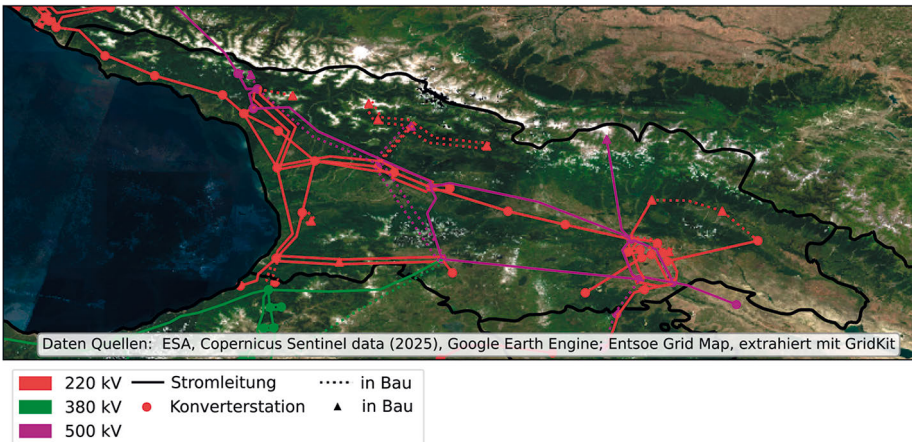


Die diskutierten Zusammenhänge geben einen grundlegenden Überblick über das Angebot einer potenziellen zusätzlichen Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Georgien. Mit Hilfe der vorgestellten Daten können damit potenzielle Gunstregionen für die »grüne« Wasserstoffherzeugung ermittelt werden. Für eine weiterführende, spezifische und belastbare Standortauswahl ist jedoch eine differenzierte und idealerweise vor Ort realisierte Detailanalyse unerlässlich.

4.1.3 Nähe zu vorhandener Infrastruktur

Ein weiterer wesentlicher Standortfaktor ist die vorhandene Infrastruktur; exemplarisch wird hierfür die Strominfrastruktur betrachtet.

Abbildung 10: Georgische Stromleitungsinfrastruktur auf der Hochspannungs- und der Höchstspannungsebene



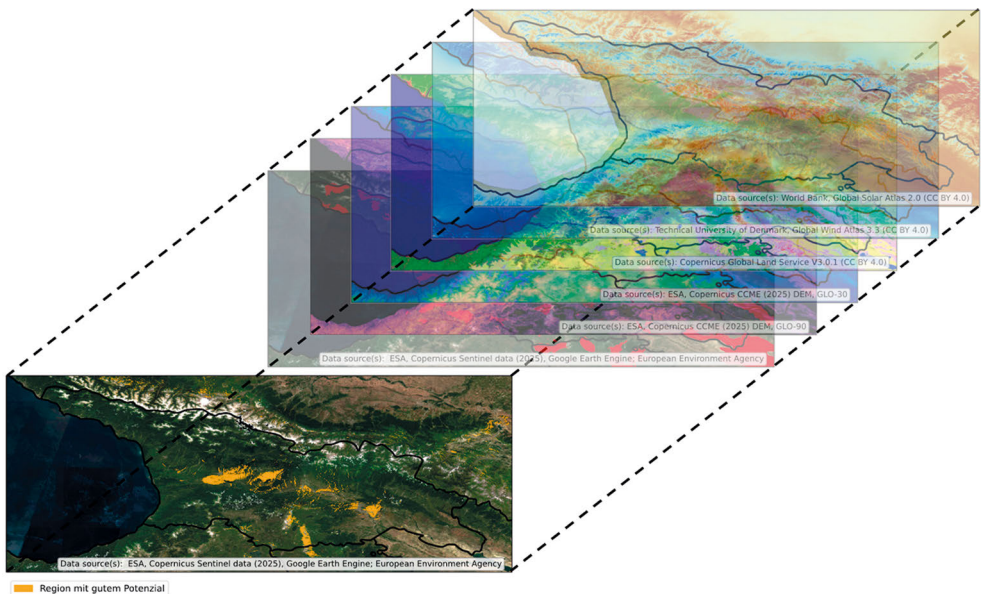
Große Teile Georgiens sind über Hochspannungsleitungen vernetzt (Abb. 10). Im Westen verbinden elektrische Leitungen die Küstenregion des Landes mit dem Norden und mit Russland. Vorhandene Verbindungen bestehen auch in den Süden sowie über die Grenze zur Türkei. Die Hauptstromachse verläuft entlang des zentralen Tals zwischen dem Großen und dem Kleinen Kaukasus in West-Ost-Richtung und verbindet die Schwarzmeerküste mit dem Großraum der Hauptstadt Tiflis im Osten.

