

Hochschule Bremen

Fakultät 5: Natur und Technik

Internationaler Studiengang Technische und Angewandte Biologie

“Einflüsse von FPV-Anlagen (Floating Photovoltaik) auf das
Ökosystem See”

"Influences of FPV systems (floating photovoltaics) on the lake
ecosystem"

Bachelorarbeit

Erster Prüfer:

Prof. Dr. Thomas Klefoth

Thomas.klefoth@hs-bremen.de

Hochschule Bremen

Zweiter Prüfer:

Dr. Robert Taube

Robert.taube@hs-bremen.de

Hochschule Bremen

Vorgelegt von:

414059 (Matr.-Nr.)

Marc Kerstiens

mkerstiens@stud.hs-bremen.de

Bremen, 30.12.2022

Erklärung über das eigenständige Erstellen der Arbeit

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen der Arbeit, die anderen Werken dem Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen wurden, sind durch Angaben der Herkunft kenntlich gemacht.

Diese Erklärung erstreckt sich auch auf in der Arbeit enthaltene Grafiken, Skizzen, bildliche Darstellungen sowie auf Quellen aus dem Internet.

Die Arbeit habe ich in gleicher oder ähnlicher Form noch nicht als Bestandteil einer Prüfungs- oder Studienleistung vorgelegt.

Ich versichere, dass die eingereichte elektronische Version der Arbeit vollständig mit der Druckversion übereinstimmt.

Bremen, den 30.12.2022



Marc Kerstiens

Inhaltsverzeichnis

Stichwortverzeichnis.....	IV
Tabellenverzeichnis.....	VI
Abbildungsverzeichnis	VII
Zusammenfassung.....	VIII
Abstract.....	IX
1. Einleitung	1
2. Material und Methoden.....	6
2.1 Auswirkungen von FPV-Systemen auf das Ökosystem See – Recherche.....	6
2.2 Analysetool und Anwendungsbeispiel.....	7
2.2.1 Anwendungsbeispiel Baggersee.....	8
3. Ergebnisse	9
3.1 Technologieübersicht der schwimmenden Photovoltaik Systeme (FPV).....	9
3.1.1 Energieproduktion und Flächenbedarf von FPV.....	20
3.2 Die Auswirkungen von FPV auf das Ökosystem See.....	22
3.2.1 Auswirkungen von FPV auf den Wärmehaushalt im See	22
3.2.2 Reduzierung der Verdunstung durch FPV	29
3.3 Auswirkungen von FPV auf die Stoffkreisläufe und Nährstoffe im See	30
3.3.1 Einfluss von FPV auf den Sauerstoffhaushalt.....	31
3.3.2 Einfluss von FPV auf die Wasserqualität und die Nährstoffe im See	33
3.4 Auswirkungen von FPV-Abdeckungen auf die Flora und Fauna	37
3.4.1 Auswirkungen von FPV auf Fische	39
3.4.2 Auswirkungen von FPV auf Vögel.....	40
3.4.3 Aquavoltaik.....	41
3.5 Analysetool aus einem europäischen Nachbarland und Auswertung der Anwendungsbeispiele	43
3.6 Übersicht der potenziellen Reaktionen eines Standgewässers auf FPV	49
3.6.1 Gesellschaftliche Akzeptanz von FPV-Anlagen	50
3.6.2 FPV im Vergleich zu konventioneller Photovoltaik	52

4. Diskussion	55
4.1 Technologie der schwimmenden Photovoltaik Systeme	55
4.2 Welche Auswirkungen hat eine FPV-Anlage auf den Wasserkörper?	56
4.3 Welche Auswirkungen kann eine FPV-Anlage auf das Ökosystem See und die lebenden Organismen haben?	58
4.4 Diskussion des Analysetools „Zon op Water“	60
4.5 Vorteile & Nachteile von FPV-Anlagen im Vergleich zu konventionellen PV-Anlagen	62
5. Fazit	64
Danksagung	66
Literaturverzeichnis	67
Anhang	XII

Stichwortverzeichnis

APV	Agri-Photovoltaik (Agrar)
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EG	Europäische Gemeinschaft
FPV	Floating Photovoltaic (Schwimmende Photovoltaik)
LBPV	Land-based-Photovoltaik (Freiflächen-Photovoltaik)
LK	Landkreis
MEPCM	Microencapsulated phase change material (Mikroverkapselt)
PV	Photovoltaik
TPI	Gesamtmenge der photosynthetischen Pigmente
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
WRRL	Wasserrahmenrichtlinie

Einheiten:

CO₂/kg	Kohlenstoffdioxid-Äquivalente pro Kilogramm
ha	Hektar
J/m²	Joule pro Quadratmeter (Wärmedichte)
K	Kelvin
KW/MW/GW/TW - h	Kilowatt / Megawatt / Gigawatt / Terawatt - Stunden
kWh/m²/a	Kilowattstunden (kWh) pro Quadratmeter (m ²) und Jahr (a)
m; km	Meter; Kilometer
m²; km²	Quadratmeter; Quadratkilometer
mg; µg /L	Milligramm pro Liter; Mikrogramm pro Liter
Mikro	µ 10 ⁻⁶
mol	Mol (Einheit der Stoffmenge)
W/m²	Watt pro Quadratmeter

Wp Watt peak (Spitze)

Materialien von Photovoltaikmodulen:

CdS/CdTe Cadmiumsulfid / Cadmiumtellurid

CIS/CIGS Kupfer-Indium-Selen / Kupfer-Indium-Gallium-Selenid

c-Si Kristallines Silizium

α -/ μ - Si Amorphes-/mikrokristallines Silizium

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Übersicht der Strukturtypen von FPV-Systemen unterteilt nach ihren technischen Aspekten nach Liu et al. (2018); Oliveira-Pinto & Stokkermans (2020); Dörenkämper et al. (2021).	13
Tab. 2: Übersicht einiger Szenarien (Sz.) für ökologische Auswirkungen von FPV in eigener Darstellung nach den Simulationen von Exley et al. (2021 a).	25
Tab. 3: Auflistung der Indikatoren des Analyse-Tools 'Zun op Water' mit dazugehörigen Einheiten (Wortelboer et al. 2018).	44

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Auswahl von FPV-Anlagen der Strukturtypen 1, 2 & 4.	16
Abb. 2: Auswahl von FPV-Schwimmkörpern und technischen Zeichnungen unterschiedlicher FPV-Grundkonstruktionen.	17
Abb. 3: Bifacial Photovoltaik-Module „Lumina“ von der Firma BISOL mit transparenten Bereichen zwischen den Solarzellen, nach Herstellerinformationen beträgt der transparente Bereich mindestens 30 % (BISOL Group 2022).	19
Abb. 4: Auswirkungen von FPV-induzierten Änderungen der Windgeschwindigkeit und der Sonneneinstrahlung auf die thermische Struktur des Sees als eindimensionales Modell (Exley et al. 2021 a modifiziert).	28
Abb. 5 Analyse-Tool `Zon op Water´ (`Sonne auf Wasser´) von Loos & Wortelboer (2018) basierend auf Microsoft Excel mit den Ergebnissen des ersten Anwendungsbeispiels (übersetzt aus dem Niederländischen).	45
Abb. 6: Analyse-Tool `Zon op Water´ (`Sonne auf Wasser´) von Loos & Wortelboer (2018) basierend auf Microsoft Excel mit den Ergebnissen des dritten Anwendungsbeispiels mit einem eutrophen Nährstoffstatus und einer Lichtdurchlässigkeit des PV-Systems von 25 % (übersetzt aus dem Niederländischen).	48
Abb. 7: Die Auswirkungen der Bedeckung eines FPV-Systems auf den Wasserkörper im direkten Vergleich zu einem unbedeckten Wasserkörper nach den Erkenntnissen dieser Bachelorarbeit (eigene Darstellung).	49

