

Bewertung von Wasserkraftwerksstandorten für die Anwendung schwimmender Photovoltaikanlagen

Deniz AKSEL¹

Fachhochschule Kufstein Tirol Bildungs GmbH, Andreas Hofer-Straße 7, A-6330 Kufstein,
+43 5372 71819 106, Deniz.Aksel@fh-kufstein.ac.at, www.fh-kufstein.ac.at

Kurzfassung:

Die vorliegende wissenschaftliche Untersuchung befasst sich mit dem Thema schwimmende Photovoltaikanlagen als alternative und innovative Installationsform zu den vielfach bestehenden und bereits etablierten Freiflächen- und Dachanlagen dieser Stromerzeugungstechnologie. Bei Betrachtung der österreichischen Klima- und Energiestrategie #mission2030 wird ersichtlich, dass im Bereich der Photovoltaik ein großer Ausbau in den nächsten Jahren bis 2030 erforderlich ist. Die schwimmende Photovoltaik bietet sich als eine Option zum Ausbau dieser Technologie an, da sich zum einen im gesamten Land genügend Gewässer finden und zum anderen die Flächen auf Gebäudedächern und Freiflächen für Photovoltaik begrenzt sind.

Der Großteil der bisher installierten schwimmenden PV-Anlagen wurde auf stillen Gewässern in Asien errichtet. Dies führt zur Forschungslücke, dass auf Gewässern mit hohen Wasserspiegelschwankungen, großen Tiefen und hohen Fließgeschwindigkeiten großteils die Erfahrungen zur Installation von PV-Anlagen fehlen, da es auf solchen Gewässern bisher kaum Umsetzungen gibt [1]. In der vorliegenden wissenschaftlichen Arbeit wird untersucht, welche technischen, rechtlichen und wirtschaftlichen Herausforderungen sich bei der Implementierung schwimmender Photovoltaik auf ausgewählten Speicherseen und Fließgewässern ergeben.

Neben einer systematischen Literaturrecherche in Anlehnung an Sandberg [2] werden als Methodik Interviews mit Fachkräften in Anlehnung an Reinders et al. [3] durchgeführt. Eine verallgemeinerbare wirtschaftliche Analyse und eine systematische Standortbewertung erfolgen an beispielhaft ausgewählten Gewässern eines Energieversorgungsunternehmens.

Weltweit sind bereits über 300 schwimmende PV-Anlagen installiert [4] und Ende 2018 lag die weltweit installierte Leistung bei rund 1,3 Gigawatt peak [1]. In der Literatur wird speziell der alpine Raum mit großem Potential für die Anwendung von schwimmender Photovoltaik dargestellt [5]. Dabei weisen vor allem Speicherseen von Pumpspeicherkraftwerken in hohen Berglagen viele Synergien und Vorteile von alpiner Photovoltaik auf. Ein Ergebnis der Arbeit ist die Darstellung der in Österreich relevanten rechtlichen Aspekte bei der Anwendung dieser Stromerzeugungstechnologie. Hier ist besonders zu beachten, dass Fischereirecht, Schifffahrtsrecht, Naturschutzrecht und gewässerökologische Aspekte einen wesentlichen Einfluss in der Genehmigung der schwimmenden Photovoltaik haben. Vorteile und Nachteile sind zum einen der kühlende Effekt des Wassers auf die Photovoltaik und der damit höhere

¹ Jungautor

Ertrag der PV-Anlage und zum anderen die hohen Kosten für Unterkonstruktion und Verankerung und der Eingriff in die Gewässerökologie. Synergien dieser Anwendung und die Wechselwirkungen zwischen Photovoltaik und Gewässer sind die doppelte Nutzung einer bereits verbrauchten Fläche zur Stromerzeugung und die Reduktion der Verdunstung aufgrund der Verschattung. Im Rahmen einer empirischen Fallstudie wird ein Konzept für eine erste österreichische PV-Pilotanlage für ein Energieversorgungsunternehmen entwickelt. Die Auswahl des näher betrachteten Standorts erfolgt dabei prototypisch und exemplarisch für andere Standorte. Daraus lassen sich folgende verallgemeinerbare Erkenntnisse ableiten: Die baulichen Aspekte und die örtlichen Gegebenheiten des Gewässers haben entscheidenden Einfluss auf die Anwendung der Technologie. Im Allgemeinen muss jede Umsetzung von schwimmender Photovoltaik standortspezifisch betrachtet werden, um eine Errichtung mit möglichst geringen Hürden und Herausforderungen zu erzielen.

Die Technologie der schwimmenden Photovoltaik stellt ein aktuelles Thema dar, bei dem weiterer Forschungsbedarf besteht, um die Etablierung dieser Installationsart von Photovoltaik in Österreich voranzutreiben. Die Arbeit zeigt deutlich, dass ein hohes Potential in Österreich besteht, um den bundesweiten Ausbau der Photovoltaik um 11 Terrawattstunden bis 2030 zu erreichen [6]. Die spezifischen Investitionskosten von 750 bis 1.300 Euro pro Kilowatt peak für schwimmende PV-Anlagen zeigen eine wirtschaftliche und technisch machbare Alternative zu den bereits etablierten Anwendungen von Photovoltaik auf Dach- und Freiflächen [1]. Speziell in Österreich kann die schwimmende Photovoltaik eine effiziente Option darstellen, um das Ziel des Solarstroms in den nächsten Jahren im Rahmen der #mission2030 ohne zusätzlichen Flächenverbrauch zu erreichen.

Keywords: RES Potential, Solarenergie, Photovoltaik, Floating PV, Schwimmende Photovoltaik, Wasserkraftwerk, Standortbewertung, #mission2030, Innovation, Integration, Doppelnutzung

1 Ausgangssituation

Die österreichischen Bundesministerien für Nachhaltigkeit und Tourismus sowie Verkehr, Innovation und Technologie bekannten sich im Jahr 2018 mit dem Strategiepapier Klima- und Energiestrategie Mission 2030 zu den internationalen und europäischen Klimazielen. Das Ziel ist, die vorgegebenen Klimaziele bis zum Jahr 2030 auf nationaler Ebene umzusetzen. Die Mission verdeutlicht, mit welchen Schwerpunkten die österreichische Bevölkerung den Weg zu den Klimazielen bestreiten kann, um damit die Treibhausgasemissionen zu reduzieren und den Anteil erneuerbarer Energieträger auszubauen. Die Betrachtung des Stromsektors zeigt, dass der Strom in Österreich im Jahr 2018 bereits zu 72% aus erneuerbaren Quellen stammte. Bis 2030 ist vorgesehen, diesen Anteil signifikant zu steigern, um 100% des nationalen Gesamtstromverbrauchs bilanziell aus erneuerbaren Energieträgern zu decken. Aktuell beträgt der jährliche Stromverbrauch in Österreich circa 70 Terrawattstunden [6].

Abbildung 1 zeigt detailliert, welcher Ausbau in den Bereichen Wasserkraft, Wind und Photovoltaik notwendig ist, um 100% des nationalen Stromverbrauchs bis 2030 bilanziell aus erneuerbaren Energien zu decken. Wird die Photovoltaik fokussiert, so muss deren Anteil

dabei um den Faktor 11 steigen, um in Summe einen Ausbau von 30 Terrawattstunden in den drei Bereichen Wasserkraft, Wind und PV zu erreichen. Dabei spielt der Einsatz von schwimmender PV eine beachtliche Rolle und stellt neben Freiflächenanlagen und Dachanlagen eine wichtige dritte Säule dar. Zusammenfassend wird erwähnt, dass ein massiver Ausbau nötig ist, um den Anteil von 72% auf 100% zu erhöhen. Folgende Abbildung 1 zeigt detailliert den notwendigen Ausbau in den Sektoren Photovoltaik, Windkraft und Wasserkraft.

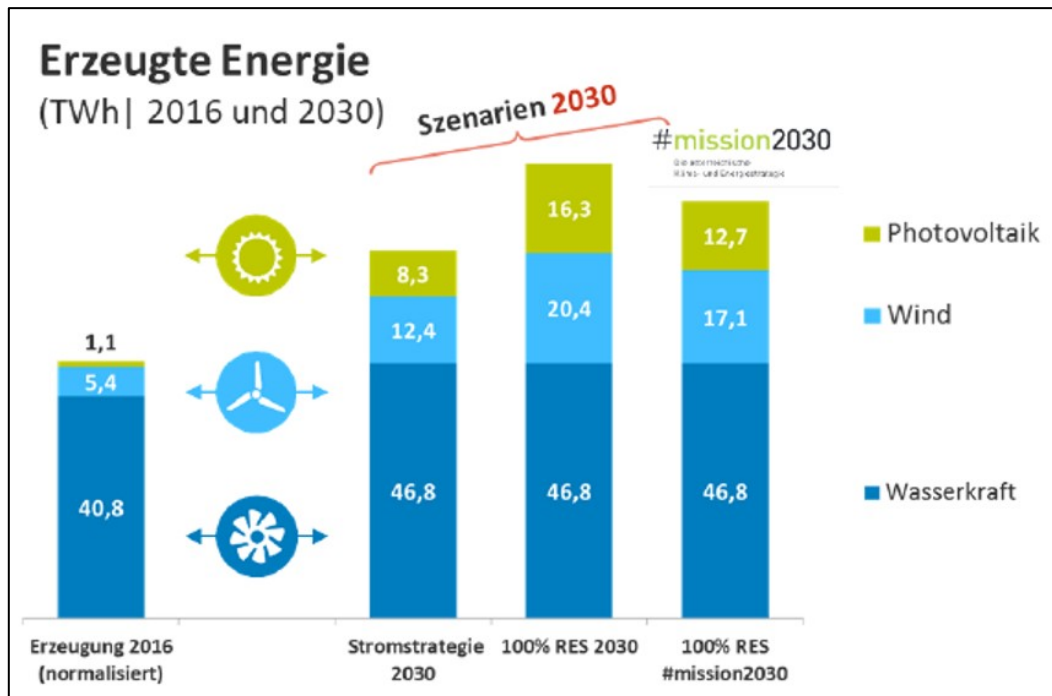


Abbildung 1: Anteile erneuerbarer Energien für die Stromerzeugung in Österreich in Hinblick auf die #mission2030

(Quelle: [7] Österreichische Energieagentur, 2018)

Abschließend wird festgehalten, dass neben Dachanlagen und Freiflächenanlagen für PV auch die alternative Installationsoberfläche Wasser in Tirol reichlich zur Verfügung steht. Zusammen mit dem Ausbau der Wasserkraft könnten schwimmende PV-Anlagen zukünftig einen wichtigen Beitrag für die Stromerzeugung beisteuern und an ausgewählten Standorten ideal die bestehende Wasserkraftnutzung ergänzen, wo bereits die nötige Infrastruktur vor Ort gegeben ist.