Damit ergibt sich insgesamt eine hohe vorhandene Netzabdeckung des Landes. Jedoch gibt es auch Gebiete mit größeren Entfernungen zur vorhandenen Strominfrastruktur; dies verringert deren Attraktivität für die Einbindung von wasserstoffproduzierenden Anlagen.

4.1.4 Ermittlung von Gunstregionen

Durch die systematische Überlagerung der bisher diskutierten Kriterien können potenziell geeignete Flächen identifiziert werden (Abb. 11). Hierzu werden in einem ersten Schritt Siedlungsflächen, permanente Wasserflächen, Feuchtbiotope und Flächen mit Schnee und Eis sowie Naturschutzgebiete ausgeschlossen. Des Weiteren wird hier davon ausgegangen, dass Hanglagen mit einer Neigung von mehr als 15 % und Flächen über 3 000 m Höhe nicht unmittelbar nutzbar sind. Für die Photovoltaik wird ein Mindestpotenzial von $> 1\,200$ kWh/kW und für Windenergie eine Windenergieleistungsdichte von mindestens > 600 W/m² zugrunde gelegt. Werden all diese Kriterien angewandt und übereinandergelegt, können Gunstregionen identifiziert werden, in denen alle Einzelkriterien jeweils als positiv zu bewerten sind. Die ermittelte Fläche kann dann mit den Standorten der Wasserkraftwerke und dem Stromnetz abgeglichen werden.

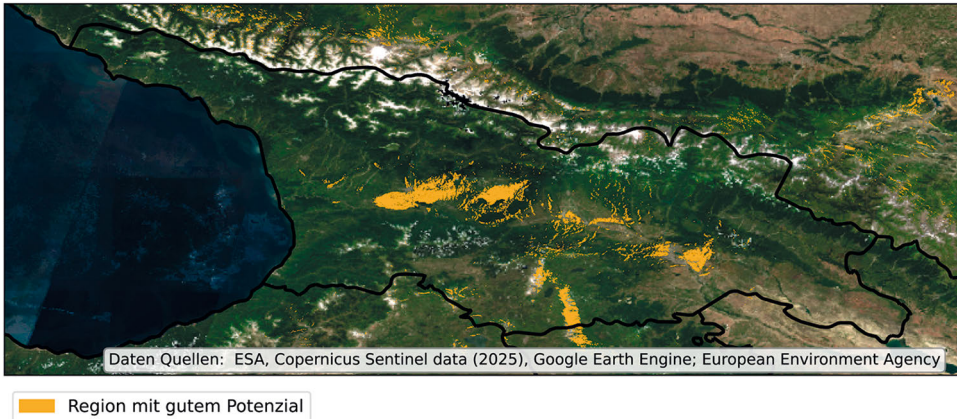
Abbildung 11: Übereinanderlegen der verschiedenen Kriterien



Die für Georgien auf den Filterkriterien beruhende, resultierende Fläche (Gunstgebiete) ist ca. 2 400 km² groß; dies entspricht etwa 3,5 % der Landesfläche. Dieses Ergebnis zeigt drei Haupt-Gunstregionen für die potenzielle Installation von Photovoltaik und Windkraft für die Produktion von »grünem« Wasserstoff: das Kolchis-Tiefland um die Stadt Kutaisi, südliche Gebiete an der Grenze zur Türkei sowie die Umgebung der Hauptstadt Tiflis (Abb. 12). Die Auswahl wird maßgeblich durch das Windpotenzial bestimmt, während die anderen Faktoren die Fläche nur geringfügig weiter einschränken.

Zur weiteren Verfeinerung im Zuge einer potenziell anschließenden konkreten Standortwahl empfiehlt sich eine Analyse mit einer höheren zeitlichen und räumlichen Auflösung sowie die Berücksichtigung lokaler sozio-ökonomischer und ökologischer Gegebenheiten.