Zusammenfassung

Weltweit und auch in europäischen Nachbarländern wurden bereits große "Floating Photovoltaik"-Anlagen (FPV) in Betrieb genommen. Nun hat auch Deutschland für das Jahr 2023 einen beschleunigten Ausbau der erneuerbaren Energien mit einem überarbeiteten Erneuerbare-Energien-Gesetz EEG beschlossen, worunter der Einsatz von FPV auf künstlichen Oberflächengewässern fällt. Bisher sind die Auswirkungen und das Ausmaß der Veränderungen von FPV auf die thermische Struktur eines Wasserkörpers, auf die Ökosystemleistungen eines Standgewässers und die darin lebenden Arten, sowie die tatsächliche Leistungssteigerung gegenüber konventionellen PV-Systemen an Land (LBPV) noch unzureichend erforscht. In dieser Arbeit wurde der aktuelle wissenschaftliche Stand des Wissens zu den Auswirkungen von FPV auf Seenökosysteme zusammengetragen und in Form eines Reviews zusammengefasst. Zudem wurde ein niederländisches Analysetool (Zon op Water) zu den ökologischen Auswirkungen von FPV auf ein Anwendungsbeispiel eines durchschnittlichen niedersächsischen Baggersees angewandt. Die Leistungssteigerung von FPV-Systemen im Vergleich zu LBPV-Systemen lag im Bereich von 0,31 % - 6 %, je nach Wärmeverlustkoeffizienten des FPV-Systems aufgrund der Art seiner Konstruktion und des geografischen Standorts. Basierend auf bestehenden FPV-Anlagen in Deutschland beträgt die jährliche Energieproduktion pro Hektar rund 1,3 GWh. Eine künstliche Oberflächenabdeckung von Seen, wie ein FPV-System, ist in der Lage, die Verdunstung eines Gewässers signifikant zu reduzieren und damit Wasserreserven zu erhalten. Zudem senken FPV-Systeme die Wassertemperatur, verflachen die Durchmischungstiefe und verringern die Stabilität der Schichtung und den Schichtungszeitraum, wobei die Auswirkungen mit zunehmendem Umfang der Bedeckung zunehmen. Ein passend gewählter Bedeckungsgrad kann dabei theoretisch die thermisch bedingten Gewässerveränderungen durch den anthropogen verursachten Klimawandel ausgleichen. In erster Linie beeinflusst durch die Blockierung des Sonnenlichts und Veränderungen der Temperatur unterhalb des FPV-Systems, verringert sich das Wachstum von Makrophyten und Phytoplankton mit der möglichen Folge einer geringeren Sauerstoffkonzentration in der Wassersäule. Es gibt bisher nur wenige empirische Studien, die sich mit den Auswirkungen von FPV-Anlagen auf die Biologie und die Organismen im See befassen haben. Es wird von einer potenziellen Verringerung der Wachstumsraten aller Wasserlebewesen ausgegangen und häufigere hypoxische Bedingungen könnten zu einem Fischsterben führen, da der Sauerstoff während der Schichtung, insbesondere in Bodennähe, schnell verbraucht wird. In einem eutrophen See kann ein großes FPV-System (> 30 - 40 %) Algenblüten verhindern und so der Eutrophierung entgegenwirken. Allerdings könnten hohe FPV-Bedeckungen (> 50 %) starke Temperaturveränderungen und weitreichende Änderungen des Schichtungszeitpunkts mit sich bringen. In einem oligotrophen See hingegen könnte sich die lokal verringerte

photosynthetische Aktivität negativ auf die Wasserlebewesen auswirken, indem sie die Zusammensetzung der Phytoplanktongemeinschaften verändert. Des Weiteren können sich Änderungen der Wassertemperatur auf die Abundanz und die Artenzusammensetzung des Zooplanktons auswirken, was sich möglicherweise auf die Nahrungskette auswirkt. Zusammenfassend wird in vielen Studien davon abgeraten, große Teile der Wasseroberfläche, d. h. mehr als die Hälfte, mit FPV zu bedecken, wenn die aquatischen Eigenschaften nicht nachteilig verändert werden sollen. In empirischen Studien konnten diese negativen Auswirkungen bisher jedoch nicht oder nur in geringen Ausprägungen nachgewiesen werden. Die schwimmende Infrastruktur kann zudem potenziell einen geschützten Lebensraum darstellen und die Einflüsse auf die Mortalität von Vögeln sind gering. Das niederländische Analysetool zeigte trotz des „worst case“- Ansatzes mit einer Installation im Uferbereich und einer FPV-Abdeckung von 25 % nur geringfügige Auswirkungen auf die durchschnittlichen Wassertemperaturen, den Sauerstoffgehalt und die Chlorophyll-Konzentrationen. Nach Aussagen der Softwareentwickler wären diese Effekte im Freiwasserbereich des Gewässers weitestgehend vernachlässigbar. In Anbetracht des potenziell signifikanten Einflusses von FPV auf den Wärmehaushalt, die Wasserqualität und die Nahrungskette eines Sees sollten große FPV-Anlagen (> 30 %) vermieden werden. Bei kleineren Anlagen mit maximal 15 % Abdeckung der Seenoberfläche kann hingegen von vergleichsweise geringen Effekten auf die Gewässerökologie ausgegangen werden. Eine individuelle Betrachtung der Seenmorphologie, des Nährstoffzustands und der ökologischen Ausprägung der Gewässer ist dennoch zwingend erforderlich, da künstliche Standgewässer sehr unterschiedlich ausgeprägt sein können und die Wirkung von FPV-Systemen daher nicht pauschal vorhersagbar ist.

Abstract

Large floating photovoltaic (FPV) systems have already been put into operation worldwide and in neighbouring European countries. Now Germany has also decided to accelerate the expansion of renewable energies with a revised Renewable Energy Sources Act (EEG) for 2023, which includes the use of FPV on artificial surface waters. So far, the effects and the extent of changes of FPV on the thermal structure of a water body, on the ecosystem services of a standing water and the species living in it, as well as the actual increase in performance compared to conventional PV systems on land (LBPV) are still insufficiently researched. In this work, the current scientific state of knowledge on the effects of FPV on lake ecosystems was compiled and summarised in the form of a review. In addition, a Dutch analysis tool (Zon op Water) on the ecological impacts of FPV was applied to an application example of an average

quarry pond in Lower Saxony. The performance increase of FPV systems compared to LBPV systems was in the range of 0.31% - 6%, depending on the heat loss coefficients of the FPV system due to the nature of its construction and geographical location. Based on existing FPV systems in Germany, the annual energy production per hectare is around 1.3 GWh. An artificial surface cover of lakes, such as an FPV system, is able to significantly reduce the evaporation of a water body and thus preserve water reserves. In addition, FPV systems lower water temperature, flatten mixing depths and reduce stratification stability and stratification period, with the effects increasing as the amount of cover increases. A suitably selected degree of cover can thereby theoretically compensate for the thermally induced water body changes caused by anthropogenic climate change. Primarily influenced by the blocking of sunlight and changes in temperature below the FPV system, the growth of macrophytes and phytoplankton is reduced with the possible consequence of a lower oxygen concentration in the water column. There are few empirical studies to date that have looked at the effects of FPV systems on the biology and organisms in the lake. Potential reductions in growth rates of all aquatic organisms are assumed and more frequent hypoxic conditions could lead to fish kills as oxygen is rapidly depleted during stratification, especially near the bottom. In a eutrophic lake, a large FPV system (> 30 - 40 %) can prevent algal blooms and thus counteract eutrophication. However, high FPV cover (> 50 %) could bring strong temperature changes and widespread changes in stratification timing. In an oligotrophic lake, on the other hand, locally reduced photosynthetic activity could have a negative impact on aquatic life by changing the composition of phytoplankton communities. Furthermore, changes in water temperature may affect the abundance and species composition of zooplankton, potentially impacting the food chain. In summary, many studies advise against covering large parts of the water surface, i.e. more than half, with FPV if aquatic characteristics are not to be adversely changed. However, empirical studies have so far not been able to demonstrate these negative effects, or only to a minor extent. The floating infrastructure can also potentially provide protected habitat and the influences on bird mortality are low. The Dutch analysis tool showed only minor impacts on average water temperatures, oxygen levels and chlorophyll concentrations despite the "worst case" approach with an installation in the lake-shore area and an FPV coverage of 25%. According to the software developers, these effects would be largely negligible in the open water area of the water body. Considering the potentially significant impact of FPV on the heat balance, water quality and food chain of a lake, large FPV installations (> 30 %) should be avoided. Smaller installations with a maximum of 15 % coverage of the lake surface, on the other hand, can be assumed to have comparatively little effect on the aquatic ecology. Nevertheless, an individual consideration of the lake morphology, the nutrient status and the ecological characteristics of the water bodies is imperative, as artificial standing waters can have very

different characteristics and the effect of FPV systems cannot therefore be predicted across the board.

1. Einleitung

Der Mensch ist unter anderem durch die Verbrennung von fossilen Brennstoffen und die Abholzung der Wälder für den starken Anstieg von klimawirksamen Gasen wie Kohlenstoffdioxid (CO₂) verantwortlich, die nachweislich das Klimasystem der Erde beeinflussen und zu einer Erwärmung des globalen Klimas geführt haben (Rahmstorf & Schellnhuber 2018). Im Rahmen der 21. Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (COP) im Jahr 2015 wurde das Pariser Abkommen beschlossen, mit dem umfangreichen Ziel, den Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur auf 1,5 °C im Vergleich zur vorindustriellen Zeit zu begrenzen (Graichen et al. 2016; Allen et al. 2018). Diese Herausforderung soll bewältigt werden, in dem zuerst die Emissionen sinken und danach eine Treibhausgasneutralität erreicht wird (Rahmstorf & Schellnhuber 2018). Im Jahr 2021, nach drei Jahren Einigungsprozess, trat in der Europäischen Union nach der Verordnung EG (401/2009) schließlich das Europäische Klimagesetz (EU 2018/1999) in Kraft (COD 2021). Das neue Unions-Klimagesetz schreibt allen Mitgliedstaaten vor, die Treibhausgasemissionen nach Artikel 2 bis spätestens 2050 auf netto null zu reduzieren und eine Klimaneutralität zu erreichen (Haahr et al. 2021). Zudem wird die Emissionsreduktion bis 2030 von 40 % auf mindestens 55 % gegenüber den Werten von 1990 erhöht.