1.1 Problemstellung

Der Großteil der bisher installierten schwimmenden PV-Anlagen, die englische Bezeichnung lautet floating photovoltaics (Floating PV), wurde auf stillen Gewässern im asiatischen Raum errichtet. Daher ergibt sich bei genauerer Betrachtung die Fragestellung, mit welchen Herausforderungen die schwimmende Photovoltaik in weiterer Folge – mit Fokus auf Österreich – auf Speicherseen der großen Pumpspeicherkraftwerke und Fließgewässern konfrontiert sein wird. Die Rahmenbedingungen auf solchen Gewässern sind im Vergleich zu Anwendungen auf ruhenden Gewässern, in denen das Wasser kaum Bewegungen aufweist, stark abweichend. Es fehlen hier die langzeitigen Erfahrungen in der Anwendung der schwimmenden Photovoltaik mit den Wasserspiegelschwankungen auf Speicherseen und den

hohen Fließgeschwindigkeiten bei Flüssen. Weitere ausgewählte Aspekte, die betrachtet werden müssen, sind die Unterkonstruktion und Verankerung in den Gewässern mit unterschiedlichen Rahmenbedingungen, das Treibgut im Wasser bei verschiedenen Wetterbedingungen, der gesetzliche Rahmen zum Thema schwimmende PV in Österreich oder auch der Eingriff in das Ökosystem des Gewässers.

Die oben angeführten Problemstellungen, die sich im Hinblick auf schwimmende Photovoltaik speziell auf Speicherseen und Fließgewässern ergeben, werden in der wissenschaftlichen Untersuchung kritisch beleuchtet, um zu der im nachfolgenden Kapitel formulierten Zielsetzung zu gelangen und die Forschungsfrage beantworten zu können.

1.2 Forschungsfrage & Methodik

Die Arbeit soll einen möglichst breiten Überblick über die Technologie und die verschiedenen Installationsmöglichkeiten von schwimmenden Photovoltaikanlagen aus globaler Sicht geben. Dabei werden anhand von ausgewählten Kraftwerksstandorten in Österreich die Herausforderungen, Probleme und Umwelteinflüsse bei der Implementierung von schwimmender Photovoltaik analysiert und kritisch bewertet. Im Zuge dessen wird auf die technischen, rechtlichen und wirtschaftlichen Aspekte bei dieser Technologie sowie auf deren Vor- und Nachteile eingegangen. Die Arbeit liefert wissenschaftliche Aspekte, um die für einen Kraftwerksbau notwendige Machbarkeitsstudie an beliebigen Wasserkraftwerksstandorten zu unterstützen. Die Ergebnisse liefern Anhaltspunkte, um allgemeine Schwierigkeiten einzuschätzen.

Die Forschungsfrage lautet konkret: *Welche technischen, rechtlichen und wirtschaftlichen Herausforderungen ergeben sich bei der Implementierung schwimmender Photovoltaik auf ausgewählten Speicherseen und Fließgewässern?*

Im Zuge einer systematischen Literaturrecherche werden weltweite Anlagen untersucht und nach deren Gewässertyp klassiert. Primär- und Sekundärforschung haben den Vorteil, Wissen und relevante Literatur über das Thema zusammenzuführen und einen ersten Einblick in die Thematik zu erhalten. Zudem können auf diese Art und Weise der aktuelle Wissens- und Forschungsstand der schwimmenden Photovoltaik untersucht und bestehende Lücken aufgezeigt werden, um daraus die Forschungsfrage ableiten und in weiterer Folge diese beantworten zu können. Die Ergebnisse zeigen, dass es bisher noch kaum Anwendungen der schwimmenden Photovoltaik auf Speicherseen und Fließgewässern, wie sie in Österreich anzutreffen sind, gibt. Eine darauffolgende Expertendiskussion mit Mitarbeitern eines Energieversorgungsunternehmens und Vor-Ort-Besichtigungen an Wasserkraftwerksstandorten dienen dazu, Herausforderungen für die Technologie zu ermitteln und folglich eine systematische Standortbewertung anhand von ausgewählten Gewässern durchzuführen.

1.3 Stand der Forschung & Umsetzung

Die systematische Literatursuche ergab, dass es im Bereich der schwimmenden Photovoltaik aus globaler Sicht bereits einige Umsetzungen gibt. Die Quellen der World Bank Group et al. zeigen im Detail, in welchen Ländern diese Technologie bereits installiert wurde und um welche Art von Gewässer es sich dabei handelt. Ein Großteil der bisher installierten Anlagen dient zu Forschungszwecken und sind als Pilotanlagen in Betrieb. Deren bisherige Installation

befindet sich nahezu immer auf stillen Gewässern, bei denen die Wassertiefe gering ist und kaum Wasserspiegelschwankungen oder hohe Fließgeschwindigkeiten vorliegen. Es werden lediglich zwei schwimmende PV-Anlagen auf Speicherseen angeführt, nämlich eine in der Schweiz und eine weitere in Portugal, bei denen aber nur begrenzte Informationen zu technischen Details verfügbar sind. Bei Speicherseen ist das Wasserverhalten aufgrund der größeren Wassertiefe und den Wasserspiegelschwankungen anders als bei stillen Gewässern. Zudem zeigen die Studien der World Bank Group et al., dass ein Großteil von Floating PV bisher im asiatischen Raum angewendet wird. Eine Installierung auf Fließgewässern wurde in den Berichten bisher nicht angeführt [1] [4].

Diese Erkenntnisse zeigen, dass in der Anwendung schwimmender PV noch eine Forschungslücke besteht, speziell in Bezug auf die Installation auf Gewässern mit Wasserspiegelschwankungen und hohen Fließgeschwindigkeiten. Beispiele dazu sind Speicherseen oder Flüsse, wo noch Langzeitstudien und Erfahrungswerte fehlen. Bisher gibt es wenige Umsetzungen auf solchen Gewässern und folglich auch kaum Studien zu diesem Thema. Eine gezielte Literaturrecherche nach Studien, die solche Anwendungen thematisieren, blieb bisher erfolglos. Zudem herrschen in höheren Lagen andere Wetterbedingungen als in Tallagen, die bisher kaum erforscht wurden. In dem Nischenthema schwimmende Photovoltaik besteht noch großer Forschungsbedarf.

2 Einblick in ausgewählte Ergebnisse

Seit vielen Jahren leistet die Photovoltaik weltweit einen wichtigen Beitrag zur Stromerzeugung aus der reichlich verfügbaren Energiequelle Sonne und bildet eine wichtige Säule bei der erneuerbaren Stromerzeugung. Folgende Abbildung 2 zeigt den jährlichen Zubau von Photovoltaik in Österreich zwischen 2010 und 2018 grafisch. Die Zahlen verdeutlichen den starken Zuwachs der PV in den letzten knapp zehn Jahren. Während die kumulierte Leistung im Jahr 2010 bei knapp 100 Megawatt peak (MWp) gesamt installierter PV-Leistung lag, stieg sie bis 2018 auf gerundet 1,4 Gigawatt peak (GWp). Dabei ist die häufigste Anwendungsform der Stromerzeugungstechnologie auf Freiflächen und Gebäudedächern.

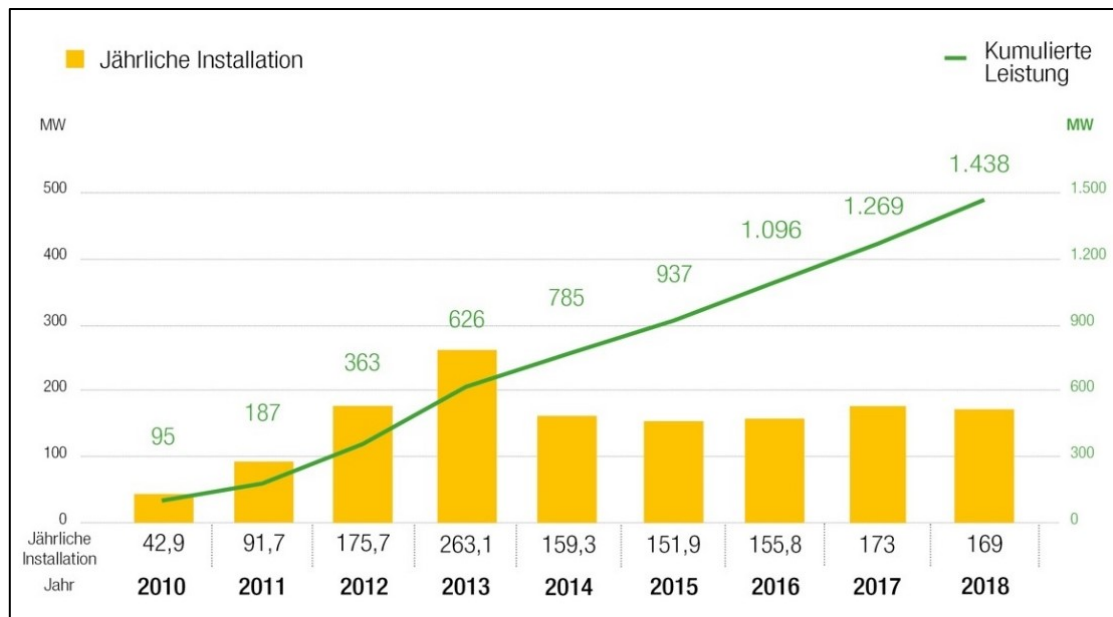


Abbildung 2: PV-Zubau in Österreich zwischen 2010 und 2018
(Quelle: [8] Bundesverband Photovoltaic Austria, 2020)