Abbildung 12: Resultierende Gunstregionen mit gutem Potenzial für die »grüne« Wasserstoffproduktion



4.2 Potenzialabschätzung

Um ausgehend von dieser Identifikation von Gunstregionen eine Vorstellung der damit realisierbaren Wasserstoffproduktionspotenziale in Georgien zu bekommen, wird nun abgeschätzt, welche Wasserstoffmengen potenziell erzeugbar wären. Dazu wird unterstellt, dass die zur Verfügung stehende Fläche der Gunstregionen (2 400 km²) etwa zu drei Vierteln für Anlagen zur Windenergienutzung und zu einem Viertel für Photovoltaikanlagen zur Nutzung der Solarstrahlung verwendet werden (Tab. 2), da die mögliche installierbare Leistung pro Fläche für die Photovoltaik deutlich höher ist als die für Windkraft. Dabei ergänzen sich die Stromerzeugungsprofile der beiden Erzeugungsformen über den Tag und das Jahr gut. Auch ist die Stromerzeugung aus Photovoltaik i. Allg. etwas kostengünstiger, jedoch aus zeitlicher Sicht etwas weniger verfügbar im Vergleich zum Strom aus Windkraft (bei gutem Potenzial). Eine ausschließliche Photovoltaik-Nutzung würde ein ungünstiges Stromangebot im Tagesverlauf mit einer starken Mittagsspitze und keiner Erzeugung in der Nacht bedeuten; eine schlechte Auslastung der Elektrolyse oder die Notwendigkeit einer großskaligen und bisher noch sehr teuren Stromspeicherung wäre die Folge. Auch Wasserkraftwerke könnten nur bedingt die Tag-/Nachtschwankungen in der hier gegebenen Größenordnung ausgleichen.

Tabelle 2: Annahmen für die Abschätzung des Wasserstoffproduktionspotenzials

	Windkraft-Stromerzeugung	Photovoltaische Stromerzeugung
Anteil an Fläche	75 %	25 %
Nutzbarkeit der Fläche	100 %	50 %
Installierbare Leistung	3,9 MW/km ²	32,4 MW/km ²
Volllaststunden	2 200 h/a	1 300 h/a

Für die Windenergienutzung wird angenommen, dass pro Quadratkilometer 3,9 MW elektrische Windturbinenleistung installiert werden kann und die errichteten Windkraftanlagen durchschnittlich 2 200 Volllaststunden im Jahr aufweisen. Damit ergibt sich auf der verfügbaren Fläche von 1 800 km² (entspricht 75 % der Fläche der Gunstregionen) eine potenziell installierbare Leistung von 5 400 MW. Daraus resultiert eine potenzielle elektrische Energieerzeugung von etwa 11,8 TWh/a.

Für die Photovoltaik-Nutzung muss die zugewiesene Fläche (600 km², entspricht 25 % der Fläche der Gunstregionen) wegen weiterer Ausschlüsse, wie etwa kleineren Waldflächen, um ca. 50 % reduziert werden. Die nutzbare Fläche beträgt somit ca. 300 km². Es werden eine maximal installierbare Leistung von 32,4 MW/km² und durchschnittlich 1 300 Volllaststunden pro Jahr unterstellt. Dies resultiert in einem Potenzial von ca. 9 700 MW an installierbarer Leistung und eine potenzielle elektrische Energieerzeugung von rund 12,6 TWh/a.

Insgesamt ergibt sich für die untersuchten Gunstflächen aus der kombinierten Nutzung von Wind- und Solarenergie eine potenzielle Stromerzeugung von ungefähr 24,4 TWh/a. Aufgrund der guten Verfügbarkeit und der hohen Stromproduktion aus Wasserkraft in Georgien (im Mittel in den Jahren 2020 bis 2022 ca. 9,9 TWh/a) sowie des geplanten weiteren Ausbaus wird hier zusätzlich angenommen, dass 30 % (ca. 3 TWh/a) der aktuellen Stromerzeugung aus Wasserkraft für die Wasserstoffproduktion verwendet werden kann. Unter diesen Rahmenbedingungen stünde somit ein Stromaufkommen von insgesamt rund 27,4 TWh pro Jahr für eine potenzielle »grüne« Wasserstoffproduktion zur Verfügung.

Angenommen die Elektrolyse ist an einem Exportstandort am Schwarzen Meer positioniert, wo das für die Wasserstoffproduktion benötigte Wasser direkt aus entsprechenden Meerwasserentsalzungsanlagen gewonnen werden kann, so muss der Strom über die existierende Stromnetzinfrastuktur zur Küste befördert werden. Unter Berücksichtigung eines Transportverlustes von 10 % in den Leitungen und für die Meerwasserentsalzung sowie einem Elektrolysewirkungsgrad von ca. 60 % (Systemeffizienz bezogen auf den Heizwert des Wasserstoffs) lässt sich daraus eine Wasserstoffproduktion von ungefähr 14,8 TWh/a bzw. 446 000 t/a ableiten.