Im Jahr 2021 wurden bereits 41,1 % (233,6 TWh) des gesamten deutschen inländischen Brutto-Stromverbrauchs von rund 565 TWh, inklusive Stromhandelssaldo, durch erneuerbare Energien erzeugt (AGEE-Stat 2022; Icha et al. 2022). Davon bildeten Windenergie an Land und auf See mit einem Anteil von insgesamt 48,7 %, Photovoltaik mit 21,4 %, Biogas mit 12,2 % und Wasserkraft mit 8,2 % die größten Posten der erneuerbaren Energien. Nach AGEB Energiebilanzen (2022) waren fossile Brennstoffe wie Braunkohle mit 18,8 %, Steinkohle mit 9,3 %, Erdgas mit 15 % und weitere Energieträger wie die Kernenergie mit 11,8 % an der gesamten Bruttostromerzeugung 2021 beteiligt. Am 7. Juli 2022 wurde vom Deutschen Bundestag ein Gesetz für einen beschleunigten Ausbau der erneuerbaren Energien beschlossen (Plenarprotokoll 20/47 2022). Die Bundesrepublik Deutschland soll nach diesem Beschluss bis 2035 annähernd treibhausgasneutral werden und in Anbetracht der aktuellen geopolitischen Krise in Europa eine ökonomische Stabilität und eine zukunftsorientierte Energiesouveränität aufbauen (Drucksache 20/1630 2022). Damit verbunden ist eine umfangreiche Überarbeitung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG), sodass nun die Stromversorgung bereits im Jahr 2030 mit mindestens 80 % des Bruttostromverbrauchs aus erneuerbaren Energien bestehen soll. Für den Ausbau von Solarenergie bedeutet das ab dem 1. Januar 2023 bis zum Jahr 2030 ein jährliches Wachstum von 22 GW bis auf eine Gesamtleistung von 215 GW an neuen Solarinstallationen in Deutschland. Im Jahr 2021 übertraf die photovoltaische

Gesamtleistung von 58.728 MW, bzw. 58,7 GW, verteilt auf über 2,2 Mio. Anlagen, erstmals die installierte Leistung der Windenergieanlagen an Land (AGEE-Stat 2022). Der Ausbau erneuerbarer Energien trägt wesentlich zur Erreichung der Klimaschutzziele bei, dennoch bleibt der Ausbau der Solarenergie mit 9 % gegenüber dem Vorjahr deutlich hinter den definierten Zielen zurück (AGEE-Stat 2022). Prognosen der globalen Energieentwicklung sagen voraus, dass der Anteil der benötigten Elektrizität im Endverbrauch im Jahr 2022 von ~ 20 % auf 40 % im Jahr 2050 steigen wird und sich somit verdoppelt (McKinsey 2022). Der steigende Anteil von erneuerbaren Energieträgern und die Nutzung von Wasserstoff wird den Szenarien zufolge den Verbrauch fossiler Brennstoffe ausgleichen, der 2050 weltweit um 40 % niedriger sein könnte. Es ist davon auszugehen, dass der Nettostromverbrauch in Deutschland für 2050, unter Berücksichtigung der E-Mobilität und Netzverlusten, in einer Größenordnung von 620 TWh liegen wird (Fraunhofer IWES 2015). Der damit verbundene, kontinuierlich steigende Energiebedarf kann mit regenerativer Energie voraussichtlich nur gedeckt werden, wenn jeweils 130 GW an Windkraft- und Photovoltaikleistung installiert werden. Anhand der Prognose würde dies im Jahr 2050 einem Anteil von 80 % des gesamten Stromverbrauchs entsprechen.

Die nachhaltige Energieerzeugung mit Solar könnte ein Schlüssel sein, den Rückgang der fossilen Brennstoffe hin zu erneuerbaren Energien zu bewältigen (de Lima et al. 2021). Die Solarenergie gilt bereits seit einigen Jahren als eine der vielversprechendsten Alternativen zu fossilen Brennstoffen und als eine attraktive Option zur Eindämmung des Klimawandels (Hernandez et al. 2014). Unter den erneuerbaren Energien, einschließlich Wind, Wasserkraft und Biomasse, erzeugen Photovoltaik-Energiesysteme die größte Strommenge pro Fläche (Fthenakis & Kim 2009). Die eindeutigen Vorteile solcher Energiesysteme, wie Nutzung der Sonne als erneuerbare Energiequelle für Wärme und Elektrizität, die Effizienz der Flächennutzung, sowie die Verringerung der Umweltverschmutzung durch fossile Brennstoffe, können noch zusätzlich ergänzt werden (Turney & Fthenakis 2011). Die Landfläche als Ressource für Wohnraum oder wirtschaftliche Zwecke, inklusive Energieerzeugung, ist allerdings limitiert. Nach Angaben des Statistischen Bundesamtes sind die Kernnutzungen in Deutschland: Siedlungsflächen (9,4 %), Verkehrsflächen (5,1 %), Wasserflächen (2,3 %) und Vegetationsflächen (83,2 %), wovon mehr als die Hälfte landwirtschaftlich genutzt wird (Turney & Fthenakis 2011; Destatis 2022). Die Nachfrage nach nachhaltiger Energie und der wachsende urbane Raum erfordern umweltschonende Lösungen, die sowohl die Menschen mit Energie versorgen und gleichzeitig keine große CO₂-Belastung darstellen (Turney & Fthenakis 2011), dabei aber nicht zu viel Fläche verbrauchen.

Als zentraler Bestandteil des Europäischen Green Deals und der EU-Biodiversitätsstrategie soll die biologische Vielfalt in Europa geschützt werden, indem 30 % der Land- und Meeresflächen der EU bis 2030 unter Naturschutz gestellt werden (EU-Kommission, Generaldirektion ENV 2022). Die Möglichkeit, herkömmliche terrestrische Photovoltaik-Anlagen auf

degradierten Flächen oder als schwimmende Anlagen auf Gewässern wie Stauseen oder Baggerseen zu installieren, könnte eine Lösung für die Konflikte in der Landnutzung und den stark steigenden Ausbau der erneuerbaren Energien sein (Turney & Fthenakis 2011; Haas et al. 2020). In Verbindung mit neuartiger effizienter Architektur und Design von Photovoltaik-Paneelen können Wasser- und Landressourcen geschont und der Umschwung auf eine umweltschonende Energieversorgung bewältigt werden (Armstrong et al. 2020; Ziar et al. 2020). Schwimmendes Bauen ist eine wirksame Klimaanpassungsmaßnahme im Bauwesen, da sich die Strukturen an den Wasserstand anpassen, sich mitbewegen und eine Mehrfachnutzung des Raums ermöglichen (Haas et al. 2020; de Lima et al. 2022). Die Strukturen sind flexibel, versetzbar und können mit Wasserkraftwerken, Reservoirs oder anderer Infrastruktur kombiniert werden, um Wasser besser zu speichern und gleichzeitig Energie zu erzeugen.

Der Status von schwimmenden Solaranlagen auch "Floating Photovoltaik" (FPV) oder kurz "Floatovoltaik" wird mit dem Erneuerbare-Energien-Gesetz 2023 von bisherigen Innovationsausschreibungen zu den Freiflächenausschreibungen des ersten Segments nach § 28a EEG 2023 abgeändert, mit dem Ziel, den Bau derartiger Anlagen zuzulassen, wenn die Anforderungen nach dem Wasserhaushaltsgesetz (WHG) für FPV-Anlagen erfüllt werden (Armstrong et al. 2020; Drucksache 20/1630 2022). Da die gewässerökologischen Auswirkungen von Floating-Photovoltaik derzeit noch weitgehend unbekannt sind, dürfen nach § 36 Absatz 3 WHG keine natürlichen, höherwertigen Gewässer bebaut werden. Somit sind Naturschutzgebiete und Nationalparks weitestgehend ausgenommen. Daher ist die Installation und der Betrieb nach § 36 Absatz 3 (Nr. 1, 3, 4 & 5) WHG zumeist auf künstliche und erheblich veränderte Gewässer, einschließlich kleinerer Gewässer wie Baggerseen, Tagebauseen oder sonstige angelegte Seen oder Häfen, die nicht im Rahmen der Bewirtschaftungsplanung kartenmäßig ausgewiesen worden sind, begrenzt. Nach § 36 Absatz 3 Nr. 2 a WHG darf die Größe einer FPV-Anlage auf künstlichen und erheblich veränderten Gewässern nur 15 % der Gewässerfläche betragen. Auch die Uferbereiche sollen nach § 36 Absatz 3 Nr. 2 b geschützt werden, weswegen ein Mindestabstand der FPV von 40 m zum Ufer eingehalten werden muss (Drucksache 20/2656 2022). Eine Liberalisierung des Mindestabstandes zum Ufer und der maximalen Flächen einer FPV-Anlage wurde von der Bundesregierung am 20. Mai 2022 abgelehnt (Drucksache 20/1979 2022).