Photovoltaikmodule werden zu einem Großteil in bewährter Methode auf Hausdächern oder auf Freiflächen installiert, um erneuerbaren Strom zu produzieren. Wirth vom Fraunhofer ISE zeigt in einem Positionspapier, wie sich die Photovoltaik alternativ in die Gebäudehülle, in Fahrzeuge, auf Wasserflächen oder in der Landwirtschaft integrieren lässt. Dadurch können bereits belegte Flächen, die für unterschiedliche Nutzungen verwendet werden, zusätzlich zur Stromerzeugung dienen. In dem Positionspapier werden folgende Flächen in Betracht gezogen und jeweils mit den Chancen und Herausforderungen miteinander verglichen: Agrophotovoltaik, bauwerkintegrierte Photovoltaik, fahrzeugintegrierte Photovoltaik, verkehrswegeintegrierte Photovoltaik und schwimmende Photovoltaik. Dabei wird erwähnt, dass die installierte Leistung von PV im Zuge der Energiewende zukünftig um ein Vielfaches steigen muss und deshalb eine große Rolle bei der Stromerzeugung aus Erneuerbaren einnehmen wird. Zudem wird verdeutlicht, dass ein Ausbau von Freiflächenanlagen teilweise auf Widerstand in der Bevölkerung stößt und dadurch zu Akzeptanzproblemen führt [9]. Zusammenfassend wird festgehalten, dass sich die zuvor genannten Flächen in der Natur enormes Potential bergen, in die sich PV unter Berücksichtigung verschiedener technischer und wirtschaftlicher Herausforderungen sowie politischer und gesellschaftlicher Akzeptanz integrieren ließe. Dadurch können einerseits mit dem Ausbau der Photovoltaik entstehende Flächennutzungskonflikte vermieden und andererseits Synergieeffekte bei der PV-Integration auf bereits belegten Flächen geschaffen werden. Abbildung 3 zeigt zusammenfassend in einem Schaubild verschiedene Installationsmöglichkeiten von integrierter Photovoltaik, unter anderem die Technologie der schwimmenden Photovoltaik.



Abbildung 3: Flächenpotentiale integrierter Photovoltaik
(Quelle: [9] Wirth, 2020, S. 38)

Die in diesem Positionspapier erwähnte und in der obigen Abbildung 3 sichtbare schwimmende Photovoltaik wird nun noch genauer beschrieben und in den folgenden Kapiteln der Ergebnisse vertiefend analysiert, um zur Beantwortung der Forschungsfrage zu gelangen. Wie bereits einleitend erwähnt wurde, ist in Anlehnung an die #mission2030 ein starker Ausbau der Photovoltaik notwendig. Dies erfordert die Nutzung von vielen alternativen Flächen zur Integration von PV, unter anderem die Wasseroberflächen, die in Österreich vielzählig zur Verfügung stehen.

2.1 Status der schwimmenden Photovoltaik im globalen Raum

Photovoltaikanlagen auf Freiflächen und Gebäudedächern sind eine eingeführte und bewährte Technologie. Die Verfügbarkeit geeigneter Standorte stößt aber an ihre Grenzen. Bezugnehmend auf die Flächenpotentiale integrierter Photovoltaik in Abbildung 3 wird die Nutzung der schwimmenden Photovoltaik als wichtige Alternative genauer beleuchtet. Es handelt sich bei diesem System der solaren Stromerzeugung um die Installation der lang bewährten und eingesetzten Photovoltaik auf der Oberfläche eines Gewässers. Bisherige internationale Erfahrungen zeigen, dass viel Potential in der Nutzung dieser Technologie besteht, die auf unterschiedlichsten Gewässern installiert werden kann und damit vielseitige Vorteile und Flexibilität bietet. Um diese Anwendung kritisch zu hinterfragen, werden dabei im Zuge der wissenschaftlichen Recherche auch die Herausforderungen und Nachteile betrachtet und damit ein gesamtheitlicher Eindruck abgebildet. Bei der Anwendung sind schwimmende Unterkonstruktionen oder Schwimmkörper und die Verankerung am Untergrund des Wassers notwendig, um die PV-Anlage betriebssicher auf dem Wasser betreiben zu können. Dabei eignen sich zur Anbringung stille Gewässer, Seen, Flüsse und auch Meeresgewässer, unabhängig davon, ob die Gewässer von Lebewesen belebt werden oder nicht. Ebenso

können Gewässer mit landwirtschaftlicher oder industrieller Nutzung verwendet werden. Aufgrund fehlender Langzeitstudien kann laut aktuellem Stand der Einfluss solcher Anlagen auf das Ökosystem erschwert beurteilt werden. Neue Trends sind in der Anfangsphase der Umsetzung meist mit großen Herausforderungen, verschiedenen Einflussfaktoren und Problemen verbunden, dies gilt auch für die schwimmende Photovoltaik. Zudem müssen schwimmende PV-Anlagen stärker an die örtlichen Gegebenheiten der Gewässer angepasst werden und erfordern daher mehr Knowhow als Photovoltaikanlagen auf bisher genutzten Flächen. Schwimmende PV könnte zukünftig aufgrund der enormen Flächenpotentiale die dritte wichtige Säule bei der Anwendung von solarer Stromerzeugung einnehmen. Durch die Installation auf dem Wasser könnten viele Diskussionen bezüglich der Flächenkonkurrenz vermieden werden [1] (S. 15-17).

Die Anwendung von schwimmender Photovoltaik auf Gewässern unterschiedlicher Art ist mit mehreren Vorteilen und Synergieeffekten verknüpft. Ein Hauptaugenmerk bei der Anwendung dieser Technologie liegt in Ländern mit hohen Bevölkerungsdichten und demnach entstehenden Flächennutzungskonflikten. Hierzu wird der asiatische Raum als Beispiel angegeben, in dem die Bevölkerungsdichte im Vergleich zu den anderen Kontinenten um ein Vielfaches höher ist. Bei der Analyse der Einwohnerzahl pro Quadratkilometer wird deutlich, dass Asien einen Wert von rund 150 Einwohnern pro km² aufweist und Europa im Vergleich dazu nur 34 Einwohner auf der gleichen Fläche. Der weltweite Durchschnitt liegt bei rund 60 Einwohnern pro km² und wird laut Prognosen bis zum Jahr 2100 bis zu 84 Einwohner pro km² steigen [10]. Diese Zahlen zeigen deutlich, dass die Verfügbarkeit von Flächen für die Errichtung von Stromerzeugungsanlagen Kontinente übergreifend stark variiert und daher in Ländern mit hohen Bevölkerungsdichten alternative Lösungen benötigt werden. Mit steigendem Wachstum der Weltbevölkerung und gleichbleibender Flächenverfügbarkeit besteht enormes Konfliktpotential bei Eingriffen in die Landschaft und besonders auch in die Landwirtschaft. Zudem führt eine höhere Einwohnerzahl zu höherem Strombedarf, was das Problem des Platzmangels und der Flächenverfügbarkeit zusätzlich verstärkt. Daher bietet die Anwendung von schwimmender PV eine Alternative in Ländern, in denen aufgrund des Platzmangels viele Flächen nicht genutzt werden können, zumal bereits für unterschiedliche Zwecke verwendete Flächen nicht doppelt belegt werden können. Dabei entfällt bei der Nutzung von Wasserflächen in vielen Fällen im Gegensatz zu Freiflächen die Miete, da diese oftmals in eigenem Besitz der Anlagenbetreiber sind.

Cazzaniga et al. beschreiben die Anwendung von schwimmender PV als ideale Alternative, um Konflikte mit der Landwirtschaft und Naturschutzgebieten zu vermeiden. Zudem wird diese Installationsform als positiv eingestuft, weil dadurch weniger Eingriff in die Landschaft erfolgt und somit mehr Flächen für die Nutzung von anderen Objekten zur Verfügung stehen. Des Weiteren entfällt eine mögliche Abholzung von Wäldern, deren Flächen für die Installation von PV-Freiflächenanlagen genutzt werden würden [11] (S. 3).

Die Anwendung der hier interessierenden Systeme trägt einen wichtigen Beitrag zum Ausbau erneuerbarer Energien und zur Diskussion von Flächennutzungskonflikten bei. Für die Umsetzung der österreichischen Entwicklungsziele in Bezug auf die Energieerzeugung mittels erneuerbarer Energien sind schwimmende PV-Anlagen eine wichtige mögliche Anwendungsform. Die österreichische Klima- und Energiestrategie #mission2030 bringt den Bedarf des Ausbaus erneuerbarer Energien deutlich zum Ausdruck. Standortabhängig stehen aber nicht immer große freie Flächen zur Verfügung oder diese sind mit hohen Mietkosten

verbunden. Wasserflächen weisen daher enormes und meist zur Gänze ungenutztes Potential zur Nutzung von PV auf, da diese Flächen in der Natur bereits belegt sind und daher eine Nutzung ermöglichen, ohne zum Beispiel mit der Landwirtschaft in Konflikt zu geraten. Die kombinierte Nutzung der PV-Anlage mit Wasserkraftwerken in Fließgewässern oder Speicherseen birgt angesichts der Flächenknappheit zudem großes Potential aufgrund bestehender Infrastruktur. Dabei wird durch die Betriebsweise der Wasserkraftwerke in Zeiten des Wassermangels eine Flexibilität ermöglicht.

In der folgenden Abbildung 4 wird eine schwimmende PV-Anlage schematisch dargestellt. Dabei sind die einzelnen Anlagenteile zur Übersicht beschriftet. Die Schwimmkörper, auf denen die PV-Module und der Wechselrichter befestigt sind, werden jeweils am Wasseruntergrund vertäut und verankert. Anhängig von der Wassertiefe sind speziell an die Örtlichkeit angepasste Verankerungssysteme notwendig. Um die elektrische Betriebssicherheit zu gewährleisten, sind ein Blitzschutzsystem und Ableitungskabel notwendig. Je nach Standort und Größe wird der erzeugte Gleichstrom aller PV-Anlagen auf dem Wasser gebündelt und über den Wechselrichter als Wechselstrom zum Transformator geleitet. Dabei wird je nach Anwendungsfall der Strom entweder in das örtliche Netz eingespeist oder direkt vor Ort selbst verbraucht, um Maschinen oder Pumpen am selben Standort zu betreiben.