Diese Wasserstoffmenge könnte für ein vergleichsweise kleines Land wie Georgien ein lukratives Einkommen darstellen und gleichzeitig bei einem Export, beispielsweise nach Deutschland, helfen, die hiesige Wirtschaft zu defossilieren (Wasserstoffnachfrage in Deutschland im Jahr 2023: ca. 55 TWh).

5. Zusammenfassung

Zur kosteneffizienten, großskaligen Produktion von »grünem« Wasserstoff ist die systematische Identifikation von Gunstregionen essenziell. Der vorgestellte Ansatz kombiniert geographische, klimatische und infrastrukturelle Daten, um potenzielle Flächen zunächst großflächig auf ihre Eignung zu prüfen und anschließend für vertiefte Analysen auszuwählen. Dabei werden entscheidende Faktoren wie u. a. die Flächennutzbarkeit und -verfügbarkeit, das Potenzial für die Nutzung erneuerbarer Energien (Windenergie, Solarstrahlung, Wasserkraft) sowie die bestehende Energieinfrastruktur berücksichtigt. Die vorgestellte Methodik nutzt für die Quantifizierung des erneuerbaren Energiepotenzials meteorologische Langzeitdaten mit einer hohen räumlichen Auflösung, verzichtet jedoch für die erste überschlägige Potenzialabschätzung auf eine detaillierte zeitliche Datenauflösung. Insgesamt bietet die Methodik eine robuste Grundlage für die erste Auswahl möglicher Gunstregionen für die Wasserstoffproduktion; eine konkrete Projektentwicklung würde demgegenüber jedoch ergänzende Analysen mit höherer zeitlicher Auflösung, der Berücksichtigung lokaler ökonomischer Rahmenbedingungen und weiterer Umwelt- und Sozialaspekte für die finale Standortentscheidung erfordern.

Weiterhin wird eine Methodik zur groben Abschätzung des maximalen Wasserstoffproduktionspotenzials für eine definierte Fläche vorgestellt. Bei geeigneter Auswahl der entsprechenden Parameter kann damit das großflächige Produktionspotenzial für eine Region größenordnungsmäßig abgeschätzt werden.

Die Fallstudie Georgien verdeutlicht, dass das Land aufgrund seiner vielfältigen erneuerbaren Energieressourcen gute Voraussetzungen für die Erzeugung von »grünem« Wasserstoff aufweist. Das energiewirtschaftlich signifikante Wasserkraftpotenzial stellt eine stabile Basis dar, um Schwankungen in Wind- und Solarstromerzeugung zu kompensieren. Das solare Potenzial liegt im Vergleich zu Mitteleuropa auf einem höheren Niveau, wohingegen das Windpotenzial im Land überwiegend moderat bis gering ausfällt und nur in einigen exponierten Lagen attraktiv ist. Neben den natürlichen Bedingungen weist Georgien eine vergleichsweise gut ausgebaute Energieinfrastruktur mit Hochspannungsnetzen und Wasserkraftwerken auf, die die Integration der Elektrolyseanlagen unterstützen. Einschränkungen ergeben sich aus topographischen Herausforderungen (steile Hanglagen, große Höhen) sowie umfangreichen Naturschutzgebieten, welche die verfügbaren Flächen für Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien einschränken. Insgesamt wurden drei Gunstregionen für die Wasserstoffproduktion identifiziert: das Kolchis-Tiefland, eine Region an der türkischen Grenze sowie die Umgebung der Hauptstadt Tiflis. Eine kombinierte Nutzung von Photovoltaik, Windenergie und Wasserkraft erscheint am vielversprechendsten, um eine zuverlässige Wasserstoffproduktion mit hohen Elektrolyse-Volllaststunden und günstiger Elektrizität zu gewährleisten. Überschlägige Berechnungen ergeben für die identifizierte Gunstfläche ein theoretisches Produktionsvolumen von ca. 446 000 t/a Wasserstoff; dieses Potenzial eröffnet Chancen, Wasserstoff sowohl für den lokalen Bedarf innerhalb Georgiens als auch für den Export bereitzustellen.