Weltweit haben die Installation und der Einsatz von FPV auf Oberflächengewässern erheblich zugenommen (WorldBank Group et al. 2019). Der Marktbericht des Solarenergie-Forschungsinstituts in Singapur berichtet von einer internationalen Zunahme an FPV-Systemen von 10 MW bis auf 1,1 Gigawatt (GW) zwischen Ende 2014 - September 2018. Laut dieser Studie lag das Gesamtpotenzial der schwimmenden Solarenergie bei einer Flächenausnutzung eines Prozents bei schätzungsweise 400 GW weltweit. Die vermutete Energieerzeugung von FPV auf künstlichen Wasserreservoirs liegt bei einer Oberflächenabdeckung von 5 % bereits

bei 2022 GW und steigt bei 10 % Flächenabdeckung auf 4044 GW Nennleistung. Im Jahr 2018 erreichte die weltweite Gesamtkapazität der Photovoltaik-Anlagen inklusive schwimmender Photovoltaik einen Ertrag von 512 GW und im Jahr 2020 bereits 677 GW (Yousuf et al. 2020). Das Wachstum der Solarenergie wird bis zum Jahr 2025 voraussichtlich um weitere 485,4 GW auf einen Wert von 1162 GW ansteigen, damit würden 31.2 % des weltweiten zukünftigen Energiebedarfs durch Solarenergie gedeckt werden. Das erste kommerzielle FPV-System wurde 2007 in Napa Valley in den USA installiert. Primäres Ziel war es dort allerdings, die Wasserverdunstung des lokalen Wasserreservoirs zu verringern. Danach folgten die ersten FPV-Installationen in Japan, Frankreich, Italien, Spanien, Südkorea und weitere Anlagen in den USA. Die Größe, Anzahl und Leistungsfähigkeit der FPV-Systeme nahm mit den Jahren zu (Vo et al. 2021). Der größte Markt für FPV befindet sich momentan in China, gefolgt von Australien, Brasilien, Kanada und Frankreich (WorldBank Group et al. 2019). Länder wie Indien haben sich das Ziel gesetzt, mit einer umfangreichen Aufrüstung schwimmender Solarenergie bis zum Jahr 2022 eine Kapazität von 100 GW zu erreichen und dadurch die begrenzten Wasserquellen des Landes zu erhalten, sodass neben der Stromerzeugung vor allem auch eine Verdunstungsverringerung im Kontext der FPV-Installation angestrebt wird (Sahu et al. 2016).

Das Fraunhofer Institut schätzt das technische Potenzial für schwimmende PV auf künstlichen Seen in Deutschland, welches bereits grundlegende technische Randbedingungen berücksichtigt, auf 44 GWp (Wirth 2022). Der Modulwirkungsgrad wird unter genormten Standardtestbedingungen (STC) als "peak" kurz „p“ angegeben, der idealisierten Leistung bei einer senkrechten Einstrahlung von 1000 W/m² und bei einer Temperatur von 25 °C (Wesselak & Voswinckel 2016; Wirth 2022). Das bisher größte FPV-System in Deutschland wurde 2022 auf dem Silbersee III am Standort Haltern in Nordrhein-Westfalen im Landkreis Recklinghausen vollständig in Betrieb genommen (Diermann & Enkhart 2022). Die Anlage besteht aus 5.800 Photovoltaikmodulen auf einer Fläche von knapp 1,8 Hektar mit einer Leistung von 3 MWp und einer jährlichen Stromproduktion von 3 GW. Nach eigenen Angaben des Herstellers BayWa r.e. wurden bei dieser FPV-Anlage Glas-Glas Module mit hoher Lichtdurchlässigkeit und Abständen zwischen den Modulen verwendet, die nur "geringe" Umweltauswirkungen auf das Gewässer versprechen (Kempf 2021). Dabei beruft sich der Hersteller auf unabhängige Studien, wie die aktuelle Evaluation ökologischer Auswirkungen von FPV auf einen Baggersee in den Niederlanden mit einer Ausprägung von 18,25 ha, was einem Solarbedeckungsgrad von etwa 30 % entspricht (De Lima et al. 2021).

Aufgrund der neuen Gesetzeslage und der Energiewende in Deutschland ist davon auszugehen, dass in den nächsten Jahren die Anzahl der künstlichen Gewässer, die mit einer FPV-Anlage belegt werden, stark zunimmt. Es besteht ein dringender Bedarf an weiteren Daten über die Art, Anzahl und Größe der vorhandenen Stillgewässer, die für solche Anlagen nach

den gesetzlichen Vorgaben infrage kommen und es besteht ein dringender Bedarf an weiteren Erkenntnissen über die Auswirkungen von FPV auf den ökologischen Gewässerzustand. Erstmals konnten sämtliche Standgewässer im Bundesland Niedersachsen erfasst werden (Nikolaus et al. 2020). Es zeigte sich das künstlich geschaffene kleine Baggerseen der dominierende Gewässertyp in der Region sind. Solche Studien sind ein gutes Beispiel, um das Verständnis und die Bewertung der Eigenschaften von Wasserkörpern in der Zukunft zu verbessern und die potenziell nutzbare Wasserfläche für FPV zu erfassen. Nach der Wasserrahmenrichtlinie WRRL müssen auch künstliche oder erheblich veränderte Wasserkörper ein gutes ökologisches Potenzial besitzen und in einem guten chemischen Zustand sein, dies gilt allerdings nach der Oberflächengewässerverordnung OGewV § 3 Satz 1 Anlage 1 nur für Seen mit einer Oberfläche von > 50 ha oder größer, andernfalls findet kein Monitoring statt (Stockhaus et al. 2021). Dieses Ziel wird in Deutschland als Verbesserungsgebot bezeichnet und ist im Wasserhaushaltsgesetz WHG § 27 Abs. 1 & 2 verankert und schreibt einen guten Gewässerzustand vor. Ebenfalls besteht nach WRRL Art. 4 Abs. 1 ein Verschlechterungsverbot des ökologischen Zustands von Oberflächengewässern, damit wird die Qualität von Struktur und Funktionsfähigkeit des aquatischen Ökosystems festgelegt.

Ziel dieser Bachelorarbeit war es, durch eine umfangreiche Literaturrecherche den aktuellen Stand der Forschung zu den potenziellen Veränderungen im Ökosystem See durch FPV "Floating Photovoltaik" zu identifizieren, die technischen Möglichkeiten dieser schwimmenden Systeme zusammenzufassen und die möglichen ökologischen Auswirkungen auf die Gewässer in Deutschland und den europäischen Nachbarländern zu beschreiben.

Die konkreten Forschungsfragen dieser Arbeit lauteten:

1. Welche Auswirkungen hat eine FPV-Anlage auf den Wasserkörper?
2. Welche Auswirkungen kann eine FPV-Anlage auf das Ökosystem See und die lebenden Organismen haben?
3. Welche Vorteile und Nachteile hat eine FPV-Anlage im Vergleich zu terrestrischen Anlagen in Bezug auf die technischen Aspekte, ökologischen Auswirkungen und die Nachhaltigkeit?

In dieser Arbeit wurden sowohl die Vor- als auch die Nachteile eines solchen schwimmenden Systems aufgeführt und verglichen. Darüber hinaus wurde durch eine Literaturrecherche die Größe und Gestaltung einer FPV-Anlage dahingehend betrachtet, inwieweit sie die Ökologie des Gewässers beeinflusst, welche Stoffkreisläufe sich verändern könnten und wie sich das Gewässer unter einer FPV-Anlage verhält. In diesem Rahmen wurde auch ein Analysetool für FPV-Anlagen von einer niederländischen Behörde auf eine Fallstudie angewandt und zwei Fallbeispiele im Detail diskutiert.

2. Material und Methoden

2.1 Auswirkungen von FPV-Systemen auf das Ökosystem See – Recherche

Um die Auswirkungen von schwimmenden Photovoltaik-Anlagen auf den Wasserkörper und die darin lebenden Organismen zu verstehen, sowie eine Synthese der technischen und ökologischen Aspekte eines FPV-Systems im Vergleich zu konventionellen PV-Systemen zu ermöglichen, wurde eine umfassende Sichtung und Analyse der internationalen wissenschaftlichen Literatur durchgeführt. Die Literaturrecherche wurde unter Verwendung von peer-reviewed Publikationen als auch grauer, nicht begutachteter Literatur durchgeführt, darunter: veröffentlichte Studien begutachteter und anderer veröffentlichter Literatur, Pressemeldungen, Aufzeichnungen aus Konferenzen, Preprints von akademischen Schriften und unveröffentlichte Bachelor- und Masterarbeiten sowie Promotionsschriften.

Um sicherzustellen, dass alle relevanten Studien zu den Themen erfasst werden, wurden Suchbegriffe ("Search Keys/Keywords") systematisch gesammelt und anschließend in die Suchdatenbank "Google Scholar" und "Web of Science" eingegeben und sinnvoll kombiniert. Einzeln oder miteinander verbunden wurden folgende Begriffe verwendet: "Floating Photovoltaics/Solar-System oder Plants/Modules/Farms (FPV)" in Kombination mit "Potential", "Effects on Water Quality oder Ecosystem", "Electricity Generation", "System Efficiency; Energy Yield", "Water Savings", "Ecosystem Impacts", "Evaporation". Nachdem relevante Literatur zu den Funktionen von Gewässern, den Auswirkungen von FPV oder damit zusammenhängende veröffentlichte Untersuchungen von aquatischen Ökosystemen gefunden worden waren, wurde auch die jeweils zitierte Literatur gesichtet und die Suche um weitere geeignete Suchbegriffe bspw. "Algae Reduction", "Response to Climate Change", "Water Conservation", "Phytoplankton Diversity and Biomass" erweitert. Im Anhang befinden sich alle weiteren Suchbegriffe und Suchkriterien dieser Recherche (Anhang – Suchparameter). Darüber hinaus wurde der Themenbereich um die Auswirkungen künstlicher Infrastrukturen auf Gewässer, Veränderungen durch Beschattung oder Auswirkungen einer Abdeckung auf ein Gewässer erweitert, um genaue Schlussfolgerungen über die Auswirkungen einer künstlichen Abdeckung wie einer FPV-Anlage zu ziehen. Darüber hinaus wurde in dieser Arbeit eine Abschätzung der zu erwartenden Leistung von schwimmenden Photovoltaikanlagen auf der Basis von bereits installierten FPV-Anlagen in Deutschland und den mathematischen Gleichungen nach Mertens (2022) vorgenommen. Die Verwendung eines eigenständigen Analyse-tools auf ein Fallbeispiel und die Sichtung der Literaturverzeichnisse der gefundenen Studien ergaben weitere Erkenntnisse der potenziellen Veränderungen in Oberflächengewässern

durch eine FPV-Anlage. Schließlich wurden die Ergebnisse dieser Literaturrecherche zusammengefasst und kritisch diskutiert.