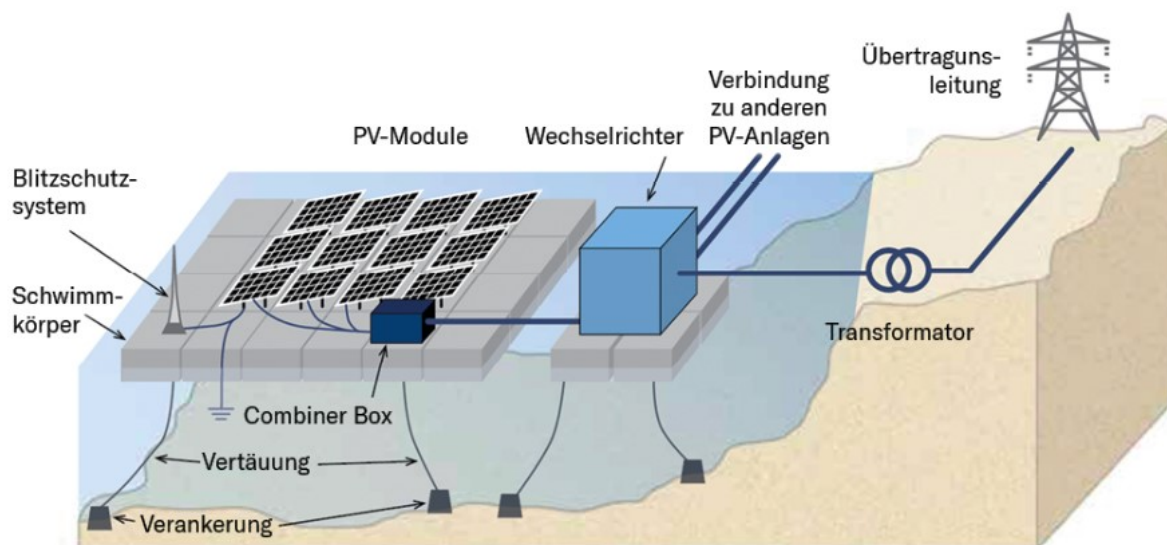


Abbildung 4: Schematische Darstellung einer schwimmenden Photovoltaikanlage
(Quelle: [12] Juch und Rogoll, 2019)

Die nachfolgende Grafik – Abbildung 5 – stellt den gesamten weltweiten Floating PV-Markt seit dem Jahr 2007 bis 2018 dar. Die blauen Balken zeigen die jährlich installierte Leistung und die orange Linie die kumulierte installierte Kapazität der schwimmenden Photovoltaik weltweit. Die Grafik zeigt das bisherige Wachstum und stellt die vermutete zukünftige exponentielle Entwicklung des Themas dar. Laut den Zahlen in der Grafik konnte zwischen 2014 und 2018 in vier Jahren mehr als das 100-fache Wachstum schwimmender PV erreicht werden. Diese enorme Steigerung zeigt die steigende Relevanz und den zukünftigen Ausbau dieser Technologie deutlich. Die Zahlen in der Grafik aus dem Jahr 2018 zeigen eine global installierte Kapazität schwimmender PV von 1,3 GWp.

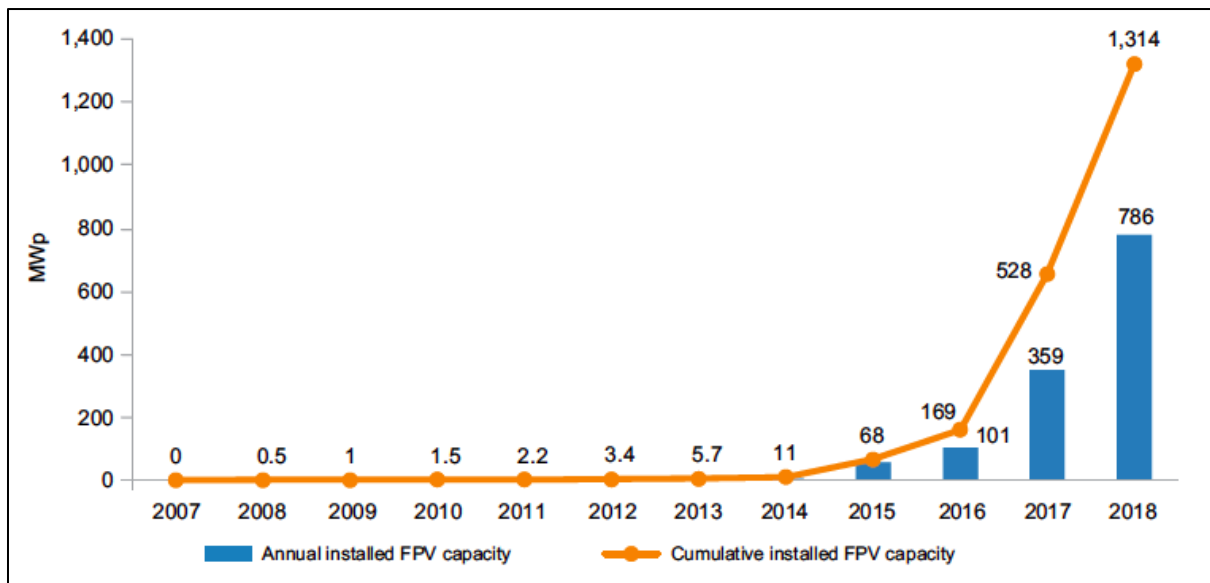


Abbildung 5: Weltweit installierte Kapazität von schwimmender Photovoltaik
(Quelle: [1] World Bank Group et al., 2019a, S. 17)

Als Abschluss der globalen Übersicht werden in diesem Kapitel bisherige Anwendungsformen von schwimmenden PV-Anlagen dargestellt. Dabei liegt der Fokus darin, unterschiedliche Gewässertypen aufzuzeigen, die zur Installation dieser Technologie an unterschiedlichen Standorten auf der Welt als Flächen dienen. Folgende Übersicht in Tabelle 1 zeigt zehn unterschiedliche Gewässertypen, die mit selbst ausgewählten Beispielanlagen im Zuge der Literaturrecherche hinterlegt sind. Weitere relevante Daten und Fakten zu den einzelnen Anlagen sind der Tabelle zu entnehmen. Dabei ist zu erwähnen, dass die angeführten Anlagen nur einen Ausschnitt der Anwendungen darstellen, um mindestens jeweils einen Praxisbezug zum Gewässertyp anzuführen. Die Anwendungen der weltweit über 300 schwimmenden PV-Anlagen verteilen sich auf die aufgelisteten Gewässertypen. Die vermehrte Anwendung im asiatischen Raum ist in der Tabelle deutlich zu erkennen. Dabei handelt es sich größtenteils um stille Gewässer, auf denen die Kosten mittlerweile aufgrund einer etablierten Pontonkonstruktion und mehrjährigen Erfahrungswerte im Bereich der Freiflächenanlagen liegen. Die Übersicht zeigt, dass es bisher noch keine Anwendung dieser Technologie auf Fließgewässern gibt. Lediglich eine Anwendungsform, bei der in Indien ein Trinkwasserkanal mithilfe einer Stahlkonstruktion mit PV-Modulen überbaut wurde, ähnelt den Bedingungen bei Fließgewässern.

Tabelle 1: Übersicht ausgewählter Floating PV-Anlagen mit Fokus auf Gewässertyp
 (Quelle: Eigene Darstellung; Daten aus [1] World Bank Group et al., 2019a, S. 55-74)

	Gewässertyp	Standorte	Inbetriebnahme	Leistung [kWp]	Wassertiefe [m]	Spiegelschwankung [m]	Führendes/Beteiligtes Unternehmen
1	Gefluteter Kohletagebau	Huainan, Anhui, China	2017	150.000	k.A.	k.A.	Sungrow Power Supply
		Huainan, Anhui, China	2017	70.000	k.A.	k.A.	Sungrow Power Supply
		Huainan, Anhui, China	2017	40.000	15	k.A.	Sungrow Power Supply
		Huainan, Anhui, China	2016	20.000	k.A.	k.A.	Sungrow Power Supply
		North Yeolla, Südkorea	2018	18.700	k.A.	k.A.	Korea Water Resources Corp.
2	Industrielles Wasserreservoir	Provinz Savonna, Italien	k.A.	343	k.A.	k.A.	Koine Multimedia, Ciel & Tierre
		Kambodscha	2019	2.800	k.A.	k.A.	Cleantech Solar + Ciel & Tierre
		Yamakura Dam, Ichihara, Japan	2018	13.744	k.A.	k.A.	Kyocera Corporation
3	Künstliches Wasserreservoir	Queen Elisabeth II Reservoir, UK	2016	6.300	18,4	18,4	Ciel & Tierre International
		Godley, UK	2016	2.990	9,9	9,9	Ciel & Tierre International
		Zwolle, Niederlande	2019	14.500	k.A.	k.A.	BayWa + Zimmermann PV-Stahlbau
		Orange, Frankreich	2019	17.000	k.A.	k.A.	Akuo Energy
		Sayreville, New Jersey	2016	4.400	k.A.	k.A.	k.A.
		Kelseyville County, Kalifornien	k.A.	250	k.A.	k.A.	Ciel & Tierre International
		Far Niente Winery, Kalifornien	2008	175	k.A.	k.A.	k.A.
4	Stausee/Speichersee	Alto Rabagao, Portugal	2017	220	90	30	Ciel & Tierre International
		Lac de Toulles, Schweiz	2019	450	k.A.	k.A.	Romande Energie
		Banja Stausee, Albanien	in Bauphase	2.000	k.A.	k.A.	Statkraft + Ocean Sun
5	Trinkwasserreservoir	Ulu Sepri Dam, Malaysien	2016	270	46	17,5	Ciel & Tierre International
		Jackson County, Colorado	2018	75	k.A.	k.A.	k.A.
6	Bewässerungsreservoir	Umenoki, Japan	2015	7.550	6,9	6,9	Ciel & Tierre International
		Sungai Labu, Sepang, Malaysia	2015	108	27	20	k.A.
7	Regenwasserreservoir	Goias Farm, Brasilien	2017	305	3	2	Ciel & Tierre International
8	Meer	Malediven-Inselgruppe	2018	200	k.A.	k.A.	Swimsol GmbH
9	Kontaminiertes Gewässer	Hafen Rotterdam, Niederlande	k.A.	200	k.A.	k.A.	Wattco, Sunprojects, Sunfloat
10	Wasserkanal-überbauung	Narmada Kanal, Gujarat, Indien	2012	1.000	k.A.	nicht anwendbar	k.A.

k.A. = keine Angabe

2.2 Wirtschaftlicher Aspekt der schwimmenden Photovoltaik

Zu Beginn der wirtschaftlichen Aspekte ist allgemein zu erwähnen, dass aufgrund der bisher geringen Umsetzung von rund 300 schwimmenden PV-Anlagen keine allgemeingültigen Kosten als Benchmark für diese vorliegen, da es sich teilweise um Pilotprojekte und Testanlagen handelt. Die Kosten hängen stark davon ab, welche Art von Unterkonstruktion verwendet wird, welche Verankerung gewählt wird, wie tief das Gewässer ist, ob große Wasserspiegelschwankungen vorliegen und ob zusätzliche externe Faktoren – beispielsweise Wetterverhältnisse am Standort – bei der Installation berücksichtigt werden müssen. Zudem haben die Solarstrahlung am Standort der Anlagen sowie die Stromnutzung und Vermarktung einen wichtigen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit dieser Technologie. Schwimmende PV sollte nicht in Konkurrenz zu Freiflächen- und Dachanlagen betrachtet werden, sondern als sinnvolle und innovative Ergänzung zu den bereits ausgereiften Technologien.