Verwendete Literatur

- [1] H. Hersbach et al., »ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present.« Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), 2023. doi: 10.24381/CDS.ADBB2D47.
- [2] European Environment Agency, »CORINE Land Cover 2018 (raster 100 m), Europe, 6-yearly – version 2020_20u1, May 2020.« European Environment Agency, 2019. doi: 10.2909/960998C1-1870-4E82-8051-6485205EBBAC.
- [3] European Environment Agency and European Commission, »Natura 2000 (vector) – version 2022.« European Commission, 2024. doi: 10.2909/95E717D4-81DC-415D-A8Fo-FECD7E686Bo.
- [4] UN, »Paris agreement – Report of the Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change,« United Nations, 2015.
- [5] IPCC, »Climate Change 2023: Synthesis Report – A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)],« Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Geneva, Switzerland, 2023. [Online]. Available: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>
- [6] IEA, »Net Zero by 2050 – A Roadmap for the Global Energy Sector,« International Energy Agency (IEA), 2021.
- [7] U. Pfeifroth, J. Drücke, S. Kothe, J. Trentmann, M. Schröder, and R. Hollmann, »SARAH-3 – satellite-based climate data records of surface solar radiation,« *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 16, no. 11, pp. 5243-5265, Nov. 2024, doi: 10.5194/essd-16-5243-2024.
- [8] N. N. Davis et al., »The Global Wind Atlas: A High-Resolution Dataset of Climatologies and Associated Web-Based Application,« *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 104, no. 8, pp. E1507–E1525, Aug. 2023, doi: 10.1175/BAMS-D-21-0075.1.
- [9] Gori Municipality, »gori.gov.ge,« Gori Municipality City Hall. Accessed: Jun. 12, 2025. [Online]. Available: <https://gori.gov.ge/index.php?m=411&lng=eng>
- [10] S. Höltinger, B. Salak, T. Schauppenlehner, P. Scherhauer, and J. Schmidt, »Austria's wind energy potential – A participatory modeling approach to assess socio-political and market acceptance,« *Energy Policy*, vol. 98, pp. 49-61, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.enpol.2016.08.010.
- [11] Ridgeline Industrial, »The Expansion of the Qartli Wind Farm by 50 MW – Converting Renewable Electricity to Hydrogen, its uses and Transportation,« The Romanian Agency for International Development Cooperation (RoAid).
- [12] B. Wiegmans, »Gridkit Extract Of Entso-E Interactive Map.« Zenodo, Jun. 17, 2016. doi: 10.5281/ZENODO.55853.
- [13] European Space Agency, »Copernicus GLO-90 Digital Surface Model,« 2024, *OpenTopography*. doi: 10.5069/G9028PQB.
- [14] European Space Agency and Airbus, »Copernicus DEM.« 2022. doi: 10.5270/ESA-c5d3d65.
- [15] M. Buchhorn et al., »Copernicus Global Land Service: Land Cover 100m: collection 3: epoch 2019: Globe.« Zenodo, Sep. 08, 2020. doi: 10.5281/ZENODO.3939050.

- [16] European Environment Agency, »Emerald Network data (vector) – the Pan-European network of protected sites version 2024.« European Environment Agency, 2025. doi: 10.2909/135A0BB6-C611-4C2C-823D-A564BE119AD8.
- [17] N. Gorelick, M. Hancher, M. Dixon, S. Ilyushchenko, D. Thau, and R. Moore, »Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone,« *Remote Sensing of Environment*, vol. 202, pp. 18-27, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.rse.2017.06.031.
- [18] A. Buttler and H. Spliethoff, »Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review,« *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 2440-2454, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.09.003.
- [19] IEA, »Energy system transformation – Georgia energy profile – Analysis,« IEA. Accessed: Jun. 17, 2025. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/georgia-energy-profile/energy-system-transformation>
- [20] GSE, »Ten-Year Network Development Plan of Georgia 2023-2033,« Georgian State Electrosystem, 2023.
- [21] Y. Scholz, »Renewable energy based electricity supply at low costs – Development of the REMix model and application for Europe,« 2012.
- [22] »Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie,« Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), 2023.
- [23] O. Turkovska et al., »Methodological and reporting inconsistencies in land-use requirements misguide future renewable energy planning,« *One Earth*, vol. 7, no. 10, pp. 1741-1759, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.oneear.2024.09.010.
- [24] IRENA, »Investment opportunities for utility-scale solar and wind areas: Georgia,« International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi, 2025.