Um die Auswirkungen von Photovoltaik-Anlagen auf stehende Oberflächengewässer zu verstehen, wurden im Einzelnen ausschlaggebende Faktoren wie Globalstrahlung, Temperatur, Wind und Sauerstoffgehalt betrachtet. Diese Faktoren beeinflussen wiederum den gesamten Stoffhaushalt des Gewässers, mit Auswirkungen auf die Ökologie des Lebensraums Standgewässer (Schwoerbel & Brendelberger 2013).

2.2 Analysetool und Anwendungsbeispiel

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurde ein bisher einzigartiges und verwendbares Analysetool 'Zon op Water' von Loos & Wortelboer (2018) auf ein ausgewähltes Fallbeispiel angewendet. Es fand eine Einschätzung der möglichen negativen oder positiven Auswirkungen von FPV auf die Gewässereigenschaften (Indikatoren) des durchschnittlichen Beispielgewässers anhand des Handbuchs und der Tool-Beschreibungen von Loos & Wortelboer (2018) bei einem FPV-Abdeckungsgrad von 25 %, einem mesotrophen und eutrophen Nährstoffstatut statt.

Dieses eigenständige Tool auf Basis von Microsoft Excel bietet einem Benutzer einen Einblick in die quantitativen Auswirkungen von Sonnenkollektoren auf die Wasserqualität eines Standgewässers (Wortelboer et al. 2018, https://www.researchgate.net/publication/342475849_Analysetool_Zon_op_Water_11_Juli_2018). Aus den Eigenschaften des Gewässers wie den Dimensionen, der Tiefe, dem Bodentyp, sowie dem Nährstoffzustand und den Eigenschaften der FPV wie die Fläche der Abdeckung und die Lichtdurchlässigkeit lassen sich mit der Anwendung mehrere Indikatoren berechnen (Loos & Wortelboer 2018). Diese Anwendung soll den zuständigen Umweltbehörden in den Niederlanden als Entscheidungshilfe für neue FPV-Installation dienen, in dem ein sogenanntes "worst case" Szenario simuliert und potenzielle Veränderungen des Standgewässers durch ein Handbuch erklärt werden. Die Auswahl der Gewässereigenschaften und die PV-Eigenschaften des Analysetools sind in vorgegebenen Schritten eingeschränkt skalierbar. Somit können nur Standgewässern mit einer Größe von 1, 10, 100, 1000 oder 10000 ha und Wassertiefen von 2, 4, 10 oder 25 m gewählt werden. Der Nährstoffzustand kann als eine mesotrophe Situation (Stickstoffdeposition 1.400 mol/ha/Jahr und Phosphordeposition 1 mg/m²/Tag) und als eutrophe Situation (3.500 mol/ha/Jahr und 5 g/m²/Tag) eingestellt werden. Bei der Bodenart stehen Sand oder Torf zur Auswahl. Die Eigenschaften der PV-Systeme wurden so gewählt, dass eine Bedeckung des

Gewässers durch Photovoltaikmodule von 1, 10, 25, 50 oder 90 Prozent berechnet wird. Darüber hinaus beträgt die Lichtdurchlässigkeit des Systems wählbar 0, 10 oder 25 Prozent.

Nach dem neu beschlossenen Erneuerbare-Energien-Gesetz der Bundesregierung für 2023 und dem Wasserhaushaltsgesetz § 36 Absatz 3 (Nr. 1, 3, 4 & 5) sind die Installation und der Betrieb von Photovoltaik-Anlagen hierzulande auf künstliche und erheblich veränderte Gewässer beschränkt. Als Fallbeispiel wurden daher die Daten von insgesamt $N = 26$ niedersächsischen Baggerseen aus der Studie von Nikolaus et al. (2021) verwendet, um ein Beispielgewässer mit realistischen Eigenschaften fiktiv zu erstellen und die Wirkung von FPV auf dieses Gewässer zu analysieren

2.2.1 Anwendungsbeispiel Baggersee

Die beiden Anwendungsbeispiele orientierten sich an Daten von Nikolaus et al. (2021), die in ihrer Studie insgesamt 26 künstliche Baggerseen in Niedersachsen erforschten. Die untersuchten Gewässer waren im Durchschnitt, klein (Größe \pm SD = $6,5 \pm 5,2$ ha), flach (Tiefe = $9,6 \pm 5,2$ m) und mesotroph (Gesamtphosphor = $26,3 \pm 30,9$ $\mu\text{g/L}^{-1}$). Aus diesen Daten wurde der durchschnittliche Baggerseetypus in Norddeutschland errechnet und dieses Durchschnittsgewässer fiktiv als typischer Baggersee angenommen. Das Analysetool konnte jedoch nicht exakt auf das Fallbeispiel eines durchschnittlichen Baggersees aus der Studie von Nikolaus et al. (2021) eingestellt werden. Aus den Grundlageninformationen des verwendeten Modells des Analysetool geht hervor, dass es für kleine Seen mit einer maximalen Tiefe von 10 m und mit hohen PV-Deckungsgraden (25 % oder mehr) errechnet wurde (Wortelboer et al. 2018). Für große Seen wurde eine maximale Tiefe von mindestens 4 m und nur niedrige PV-Deckungsgrade (25 % oder weniger) errechnet. Deshalb wurde im Fallbeispiel und abweichend von den ermittelten Werten aus Nikolaus et al. (2021) von einer Seenfläche von 10 ha und einer Maximaltiefe von 10 m ausgegangen. Das erste Anwendungsbeispiel wurde auf folgende Eigenschaften eingestellt:

- Größe: **10 ha**
- Tiefe: **10 m**
- Nährstoffstatus: **mesotroph**
- Bodenart: **Sand**
- Bedeckung mit PV-Modulen: **25 %**
- Lichtdurchlässigkeit des PV-Systems: **25 %**

2. Anwendungsbeispiel: Wie 1. aber mit einem eutrophen Nährstoffstatus.

3. Ergebnisse

3.1 Technologieübersicht der schwimmenden Photovoltaik Systeme (FPV)

Die wasserbasierte Verwendung von Photovoltaik-Modulen, kurz FPV, basiert auf schwimmenden Plattformen aus Polyethylen, die sich mit elastischen Befestigungen an wechselnde Wasserstände anpassen können (Hernandez et al. 2014; Sahu et al. 2016). Es ist eine Kombination aus Anlagentechnik und Schwimmtechnologie, bestehend aus einem Ponton oder separaten Schwimmkörpern, einem Verankerungssystem, Solarmodulen und Kabeln. Ein FPV-System unterscheidet sich in seinem technischen Konzept der Elektrizitätserzeugung nicht von terrestrischen „land-based“, kurz LBPV, Freiflächen-Systemen. Die drei grundlegenden Materialien, die für den Bau einer solchen Anlage verwendet werden, sind hochdichter Polyethylen (HDPE), verzinkter Stahl, Aluminium und je nach Modell, Glas und Silikon (Rosa-Clot 2020; Ziar et al. 2020). Die Photovoltaik-Produktion ist zu 90 % auf Solarzellen aus kristallinem Silizium (c-Si) ausgelegt, die den Weltmarkt durch ihre hohe Effizienz und kostengünstige Herstellung anführen (Wesselak & Voswinckel 2016; Lee & Ebong 2017; Vo et al. 2021). Ein typisches PV-Modul hat einen Wirkungsgrad von 13 % - 20 %, so dass nur ein kleiner Teil der einfallenden Sonneneinstrahlung tatsächlich in Elektrizität und der Rest in Wärme umgewandelt wird (Armstrong & Hurley 2010; Rahman et al. 2015). Der Wirkungsgrad eines Moduls ist von der Art der Solarzellen, den klimatischen Bedingungen wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Staub abhängig (Rahman et al. 2015). Der nutzbare Anteil des Spektrums für eine Solarzelle befindet sich im Wellenlängenbereich von 300 nm bis 1100 nm (Mertens 2022). Die überschüssige Photonenenergie im gleichen Wellenlängenbereich wird an das Kristallgitter des Halbleiters abgegeben und zu Wärme, woraus ein Thermalisierungsverlust von 31,7 % entstehen kann. Photonen oberhalb von 1100 nm haben zu wenig Energie, um von einer Solarzelle absorbiert zu werden, wodurch sich Transmissionsverluste von 19,3 % ergeben. Der reale theoretische Wirkungsgrad einer idealen Silizium-Solarzelle, abzüglich der Übergangsverluste beim Stromfluss vom Halbleiter zu elektrischen Bauelementen, beträgt 28,6 (Mertens 2022). Eine kristalline Solarzelle unterscheidet man nach dem verwendeten Halbleitermaterial und anhand des Kristall- und Zellaufbaus (Wesselak & Voswinckel 2016). Der Unterschied von mono- oder polykristallinen Solarzellen besteht im Wesentlichen nur im Kristallisationsprozess von Silizium bei der Herstellung. Die Plattform Taiyang News, die hauptsächlich Artikel über Solarenergie publiziert, hat 2016 einen umfangreichen Bericht zu den marktführenden Firmen in der Solarzellen-Branche veröffentlicht (Chunduri & Schmela 2016). Demnach sind monokristalline oder polykristalline Solarzellen durch zusätzliche Be-