In Anlehnung an die World Bank Group et al. werden die Kosten für schwimmende PV-Anlagen analysiert. Werden die Installationskosten, auch CAPEX² genannt, pro Kilowatt peak betrachtet, fallen diese im Vergleich zu Freiflächenanlagen vermutlich höher aus. Dies lässt

² CAPEX ist die Abkürzung für engl. capital expenditures und bezeichnet die Investitionsausgaben für längerfristige Anlagegüter.

sich hauptsächlich aufgrund der Unterkonstruktion begründen. Dabei werden nämlich mehr Anlagenteile zur Installation des Systems und zudem zusätzliche Komponenten für die Verankerung am Gewässeruntergrund benötigt. Wiederum gibt es dabei abhängig vom Installationsort große Unterschiede in Kosten und Komplexität der Unterkonstruktion samt Verankerung. Bei Betrachtung der PV-Module gibt es bisher keine speziell angefertigten Paneele, die nur bei schwimmenden PV-Projekten angewendet werden. Bis dato werden klassische Module mit mono- oder polykristallinen Siliziumzellen eingesetzt [1] (S. 91-93).

Abbildung 6 zeigt die Investitionskosten ausgewählter Floating PV-Projekte mit Fokus auf Asien. Dabei ist ersichtlich, dass eine große Spannweite der Kosten in den einzelnen Ländern vorliegt. Dies lässt sich teilweise damit erklären, dass bei den Projekten mit hohen Kosten die eingesetzten Materialien qualitativ hochwertiger und teurer waren als bei den restlichen Installationen. Zudem spielt hier die Tatsache, dass Pilotanlagen in der Anfangsperiode immer höhere Kosten aufweisen, eine wichtige Rolle. Erst durch die Skalen- und Lerneffekte können solche Anlagen mit günstigeren Kosten gebaut werden. Weiters ist ersichtlich, dass höhere spezifische Kosten fast ausschließlich bei kleineren Anlagengrößen auftreten. Die rot strichlierten Linien zeigen den Bereich, in denen sich die Kosten für die angeführten schwimmenden PV-Anlagen im Durchschnitt bewegen, diese liegen zwischen 0,8 und 1,2 Dollar³ pro Watt peak. Inwiefern die Ausreißer nach oben miteinberechnet oder wie stark sie gewichtet sind, ist unbekannt. Speziell in der Anfangsphase der Umsetzung dieser Technologie werden die Investitionen aber generell höher ausfallen, da aufgrund der fehlenden Expertise, vor allem bei Pilotanlagen, die Kosten steigen [1] (S. 92-93). In Asien ist diese Technologie bereits zu günstigen Kosten verfügbar, weil sich die Anwendung bereits etabliert hat und mehrmals im Megawattbereich umgesetzt wurde. Folglich hat sich die Technik auf stillen Gewässern bereits gut etabliert und das Knowhow ist vorhanden.

³ Bei aktuellem Wechselkurs der Währungen betragen die Zahlen 0,75 und 1,3 Euro pro Watt peak – das entspricht 750 bis 1.300 Euro pro Kilowatt peak (Stand: 20.08.2021).

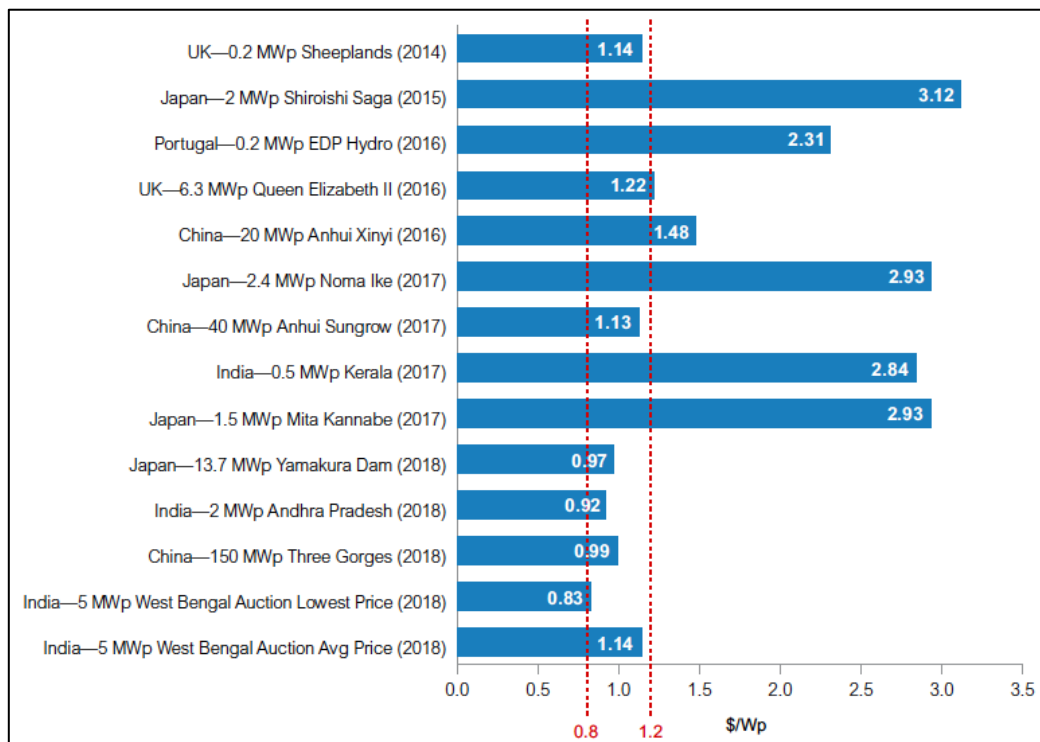


Abbildung 6: Investitionskosten von ausgewählten schwimmenden PV-Anlagen
(Quelle: [1] World Bank Group et al., 2019a, S. 93)

Schwimmende PV-Anlagen erfordern zu Beginn – vor allem bei Pilotanlagen – zwar höhere Investitionen für den Mehraufwand der Unterkonstruktion und Vertäuerung, im Laufe der Zeit liegen die Kosten aber auf dem Niveau der traditionellen Photovoltaik, da schwimmende PV-Anlagen aufgrund der Kühlwirkung des Wassers einen höheren Energieertrag erzielen. Die höheren Systemkosten zu Beginn der Installation werden in der Regel durch die bessere Performance-Ratio ausgeglichen. Mit der Zunahme der Anwendungen können zukünftig dann die Kosten miteinander verglichen und der erhöhte Energieertrag anhand von Vergleichswerten aufgezeigt werden.

World Bank Group et al. zeigen in einer Vergleichsrechnung mit einer Freiflächenanlage die Stromgestehungskosten, auch LCOE⁴ genannt, von Floating PV. Die Annahme für die Berechnungen ist eine Anlagengröße von 50 MWp für beide Aufstellungsarten an unterschiedlichen Standorten. Die Ergebnisse liegen umgerechnet zwischen 4,2 und 8,3 Eurocent pro kWh für verschiedene Szenarien und Aufstellungsorte [1] (S. 102-103). Im Vergleich dazu liegen die Stromgestehungskosten bei klassischen PV-Anlagen zwischen 3,70 und 11,50 Eurocent pro kWh, abhängig von der Anlagengröße und Anwendungsform. Während bei großen Freiflächenanlagen die Kosten im unteren Bereich liegen, fallen diese bei kleinen Dachanlagen höher aus. All die genannten Zahlen in diesem Absatz repräsentieren unterschiedliche Annahmen und Berechnungen der Kosten und dienen somit nur für eine grobe Einschätzung.

⁴ LCOE ist die Abkürzung für engl. Levelized Cost of Electricity und bezeichnet die Stromgestehungskosten für die Erzeugung elektrischer Energie.

Bei Betrachtung der Wartung gibt es bisher keine Studien, die eindeutig belegen, dass bei schwimmender PV öfters Wartungsarbeiten durchgeführt werden müssen als bei Freiflächenanlagen. Aufgrund der relativ neuen Technologie mit bisher wenig Knowhow würden ein erhöhter Wartungsaufwand und kürzere Intervalle aber Sinn ergeben, um die Betriebssicherheit im Wasser gewährleisten und mögliche Komplikationen frühzeitig erkennen zu können. Die kürzeren Intervalle und der Gebrauch von Booten und Tauchern für die Zugänglichkeit spiegeln sich wiederum in erhöhten Kosten nieder. Üblicherweise wird eine Betriebszeit von 20 bis 30 Jahren für schwimmende PV-Anlagen veranschlagt.

Zukünftig werden aufgrund der Skalen- und Lerneffekte die Kosten auch im Bereich der schwimmenden PV-Anlagen sinken, so wie das bei den bisherigen Anwendungen von PV geschehen ist. Bisher beträgt die installierte Kapazität rund 1,3 GWp, was nur einem kleinen Bruchteil der weltweit insgesamt installierten PV-Leistung entspricht – dieser Wert beträgt rund 760 GWp. Wie bereits erwähnt wurde, können momentan keine genauen Rückschlüsse auf die Installations- und Stromgestehungskosten gezogen werden, weil abhängig vom Gewässer unterschiedliche Bauteile benötigt werden und daher unterschiedliche Kosten anfallen. In der bisherigen Recherche wurde nur eine konkrete Zahl über Stromgestehungskosten bei Floating PV gefunden. Mit Steigerung der Expertise und Abflachen der Lernkurve können zukünftig genauere Rückschlüsse gezogen werden.

2.3 Optionen schwimmender Photovoltaik mit Fokus auf Österreich

In den folgenden Unterkapiteln werden ausgewählte Aspekte der schwimmenden Photovoltaik mit Fokus auf Österreich analysiert. Dabei werden zunächst rechtliche Aspekte, Vorteile und Synergien sowie Nachteile behandelt. Die kritische Betrachtung des Themas soll zeigen, welche Schwierigkeiten und Herausforderungen es auf österreichischen Gewässern zu beachten gibt. In Summe besteht aber großes Potential mit vielen Synergieeffekten, an geeigneten Kraftwerksstandorten schwimmende PV-Anlagen als Pilotprojekte zu erproben, um dem PV-Ausbau bis 2030 gerecht zu werden.

2.3.1 Rechtliche Aspekte

Folgend wird untersucht, wie die Rechtslage der schwimmenden Photovoltaik speziell in Österreich ist und ob es überhaupt Gesetze für diese neue Anwendungsform gibt. Die Rechtsgrundlage bildet das Elektrizitätswirtschafts- und organisationsgesetz 2010 idF BGBl. I. Nr. 110/2010 (EIWOG 2010). § 4 EIWOG 2010 zeigt die Ziele dieses Bundesgesetzes. Dessen Ziffer 5 besagt, dass die Weiterentwicklung der Elektrizitätserzeugung aus erneuerbaren Energiequellen unterstützt und der Zugang zum Elektrizitätsnetz aus erneuerbaren Quellen gewährleistet werden soll. Zudem besagt § 4 Ziffer 7 EIWOG 2010, dass die Versorgung mit elektrischer Energie insbesondere aus heimischen, erneuerbaren Ressourcen erfolgen soll. Bezugnehmend auf diese beiden Bestimmungen in § 4 EIWOG 2010 stehen somit innovativen Lösungen im Bereich der Stromerzeugung nichts im Weg. Im österreichischen Rechtsinformationssystem des Bundes wurde bei der bisherigen Recherche und bei der Suche nach gezielten Suchbegriffen kein eindeutiger Gesetzestext oder Paragraph gefunden, der die Anwendung von PV-Anlagen auf dem Wasser erlaubt, fördert oder verbietet.

Juch und Rogoll diskutieren in ihrem Papier die rechtlichen Rahmenbedingungen von schwimmenden PV-Anlagen am Beispiel Deutschland. In Bezug auf öffentlich-rechtliche

Rahmenbedingungen beschreiben die Autoren im Papier, dass wie bei Freiflächenanlagen auf dem Land auch ein Bebauungsplan und eine Baugenehmigung für die Installation von PV auf dem Wasser erforderlich sind. Auch wird erwähnt, dass jeglicher Eingriff in das Wasser keine schädlichen Gewässerverunreinigungen mit sich bringen darf. Dabei handelt es sich um die Errichtung und den Betrieb von Anlagen, die in direktem Kontakt mit dem Wasser stehen. In diesem Zusammenhang gelten die landesrechtlichen Vorschriften. Wenn die wasserrechtlichen Aspekte genehmigt werden, müssen in weiterer Folge auch die Nutzung der Wasserflächen mit dem Eigentümer des Gewässers geklärt und entsprechende Pacht- oder Leihverträge für die Nutzungsvereinbarung abgeschlossen werden. Dabei geht es um die Themen Grundstückseigentum und Grundstückspacht. Falls Nutzungsrechte anderer Personen für die Gewässer vorhanden sind, müssen zudem Fischereirechte oder Schifffahrtsrechte betrachtet werden, um Vereinbarungen für die Anwendung schwimmender PV zu treffen [12]. Diese genannten Aspekte, die speziell für Deutschland gelten, müssen vermutlich bei der Anwendung in Österreich ebenfalls in leicht abweichenden Formen betrachtet und eingehalten werden, um schwimmende PV-Anlagen genehmigen und installieren zu dürfen.

Im Zuge eines Gruppengesprächs mit Mitarbeitern eines EVUs wurden unterschiedliche rechtliche Bereiche und beeinflussende Faktoren angesprochen, die bei einer möglichen Anwendung von schwimmenden PV-Anlagen vorab betrachtet werden sollten. Nachfolgend werden in Anlehnung an das Gespräch einige Themenbereiche angeführt.

- **Fischereirecht:** Das Thema der Fischereirechte sollte bei einer möglichen Installation von PV-Modulen auf der Wasseroberfläche immer genau abgeklärt werden. Oft besitzen Personen Fischereirechte in speziellen Gewässern. Wenn diese Fischereigebiete durch die Installation solcher Technologien beeinträchtigt werden, sind sehr große Entschädigungen zu begleichen. In Angesicht dieser hohen Entschädigungszahlungen für Fischerrechte schließt dieses Recht nahezu für alle betroffenen Standorte die Installation schwimmender PV aus, weil die Kosten enorm steigen und somit die Wirtschaftlichkeit nicht abgebildet werden kann.
- **Schifffahrtsrecht:** Bei einer Anwendung in Fließgewässern, beispielsweise in der Donau, muss die Schifffahrt im Fluss berücksichtigt werden. Eine schwimmende PV-Anlage müsste so auf dem Gewässer installiert werden, dass die Schifffahrt, der Bootsverkehr und der Freizeitverkehr im Fließgewässer nicht beeinträchtigt werden. Dazu müssten Bereiche ausgewählt werden, die außerhalb dieser befahrbaren Zonen liegen. Oft grenzen aber die Gebiete für Fischereizonen und Schifffahrtsverkehr aneinander, was die Anwendung von Floating PV wiederum erschwert.
- **Naturschutzrecht:** Der Naturschutz ist laut dem Umweltbundesamt in Österreich eine Landessache. Die Ämter der Landesregierungen regeln den Schutz von Natur und Landschaft. Der Naturschutz dient der nachhaltigen Nutzung der Landschaft und der darin befindlichen Tier- und Pflanzenwelt [13]. Bei der Umsetzung von schwimmenden PV-Anlagen muss darauf geachtet werden, dass kein Eingriff in den Lebensraum von Tieren und Pflanzen stattfindet. Die Biotope und Ökosysteme sollen dabei unberührt bleiben und nicht nachteilig betroffen werden.

- **Wasserrecht:** Zur Berücksichtigung des Wasserrechts sind grundsätzlich für alle Eingriffe in einem Gewässer vorab Bewilligungen notwendig. Dies würde vermutlich auch für die Installation schwimmender PV-Anlagen gelten. Zudem müsste abgeklärt werden, ob es sich bei den Gewässern, wo die Installation stattfinden soll, um ein geschütztes Gewässer handelt. Natürliche Gewässer sind in manchen Bundesländern beispielsweise geschützt.

Im Zuge der Gruppengespräche wurde festgestellt, dass eine Reihe von weiteren Fragestellungen und rechtliche Aspekte für die Anwendung von schwimmender PV zu beachten sind. Hierbei müssten mehrere Gesetze betrachtet werden, unter anderem das Energiewirtschaftsrecht und das Elektrizitätswirtschaftsrecht für den Stromanschluss und die Netzeinspeisung. Zudem ist das Raumordnungsrecht zu beachten und es sind Baugenehmigungen für jegliche Installation von PV-Anlagen notwendig. Weiters muss im Zuge der Umsetzung abgeklärt werden, ob das Gewässer eine spezielle Widmung benötigt, welche die Nutzung von PV auf einem Gewässer erlaubt. Die Flächenwidmung für die Nutzung ist erforderlich und regelt den Verwendungszweck des Grundstücks.

Die bisherige Recherche der Gesetzestexte anhand von Suchfunktionen nach gezielten Begriffen zeigt, dass es zurzeit in Österreich noch keine klaren Richtlinien und Verordnungen für Genehmigungen und Zulassungen von schwimmenden PV-Anlagen gibt und somit vermutlich die gleichen Bestimmungen wie bei Freiflächenanlagen gelten. Bis dato gibt es noch keine speziellen Rechtsverordnungen.

2.3.2 Vorteile & Synergien

Mehrere Quellen, wie zum Beispiel World Bank Group et al. oder Cazzaniga et al. beschreiben die Anwendung von schwimmender PV mit klaren Vorteilen sowohl für die Funktionsweise der PV-Anlagen als auch für die Gewässer, auf denen die Anlage installiert wird. Folgend werden in Tabelle 2 die Vorteile in unterschiedliche Gruppen eingeteilt und zur Übersicht in einer zusammenfassenden Tabelle dargestellt. Dabei werden zum einen die Auswirkungen auf den Betrieb der PV-Anlage auf dem Wasser und zum anderen die Auswirkungen auf die Wasserbewirtschaftung mit Vorteilen und Synergien untermauert. Zudem werden in einer eigenen Kategorie allgemeine Gesichtspunkte definiert, die während dem Betrieb der schwimmenden PV zum Vorschein treten und die Vorteile dieser Technologie nochmals untermauern.