schichtungen, die einfallende Strahlung reflektieren und absorbieren, nach Angabe der Hersteller auf einen Wirkungsgrad von 21 % - 24 % optimiert worden (Chunduri & Schmela 2016). Weitere gängige Module sind bifacial Paneele, welche das reflektierte Licht vom Boden auf der Rückseite auffangen und damit ihren Energieertrag um 10 % - 20 % erhöhen können (Chunduri & Schmela 2016; Ziar et al. 2020). Der Anteil der reflektierten globalen Strahlung von inländischen Wasserkörpern, auch Albedo-Wert genannt, beträgt durchschnittlich 5 % - 7 % und ist geringer als an Land ~ 15 % (Schwoerbel & Brendelberger 2013; Ziar et al. 2020). Bisher konnte aus diesem Grund bei FPV-Systemen keine Leistungssteigerung eines bifacial Modules gegenüber einem monofacial Moduls erreicht werden, außer es wurden zusätzlich Reflektoren verwendet (Liu et al. 2018; Ziar et al. 2020).

In der wissenschaftlichen Literatur wurde über einen besseren durchschnittlichen Wirkungsgrad von FPV-Systemen im Vergleich zu LBPV-Systemen berichtet (Sahu et al. 2016; Golroodbari & Van Sark 2020). Ein Solarmodul erhitzt sich bei voller Sonneneinstrahlung und erleidet einen deutlichen Leistungsverlust von ungefähr 5 % pro 10 K Temperaturerhöhung über die im STC angenommenen 25 °C (Mertens 2022). Wegen der Kühlung durch die Nähe oder dem Kontakt zum Wasser verringert sich allerdings die Betriebstemperatur und die Effizienz des Moduls wird gesteigert (Sahu et al. 2016; Liu et al. 2018; Kamuyu et al. 2018; Kjeldstad et al. 2021). Es konnten Effizienzsteigerungen von schwimmenden PV-Modulen um 10 % - 11 %, verglichen mit auf dem Land installierten Solarmodulen, festgestellt werden (Choi 2014; Choi et al. 2016). In den halbtrockenen Regionen Brasiliens wurde eine durchschnittliche Steigerung des Wirkungsgrads von 12,5 % im Vergleich zu herkömmlichen PV-Freiflächenmodulen erreicht (Sacramento et al. 2015). Allerdings wurde bei diesen Studien bisher kein Monitoring über einen langen Zeitraum durchgeführt (Choi 2014) oder es wurden FPV-Prototypen verwendet, mit neuen Materialien (Ho et al. 2015), mit Dünnschicht-Modulen auf der Wasseroberfläche (Sacramento et al. 2015), unter der Wasseroberfläche (Rosa-Clot & Tina 2018) oder FPV-Pilotanlagen mit Reflektoren (Ziar et al. 2020). In einer weiteren Studie in Norwegen wurde der Wirkungsgrad der Wasserkühlung durch den thermischen Kontakt eines PV-Moduls mit Wasser, anhand einer speziell dafür angepassten Technologie, bestehend aus einer schwimmenden Membran mit horizontal montierten PV-Modulen, bewertet (Kjeldstad et al. 2021). Darüber hinaus wurde ein thermisches Modell verwendet, das die Auswirkungen des Wärme-transportes vom Modul zum Wasser berücksichtigte, um die Modultemperatur einzuschätzen. Beim Vergleich eines Moduls in thermischem Kontakt mit Wasser gegenüber einem Modul mit Luftspalt zwischen dem Wasser und Modul, wurde festgestellt, dass der wassergekühlte Strang im Vergleich zum luftgekühlten Strang einen durchschnittlich 5 % - 7 % höheren Energieertrag aufwies. Ein Experiment in Italien über die Effizienzsteigerung eines PV-Panels bei gleichzeitiger Senkung der Betriebstemperatur durch passive Konvektionskühlung führte zu einer Erhöhung des Wirkungsgrads um durchschnittlich 2,7 % (absolut) und

etwa 17,22 % (relativ) (Majumder et al. 2021). Die Temperatur unter dem PV-Modul über Wasser sank im Durchschnitt um 2,7 °C im Vergleich zu den Referenzen. Studien, die sich mit der Leistung von schwimmenden FPV-Technologien beschäftigten wie Liu et al. (2018) und Kjeldstad et al. (2021) oder eine Analyse der verschiedenen Fallstudien durchführten wie Oliveira-Pinto & Stokkermans (2020) bestätigten die Annahme, dass einige FPV-Technologien eine Leistungssteigerung durch Kühlung bieten. Häufig wurden die FPV-Anlagen dabei nach ihrer Flächendeckungsdichte kategorisiert, definiert als der Anteil der Anlage, der mit dem Gewässer in Berührung kommt (Oliveira-Pinto & Stokkermans 2020; Dörenkämper et al. 2021). In aufsteigender Reihenfolge haben 'freistehende' oder 'offene' Anlagen auf Masten montiert, die geringste Deckungsdichte (Exley et al. 2021 b). Es folgten FPV-Anlagen mit 'kleiner Kontaktfläche' oder auch 'small footprint', dies sind mehrere PV-Paneele auf Gestellen montiert und von Schwimmern getragen. Sogenannte "large footprint" FPV-Anlagen sind Systeme, bei denen ein einzelnes PV-Paneel auf einem einzelnen Schwimmer montiert ist und die Wasseroberfläche teilweise blockiert wird. Bei durchgehenden Abdeckungen "insulated" und Membranen mit montierten PV-Paneeelen wird die gesamte Wasserfläche unterhalb der Anlage abgedeckt. Nach Dörenkämper et al. (2021) hat ein FPV-System, das unter den Modulen offener für Wind ist, einen höheren Wärmeverlustkoeffizienten, d. h. es hat eine bessere Kühlwirkung. Tatsächlich war der größte Teil des Kühleffekts auf die hohen Windgeschwindigkeiten über dem Wasser zurückzuführen; dies galt sowohl für Singapur als auch für die Niederlande (Dörenkämper et al. 2021). Die Unterschiede in der Ertragssteigerung sind also mit dem thermischen Verhalten der Technologie zu erklären. Ein direkter Vergleich der Photovoltaikanlagen auf dem Wasser für den Standort in den Niederlanden und Singapur ergab bessere durchschnittliche Wärmeverlustkoeffizienten als die Vergleichssysteme an Land. Ebenfalls ergab eine Felduntersuchung höhere durchschnittliche Wärmeverlustkoeffizienten für die FPV-Anlagen mit einer kleinen Kontaktfläche zum Wasser, einer relativ offenen Rahmenstruktur, im Vergleich zu den FPV-Anlagen mit einer großen Kontaktfläche und einer geschlossenen Struktur aus festen Pontons (Dörenkämper et al. 2021). Die Durchschnittstemperaturen der leistungsstärksten FPV-Systeme in den Niederlanden waren um 3,2 °C und in Singapur um 14,5 °C niedriger im Vergleich zu den land- oder dachgestützten Vergleichswerten. Basierend auf den gemessenen Temperaturen und den ermittelten Wärmeverlustkoeffizienten betrug die jährliche Ertragssteigerung durch den Kühleffekt von FPV-Systemen im Vergleich zu den PV-Referenzsystemen in den Niederlanden bis zu 3 % und bis zu 6 % in Singapur.