*Tabelle 2: Vorteile und Synergien bei der Anwendung schwimmender Photovoltaik
(Quelle: Eigene Darstellung)*

Anwendungsbereich	Vorteile & Synergien
Auswirkungen auf den Betrieb der PV-Anlage	○ Kühlender Effekt des Wassers auf die Photovoltaik ○ Hohe Windgeschwindigkeiten auf dem Gewässer verstärken die kühlende Wirkung ○ Kühle Umgebung steigert Effizienz, Modulleistung, Wirkungsgrad & Ertrag der PV-Anlage ○ Hybride Anwendung auf Speicherseen möglich
Auswirkungen auf die Wasserbewirtschaftung	○ Bedeckung der Wasseroberfläche reduziert Verdunstung ○ Reduktion des Algenwachstums aufgrund der Verschattung ○ Wassertemperatur wird reduziert
Allgemeine Gesichtspunkte	○ Doppelte Nutzung einer bereits verbrauchten Fläche ○ Kein zusätzlicher Flächenverbrauch in der Landschaft ○ Wasser lokal verfügbar für die Reinigung der PV-Module ○ Einfache Skalierbarkeit bei der Anwendung geeigneter Pontons ○ Lokale Deckung von Strombedarf und -erzeugung

Wenn der Standort Österreich betrachtet wird, gibt es unterschiedliche Flächenpotentiale, die für die Installation und Nutzung erneuerbarer Energien zur Verfügung stehen. Im Großteil des Landes dominiert die Nutzung der Wasserkraft für die Stromerzeugung anhand von Laufwasserkraftwerken in Fließgewässern, beispielsweise im Inn oder in der Donau. Im Osten eignen sich an vielen Stellen aufgrund der flachen Landschaft Windkraftanlagen für die Stromproduktion aus lokalen erneuerbaren Energiequellen. Wird im Gegenzug dazu der Westen Österreichs betrachtet, zeigt der alpine Lebensraum ganz andere Verhältnisse für die Nutzung erneuerbarer Energiequellen. Hier liegt der Fokus in der Solarenergie und in der Nutzung der Wasserkraft für die Stromerzeugung. In Tirol wird die potentielle Energie zwischen Berg- und Tallagen vermehrt verwendet. Dazu eignen sich Speicherseen in den Gebirgen, um große Wassermengen im alpinen Raum ganzjährig zu speichern und bei Bedarf in Tallagen damit Strom zu produzieren. Stauseen der Speicher- und Pumpspeicherkraftwerke im alpinen Raum sowie Speicherseen in Schigebieten nehmen große Flächen ein. In Anbetracht dieser enormen Flächen für die Speicherung des Wassers könnte die PV zukünftig eine zusätzliche wichtige Rolle einnehmen, indem sie mit der Wasserspeicherung gekoppelt wird. Eine schwimmende PV-Anlage würde eine bereits beanspruchte Fläche, die für

technische Zwecke anhand der Wasserkraftnutzung verwendet wird, doppelt belegen und somit eine mögliche Flächennutzungsproblematik im alpinen Raum lösen. An solchen Standorten wäre eine Netzanbindung vor Ort und die Stromabnahme durch Verbraucher ebenfalls verfügbar.

Zudem haben die Temperaturverhältnisse in hohen Lagen einen positiven Einfluss auf die Betriebsweise der PV-Anlagen. Durch einen Einsatz der PV im hochalpinen Raum besteht somit großes Potential für die Steigerung der Effizienz aufgrund der kälteren Umgebung als in Tieflagen. Die kühlen Temperaturen und die erhöhte Solarstrahlung wirken sich ertragssteigernd auf die PV aus. Zudem wäre die Installation von PV-Modulen im alpinen Raum und insbesondere auf Wasserflächen insofern vorteilhaft, als viele Personen dieser Technologie kritisch gegenüberstehen und nur die negativen Aspekte wie zum Beispiel den Landschaftsverbrauch darin sehen. Zum einen wäre die Anbringung im hochalpinen Raum außerhalb des Blickfeldes der kritischen Gesellschaft und zum anderen würden bereits beanspruchte Flächen doppelt belegt werden. Die Wirkungsgradsteigerung aufgrund der Kühlung auf der Wasseroberfläche und die höhere solare Einstrahlung im alpinen Raum ermöglichen zudem einen geringeren Flächenverbrauch der Photovoltaik auf dem Wasser.

2.3.3 Nachteile & Risiken

Wie bei fast allen innovativen Projekten ist auch die Umsetzung von schwimmender PV mit gewissen Herausforderungen und Nachteilen konfrontiert. In den folgenden Absätzen sollen einige nachteilige Aspekte bei der Anwendung dieser Technologie aufgezeigt werden. Die Betrachtung dieser Aspekte dient dazu, um eine kritische Sichtweise und gesamtheitliche Betrachtung des Themas zu erlangen.

Wie im Kapitel zu den rechtlichen Aspekten bereits angesprochen, muss vor der Umsetzung solcher Projekte je nach Anwendungstyp des Gewässers der Eingriff in die Natur abgewogen werden. Die Bauteile und die Gewässer müssen gezielt ausgewählt und angewendet werden, die den Lebensraum der Tiere und Pflanzen im Wasser nicht beeinflussen. Hierbei stellt die Elektronik im Wasser ein Risiko dar, das bei Ausfall der Bauteile oder Schäden mögliche Gefahren auf den Lebensraum im Wasser aufweist. Zudem erweist sich der Zugang zu den Teilen bei Defekten als riskant, weil die Sicherheit des Personals ständig gewährleistet sein muss. Die Wartung und Instandhaltung ist mit höherem Aufwand verbunden als bei PV-Anlagen auf Freiflächen, bei denen der Zugang einfacher möglich ist.

Nachteilig erscheinen bei anfänglicher Umsetzung auch die hohen Kosten, die für die teils aufwändige Verankerung entstehen. Aufgrund der geringen Erfahrungswerte speziell in Gewässern mit hohen Wasserspiegelschwankungen oder hohen Fließgeschwindigkeiten werden die Kosten für diese spezielle Verankerungstechnik in die Höhe getrieben. Am Markt sind zwar Standard-Verankerungen für schwimmende PV-Module verfügbar, diese eignen sich jedoch meistens nur bei stillen Gewässern mit konstanten Wasserverhältnissen. Allgemein sind neue Technologien in der Anfangsphase bei Pilotprojekten mit höheren Kosten verbunden, die im Laufe der Zeit mit steigenden Erfahrungen und Lerneffekten sinken [14].

Um die ausgewählten Aspekte auch eindeutig als Nachteile einstufen zu können, sind aus Sicht des Autors Erfahrungen aus Langzeitstudien und Pilotprojekten notwendig, deren Ergebnisse in weiterer Folge analysiert werden können. Schwimmende PV müsste dabei idealerweise auf Speicherseen oder in Flüssen eingesetzt werden, um Vergleichswerte zu

erhalten. Online verfügbare Studienergebnisse über diese Anwendungsformen wurden bisher im Zuge von Internetrecherchen noch nicht gefunden.

2.4 Standortbewertung schwimmender Photovoltaik an Wasserkraftwerken

Anhand von Besuchsterminen an Wasserkraftwerksstandorten und Telefonkonferenzen mit Mitarbeitern eines österreichischen Energieversorgungsunternehmens wurden unterschiedliche Kraftwerkstypen und Gewässer näher betrachtet. Dabei wurde insbesondere mit Fachkräften aus unterschiedlichen Abteilungen diskutiert, ob und welche davon überhaupt für die Umsetzung einer schwimmenden PV-Pilotanlage geeignet wären.

Für die Standortbewertung schwimmender Photovoltaik an Wasserkraftwerksstandorten in folgender Tabelle 3 werden die theoretischen und auf Expertenwissen basierenden Erkenntnisse aus den Literaturrecherchen und Expertengesprächen angewendet. Im Zuge dieser anwendungsbezogenen Forschungsmethode soll die Praxistauglichkeit dieser Technologie in Österreich erfasst werden.

Folgende Tabelle 3 dient als Übersicht und zeigt für die Standortbewertung auf beliebigen Gewässern jeweils technische, rechtliche und wirtschaftliche Herausforderungen bei der Implementierung einer schwimmenden PV-Anlage. Die Übersicht fasst relevante Aspekte aus den Erkenntnissen der wissenschaftlichen Untersuchung zusammen. Diese Punkte sollten für jegliche schwimmende PV-Anlagen im Falle einer Umsetzung untersucht und abgewogen werden. Anhand der Herausforderungen und Hindernisse aus Tabelle 3 kann die Eignung von beliebigen Gewässern und Wasserkraftwerken für diese Technologie bewertet werden. Die Anzahl und Genauigkeit der Kriterien dient als erste Orientierung und ist sehr allgemein für verschiedene Gewässerarten formuliert.

*Tabelle 3: Standortbewertung schwimmender PV hinsichtlich technischer, rechtlicher und wirtschaftlicher Herausforderungen
(Quelle: Eigene Darstellung)*

Standort-bewertung	Herausforderungen + Hindernisse	
Technischer Aspekt	○ Treibgut im Gewässer ○ Wasserspiegelschwankung ○ Wassertiefe ○ Wellengang ○ Fließgeschwindigkeit ○ Revisionsarbeiten ○ Stauraumentleerungen	○ Unterkonstruktion ○ Verankerung ○ Einfluss in das Gewässer ○ Wettereinflüsse ○ Wartungsintervall ○ Betriebssicherheit ○ Netzzugang
Rechtlicher Aspekt	○ Wasserrecht ○ Naturschutzrecht ○ Gewässerschutz ○ Umweltschutz ○ Energiewirtschaftsrecht ○ Elektrizitätswirtschaftsrecht ○ Grundstückseigentum	○ Grundstückspacht ○ Bauordnung ○ Baugenehmigung ○ Raumordnungsrecht ○ Flächenwidmung ○ Fischereirecht ○ Schifffahrtsrecht
Wirtschaftlicher Aspekt	○ Solarstrahlung ○ Investitionskosten ○ Kosten für Unterkonstruktion & Verankerungssystem ○ Stromnutzung & Vermarktung	

3 Beantwortung der Forschungsfrage

In diesem Kapitel wird die zu Beginn formulierte Forschungsfrage beantwortet. Diese lautet konkret: *Welche technischen, rechtlichen und wirtschaftlichen Herausforderungen ergeben sich bei der Implementierung schwimmender Photovoltaik auf ausgewählten Speicherseen und Fließgewässern?*

Im Zuge der ausführlichen Literaturrecherche und Durchführung einer qualitativen Forschung in weiteren Teilen der wissenschaftlichen Untersuchung wurden die gesamten Erkenntnisse zur Beantwortung der Forschungsfrage zusammengeführt. Diese umfassen jeweils Herausforderungen aus technischer, rechtlicher und wirtschaftlicher Sicht und dienen stellvertretend für beliebige Gewässerstandorte. Die Berücksichtigung all dieser relevanten Aspekte ist erforderlich, da ohne Bewertung dieser ansonsten die Anwendung der schwimmenden PV-Technologie nicht möglich erscheint. Die nachfolgenden kritischen – an beispielhaften Gewässern im Detail untersuchten – Punkte verdeutlichen, dass die Hürden bei der Implementierung dieser Technologie sehr hoch sind und die Umsetzung viel Zeit und Kosten in Anspruch nimmt.

- Aus technischer Sicht sind folgende kritischen Herausforderungen bei der Anwendung der Technologie auf beispielhaft untersuchten Gewässern im Überblick zu untersuchen: Treibgut im Gewässer, Wasserspiegelschwankungen, Wassertiefe, Wellengang, Fließgeschwindigkeit des Wassers, Stauraumentleerungen im Zuge von Revisionsarbeiten, Unterkonstruktion mit entsprechender Verankerung und die Gewährleistung der Betriebssicherheit aufgrund von Wettereinflüssen.
- Aus rechtlicher Sicht ergeben sich folgende kritischen Herausforderungen bei der Anwendung dieser Technologie: Naturschutzrecht, Fischereirecht und Schifffahrtsrecht – nähere rechtliche Aspekte wurden im Zuge der wissenschaftlichen Arbeit nicht im Detail untersucht.
- Aus wirtschaftlicher Sicht ergeben sich folgende Herausforderungen bei schwimmender Photovoltaik: Investitionskosten in Summe und speziell die Kosten für die erforderliche Unterkonstruktion samt Verankerungssystem am Gewässerboden.

Diese technischen, rechtlichen und wirtschaftlichen Herausforderungen sind relevante Argumente, die ausschlaggebend für die Bewertung der Machbarkeit einer Anwendung von schwimmender Photovoltaik auf unterschiedlichen Gewässern sind. Aufgrund der großen zu überwindenden Hürden führen die genannten Herausforderungen oft zum Ausschluss der Umsetzung. Eine kritische Überprüfung der standortspezifischen Umsetzbarkeit einer Installierung von Floating PV ist vor Start eines Pilotprojektes daher zwingend erforderlich. Die Anwendung der schwimmenden PV-Technologie zeigt aber viele positive Effekte, nämlich die Doppelnutzung einer bereits verbrauchten Fläche und die positiven Wechselwirkungen zwischen der PV-Anlage und dem Wasserreservoir. Der Fokus liegt dabei auf dem kühlenden Effekt oberhalb des Wassers, weshalb die Technologie zukunftsreich und spannend scheint.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Diese Arbeit befasst sich mit dem Thema schwimmende Photovoltaikanlagen als alternative Installationsform zu den vielfach bestehenden und bereits etablierten Freiflächenanlagen und Dachanlagen dieser Stromerzeugungstechnologie. Bei Betrachtung der österreichischen Klima- und Energieziele wird ersichtlich, dass im Bereich der Photovoltaik ein großer Ausbau in den nächsten Jahren erforderlich ist. Der Großteil der bisher installierten schwimmenden PV-Anlagen wurde auf stillen Gewässern im asiatischen Raum installiert. Dies führt zur Forschungslücke, dass auf Gewässern mit hohen Wasserspiegelschwankungen, großen Tiefen und hohen Fließgeschwindigkeiten großteils die Erfahrungen zur Installation von PV-Anlagen fehlen, da diese auf solchen Gewässern bisher kaum umgesetzt wurden. Diese Forschungslücke führt zur Forschungsfrage in der wissenschaftlichen Untersuchung, in der beleuchtet wird, welche technischen, rechtlichen und wirtschaftlichen Herausforderungen sich bei der Implementierung schwimmender Photovoltaik auf ausgewählten Speicherseen und Fließgewässern ergeben. Zur Beantwortung der Forschungsfrage wurden zum einen Primär- und Sekundärforschung als empirische Forschungsmethode und zum anderen die qualitative Forschungsmethode verwendet, im Zuge der mehrere Gruppengespräche mit Mitarbeitern eines EVUs und Vor-Ort-Besuche bei Kraftwerksstandorten wichtige Erkenntnisse lieferten.

Die ersten Erkenntnisse zeigen, dass weltweit bereits über 300 Anlagen dieser Technologie installiert sind und Ende 2018 die weltweit installierte Leistung bei rund 1,3 GWp lag. Der bisherige Fokus der Anwendungen liegt aber im asiatischen Raum auf hauptsächlich stillen Gewässern, wo die Kosten mittlerweile geringgehalten werden können und bereits großes Knowhow erworben wurde. Weitere Recherchen zeigen, dass speziell der alpine Raum großes Potential für die Anwendung von schwimmender Photovoltaik aufweist. Wettereinflüsse haben einen relevanten Einfluss auf den Betrieb der PV-Anlagen und sind wichtig zu beachten. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird der Fokus auf Österreich gesetzt und relevante rechtliche Aspekte bei der Anwendung dieser Technologie aufgelistet. Weiters werden die Vorteile und Synergien dieser Anwendung und die Wechselwirkungen zwischen der Photovoltaik und dem Wasser gezeigt. Im Gegenzug werden auch die Nachteile erwähnt, die bei der Umsetzung schwimmender PV entstehen – es handelt sich dabei um die hohen Kosten aufgrund der noch geringen Expertise im europäischen Raum.

In den weiteren Ausarbeitungen wird gezeigt, welche technischen, rechtlichen und wirtschaftlichen Herausforderungen im Überblick bei jeder Anwendung schwimmender Photovoltaik zu berücksichtigen sind. Die Tabelle wurde anhand der Erkenntnisse im Theorieteil der Untersuchung und der Expertengespräche eigenständig entwickelt und zeigt alle Aspekte auf, die bei der detaillierten Standortbewertung für diese Technologie zu berücksichtigen sind. Im Allgemeinen muss jede Anwendung von Floating PV standortspezifisch betrachtet werden, um eine Umsetzung mit möglichst geringen Hürden zu erzielen.

Der Ausblick für weiteren Forschungsbedarf und offene Fragestellungen umfasst verschiedene Facetten. Es stellt sich zu Beginn die Frage, wie stark der kühlende Effekt des Wassers auf den Betrieb der Photovoltaik in den europäischen und speziell österreichischen Breitengraden wirkt. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die detaillierte Untersuchung der rechtlichen Sicht auf die Etablierung dieser Anwendung. Weiters muss untersucht werden, wie eine geeignete Verankerung speziell auf Speicherseen mit großen Tiefen und hohen Wasserspiegelschwankungen möglich sein könnte. Eine weitere offene Fragestellung betrifft den Einfluss der schwimmenden PV auf das Ökosystem im Gewässer. Die Ergebnisse einer Langzeitstudie könnten unterschiedliche saisonale Wettereinflüsse abbilden und geeignete Standorte für schwimmende PV-Anlagen aufzeigen. Die Identifizierung einer geeigneten, skalierbaren Pontonkonstruktion spielt ebenfalls eine wichtige Rolle, um einen optimalen Betrieb zu ermöglichen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Technologie der schwimmenden Photovoltaik in Österreich ein relativ neues Thema darstellt und zukünftig noch großer Forschungsbedarf hinsichtlich verschiedener Aspekte besteht, um die Etablierung dieser Anwendungsart von Photovoltaik mit hohem Potential weltweit voranzutreiben. Schwimmende PV-Anlagen zeigen sich als wirtschaftlich und technisch machbare Alternative zu den bereits etablierten Anwendungen dieser Stromerzeugungstechnologie. In Österreich wäre die schwimmende Photovoltaik eine effiziente Option, um das Ziel des PV-Zubaus bis 2030 im Rahmen der #mission2030 ohne zusätzlichen Flächenverbrauch schrittweise zu erreichen.

Literatur

- [1] **World Bank Group, Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP) und Solar Energy Research Institute of Singapore (SERIS), 2019a.** Where Sun Meets Water: Floating Solar Market Report. Washington DC: World Bank
- [2] **Sandberg, B., 2017.** Wissenschaftliches Arbeiten von Abbildung bis Zitat: Lehr- und Übungsbuch für Bachelor, Master und Promotion. 3. Auflage. Berlin, Boston: De Gruyter Oldenbourg
- [3] **Reinders, H., et al., 2011.** Empirische Bildungsforschung: Strukturen und Methoden. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften
- [4] **World Bank Group, Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP) und Solar Energy Research Institute of Singapore (SERIS), 2019b.** Where Sun Meets Water: Floating Solar Handbook for Practitioners. Washington DC: World Bank
- [5] **Kahl, A., 2019.** Wintersonne für die Versorgungssicherheit: Vorteile der alpinen Photovoltaik. In: Bulletin SEV/VSE. Fachartikel Erneuerbare Energien. Ausgabe 10. S. 19-23
- [6] **Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus & Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 2018.** Mission 2030: Die österreichische Klima- und Energiestrategie. Strategiepapier. Wien
- [7] **Österreichische Energieagentur, 2018.** 100% erneuerbarer Strom laut #mission2030: Erstevaluierung der Zieldefinition der österreichischen Klima- und Energiestrategie. Wien
- [8] **Bundesverband Photovoltaic Austria, 2020.** Daten und Fakten zur Photovoltaik & Stromspeicherung. [online]. Wien [Zugriff am 01.03.2020] Verfügbar unter: <https://www.pvaustria.at/daten-fakten/#close>
- [9] **Wirth, H., 2019.** Integrierte Photovoltaik – Flächen für die Energiewende. Positionspapier. Freiburg: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
- [10] **Statista GmbH, 2019.** Prognose der Bevölkerungsdichte in den Kontinenten in den Jahren 2020 und 2100: in Einwohner pro Quadratkilometer. [online]. Hamburg [Zugriff am 29.01.2020] Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1721/umfrage/bevoelkerungsdichte-nach-kontinenten/>
- [11] **Cazzaniga, R., et al., 2019.** Integration of PV floating with hydroelectric power plants. In: Heliyon. 5. S. 1-8
- [12] **Juch, N., und M. Rogoll, 2019.** Floating PV: Schwimmende Photovoltaikanlage als neuer Trend?. In: Rödl & Partner: Erneuerbare Energien: Erfahrungen und Trends weltweit. Ausgabe Februar 2019. S. 8-10
- [13] **Umweltbundesamt GmbH, 2020.** Naturschutz ist Landessache. [online]. Wien [Zugriff am 18.03.2020] Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/naturschutz/natur_bundesland/

- [14] **Thoubboron, K., 2018.** Floating solar: what you need to know. EnergySage News. [online]. [Zugriff am 10.03.2020] Verfügbar unter: <https://news.energysage.com/floating-solar-what-you-need-to-know/>