Neben der technischen Ausstattung und den Installationsdetails hängt die Leistung einer FPV-Anlage stark von ihrem jeweiligen Standort ab. Oliveira Pinto et al. (2020) führten Leistungsvergleiche an drei verschiedenen Standorten mit optimalen lokalen Einstellungen durch, darunter Brasilien, Großbritannien und Spanien. Bei der Leistungsermittlung wurden der Albedo-

Wert der Wasseroberfläche, Leistungsverluste durch Verschmutzung und erstmals die natürlichen Bewegungen der Anlage auf dem Wasser berücksichtigt, welche zu Teilverschattungen führten. Dieser "mismatch" zusammenschalteter Photovoltaikzellen kann zu Fehlanpassungen und damit zu elektrischen Leistungsverlusten der gesamten Anlage führen. Die Standorte mit höherer horizontaler Globalstrahlung bedeuten eine höhere Energieproduktion für die FPV-Systeme. Gleichzeitig sind die Umgebungstemperaturen in Ländern wie Spanien oder Brasilien wesentlich höher als in den gemäßigten Klimazonen im Vereinigten Königreich, somit steigen auch die Temperaturverluste der Solarmodule in warmen Regionen aufgrund des Kühleffekts des Wassers an, unabhängig von der Technologie. Mit der FPV-Technologie von Ciel et Terre (C&T) wurde ein Energiezuwachs von 0,31 % - 0,46 % und mit der leichteren Technologie von Solaris Synergy aus verzinktem Stahl eine Steigerung von 1,81 % - 2,59 % im Vergleich zu landgestützten PV-Modulsystemen erreicht (Oliveira Pinto et al. 2020). Die Ergebnisse zeigten, dass die Wirkung der Kühlung mit der Verringerung des Wärmeverlustfaktors (U-Wert) der FPV-Technologie weiter zunimmt, aber durch Konvektion um die Module herum begrenzt ist. Schon zu Beginn wurde von Oliveira Pinto et al. (2020) ein geringerer Anstieg der Energieproduktion durch die C&T-Technologie aufgrund des größeren Kontaktfläche "large footprint" erwartet.

Häufig wurde von FPV-Leistungssteigerungen von mehr als 10 % berichtet; im Kontrast zu diesen Werten stehen einige Studien, die eine deutlich geringere Effizienzsteigerung durch den Kühleffekt prognostizierten. Die Qualität der Module, der Systemkomponenten und des technischen Standards ist auch bei FPV-Systemen wichtig, um eine höhere Leistung gegenüber Photovoltaik-Systemen an Land garantieren zu können (Liu et al. 2018).

Das Ende der Lebensdauer von Photovoltaikmodulen wird im Allgemeinen dann erreicht, wenn ein Rückgang der Nennleistung auf 80 % gegeben ist (Wesselak et al. 2017). Demnach wird die Lebensdauergrenze bei einer Degradationsrate von 0,7 % nach 28 Jahren erreicht. Die Lebensdauer von FPV wurde von Won et al. (2016) auf Basis von periodischen Felduntersuchungen und einem Computermodell berechnet, dabei fiel die Leistung eines Moduls jährlich um 0,45 %. Die Nennleistung war unter simulierten Bedingungen nach 25 Jahren um 13,9 % gesunken. Starke Verwitterung von Metallstrukturen und Spannungs- und Mikrorisse in den Modulen durch Wind- und Wellenbelastungen könnten die Stromproduktion und die Haltbarkeit der FPV-Anlagen beeinträchtigen (Sahu et al. 2016; Oliveira-Pinto & Stokkermans 2020; Yousuf et al 2020). Die tatsächliche Lebensdauer von FPV muss in zukünftigen Untersuchungen weiter erforscht werden.

Es gibt eine Reihe von internationalen Herstellern, die sich auf erneuerbare Energien oder vollständig auf Solarenergie spezialisiert haben. Die Studien von Trapani & Santafé (2014) und Vo et al. (2021) geben eine Übersicht der verschiedenen Marken und Arten von FPV-

Anlagen, die von 2007 bis 2021 auf Gewässern weltweit installiert wurden. In der folgenden Tabelle (Tab. 1) gibt es einen Überblick der verschiedenen FPV-Systeme, die sich im Hinblick auf ihre Struktur in fünf verschiedene Typen unterteilen lassen.

Tab. 1: Übersicht der Strukturtypen von FPV-Systemen unterteilt nach ihren technischen Aspekten nach Liu et al. (2018); Oliveira-Pinto & Stokkermans (2020); Dörenkämper et al. (2021). Die Beschreibung der fünf Strukturtypen basiert auf Forschungsarbeiten, die sich mit dem technischen Design von FPV beschäftigen haben.

Nr.	Strukturtypen	Beschreibung der technischen Aspekte
1	Dünnschicht- oder Dünnschicht-Module (thin layer)	Diese Modultypen gelten als die zweite Generation der Photovoltaik-Technologie aus amorphem Silizium (α -Si), Kupfer-Indium-Gallium-Selenid (CIGS) oder Cadmiumtellurid (CdTe) (Lee & Ebong 2017). Im Jahr 2015 wurde eine Effizienz von 18,6% mit einem CdTe-Modul von der Firma First Solar erreicht und mit einer CIGS-Zelle von 21 %. Aufgrund des geringeren Gewichtes wird keine schwere Trägerstruktur benötigt (Wessellak et al. 2017; Golroodbari & Van Sark 2020).
2	Unterwasser-PV oder untergetauchte Photovoltaik	Eine Methode um Module konstant unter Wasser zu kühlen und in Kombination mit den positiven Lichtbrechungseffekten kann die Energieerzeugung um 12 % bis 15 % im Vergleich zu konventionellen "trockenen" Systemen erhöht werden (Rosa-Clot et al. 2018). Diese Effizienzsteigerung gilt für gemäßigten Klimazonen, kann mit Dünnschicht-Modulen kombiniert werden und führt in den Äquatorregionen zu einer weiteren Leistungssteigerung.
3	Einzelne Pontons, gekippte Arrays oder Gestelle mit mehreren Paneelen	Eine Struktur mit festem Winkel oder einem durch ein Nachführungssystem an den Sonnenstand anpassbaren Winkel. Die Schwimmkörper sind größer und starr konstruiert (Pringle et al. 2017). Die FPV-Systeme dieses Strukturtyps können sowohl eine kleine Kontaktfläche zum Wasser 'small footprint' mit großen Gestellen und mehreren Modulen als auch eine große Kontaktfläche 'large footprint' mit einem Ponton pro Modul haben. Ziar et al. (2020) konnten mit einem bifacial Modul mit Reflektoren und horizontalen Sonnenstand Tracking eine erhöhte Effizienz von 17,3 % gegenüber herkömmlichen monofacial LBPV-Systemen nachweisen. Allerdings sind diese Systeme wegen der Reflektoren aufwendiger zu konstruieren und anfälliger für Verschmutzung.

4	FPV-Anlagen auf großen Polyethylen (HDPE) Flößen oder Pontons	Eine große zusammenhängende schwimmende Struktur, welche die Wasserfläche fast vollständig abdeckt "insulated", mit geringer konvektiver Kühlleistung durch das Wasser, aber mit optimierten Eigenschaften zur Reduzierung der Wasserverdunstung (Farrar et al. 2022).
5	Pontons aus mikroverkapselten Phasenwechselmaterial MEPCM	Einen neuen Ansatz bieten Pontons oder Schichten aus mikroverkapselten Phasenwechselmaterial MEPCM (Golroodbari & Van Sark 2020). Das Material besitzt einzigartige positive Eigenschaften bei der Wärmediffusion, kann am Modul befestigt gleichzeitig den benötigten Auftrieb bringen und die Erwärmung des PV-Modules reduzieren, in dem es die latente Hitze des PV-Zelle aufnimmt und nur geringfügig wieder abgibt (Ho et al. 2015; Ho et al. 2016; Pringle et al. 2017).

Die folgenden Ergebnisse und Abbildungen bilden eine Auswahl von verschiedenen FPV-Anlagen und -Strukturtypen, die bereits erprobt oder in Betrieb genommen wurden. Eine Kombination der Strukturtypen 1 und 2, also eine untergetauchte Dünnschicht-Photovoltaikanlage, ist in der Abb. 1 (A) zu sehen. Ein Dünnschichtmodul verbraucht weniger Material und ist in der Lage, sich flexibel an die Bewegungen des Wassers anzupassen (Pringle et al. 2017). Da die Module direkt auf der Wasseroberfläche liegen oder untergetaucht sind, passen sie sich an die Umgebungstemperatur des Wassers an. Durch diese natürliche Kühlung kann der Wirkungsgrad bei einer Tiefe von 1 cm um 17,8 % steigen.

Der Strukturtyp 3 gilt als sehr robust und wurde seit 2010 bereits häufig auf Gewässern installiert (Sahu et al. 2016; Vo et al. 2021). In Abb. 1 (B) ist die momentan größte FPV-Anlage Deutschlands auf dem Silbersee III in Haltern (Bundesland) mit einer Leistung von 3,1 MWp zu sehen (Quarzwerte GmbH 2022). Die Grundkonstruktion der Floating-PV-Anlagen der Firma BayWa r.e ist in Abb. 2 (C) zu sehen und kam in der Anlage der Quarzwerte zum Einsatz. Diese modulare Solar-Boot-Struktur kann zum Strukturtyp 3 mit kleiner Kontaktfläche zum Wasser zugeteilt werden und besteht aus einer leichten und langlebigen Konstruktion, welche die Umweltauswirkungen durch Beschattung zusätzlich durch Glas-Glas-Module mit teilweise transparenten Zwischenräumen und kleinen Abständen zwischen den Booten minimieren soll (Kempf 2021). Die Abb. 1 (C) zeigt die größte europäische FPV-Anlage mit einer Leistung von 41,4 MWp in den Niederlanden, die von der Firma BayWa r.e. Solar Projects GmbH in Kooperation mit der Tochtergesellschaft GroenLeven 2021 fertiggestellt wurde (BayWa r.e. AG 2021). Das verwendete Design der Firma Ciel et Terre International vom Strukturtyp 3 ist in Abbildung 2 (A) zu sehen. Es ist eine deutlich leichtere Version mit kleinerer Kontaktfläche 'small footprint' als das Vorgängermodell 'Hydrelio Air' in Abb. 2 (B) (Sahu et al. 2016; Vo et al. 2021). Das ältere Design des Schwimmkörpers für FPV-Anlagen der Firma Ciel

et Terre 'Hydrelio Air' gilt als taifunsicher und kam auf den Teichen Nishihira und Higashihira in Kato City, Japan und weiteren Standorten zum Einsatz. In Abbildung 1 (D 1 & 2) ist eine FPV-Anlage des Strukturtyps 4 zu sehen, die Anlage ist sehr flach und dicht konstruiert und soll die Wasserverdunstung auf dem Alqueva-Stausee verringern und das naheliegende Hydro-kraftwerk mit der Stromerzeugung ergänzen (Rebelo 2021; EDP S.A. 2022). Der Strukturtyp 5 mit einer oder zwei MEPCM-Schichten auf einem PV-Modul wurde bisher nur in Simulationen erprobt (Ho et al. 2015; Ho et al. 2016). Eine fünf Zentimeter dicke Schicht konnte die höchste Oberflächentemperatur des unbehandelten PV-Moduls von 33,5 °C auf 31,9 °C senken und den mittleren Wirkungsgrad um 2,03 % gegenüber dem unbehandelten Modul steigern. Eine kostengünstige Alternative können flexible c-Si Photovoltaikmodule aus amorphem Silizium mit Polyethylen-Schaumstoff (PE) als Schwimmkörper sein (Hayibo et al. 2020). Diese Art von FPV-Systemen erzielte einen 3,5 % höheren Energieertrag als FPV-Systeme auf Pontonbasis und könnte die Wasserknappheit im Großraum Las Vegas in den USA durch Wassereinsparung beheben.

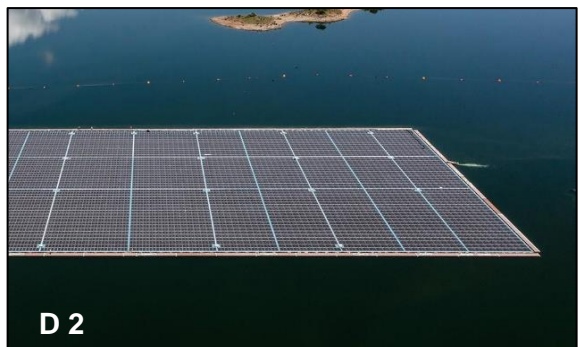


Abb. 1: Auswahl von FPV-Anlagen der Strukturtypen 1, 2 & 4. (A) Eine erste Realisierung einer untergetauchten Dünnschicht-Pilotanlage in einem kleinen Becken mit einer Leistung von 0,57 kWp (Rosa- Clot 2018). (B) FPV-Anlage in Deutschland, Haltern auf dem Silbersee III, eine Leistung von 3,1 MWp und eine Größe von 1,8 ha, das entspricht 2,3 % der Wasserfläche (Quarzwirke GmbH 2022 a). (C) FPV-Anlage in den Niederlanden, Seeligen auf dem Sellingerbeetse, mit 76.616 Paneelen (aus 535 W und 540 W Modulen), einer Leistung von 41,4 MWp, Inbetriebnahme Juli 2021 (BayWa r.e. AG 2021). (D 1 & 2) FPV-Anlage in Portugal auf dem Alqueva-Stausee, der EDP Gruppe Portugal mit einer Größe von 4 ha, 12.000 Paneele, eine Leistung von 4 MWp, Inbetriebnahme 15.06.2022 (EDP S.A. 2022).

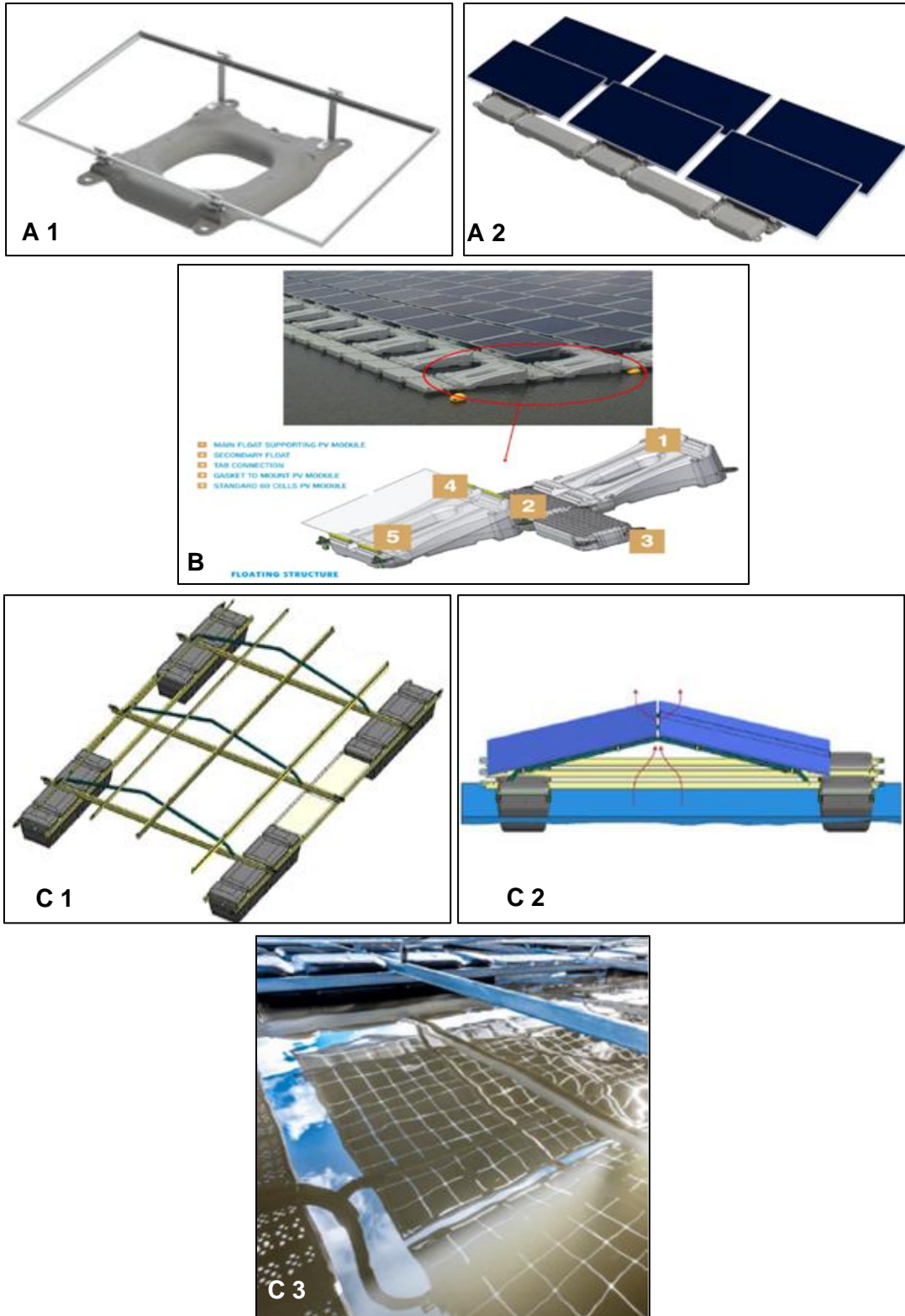


Abb. 2: Auswahl von FPV-Schwimmkörpern und technischen Zeichnungen unterschiedlicher FPV-Grundkonstruktionen. (A) Schwimmende Solartechnik Design von der Firma Ciel et Terre aus Frankreich: 1. Hauptschwimmkörper mit Rahmen für das Photovoltaikmodul; 2. Verbindende Schwimmmodule mit Gehweg (Ciel et Terre International 2022). (B) PV-Modul-Befestigungssystem der schwimmenden Baureihe Hydrelío Air von der französischen Firma Ciel et

Terre International: 1. Hauptschwimmkörper mit Rahmen für das Photovoltaikmodul; 2. Verbundene Schwimmmodule mit Gehweg (Sahu et al. 2016). (C) Modulare Solar-Boot-Struktur für Floating-PV-Anlagen von der deutschen Firma BayWa r.e: 1 Stahlrahmen mit Schwimmkörpern; 2. Seitenansicht der FPV-Module, kein Wärmestau durch Kamineffekt; 3 Ansicht von unten die vollständige FPV-Anlage von BayWa r.e. mit sichtbaren Lücken (Kempf 2021).

Selbst wenn die Abdeckung von Oberflächengewässern nur ein Prozent der Gesamtfläche eines Gewässers beträgt, müssen die Auswirkungen von solchen Anlagen auf die Wasserqualität, die gemeinschaftliche Nutzung, das Ökosystem und die davon abhängigen Organismen genau begutachtet werden. Die Durchstrahlung einer Solarzelle beläuft sich auf die langwellige Strahlung, da dieses Licht von Silizium nur schlecht absorbiert wird (Mertens 2022). Wenn extrem große Abdeckungen beabsichtigt sind, besteht eine mögliche Lösung darin, auf die Transparenz der FPV-Anlagen einzuwirken, was durch eine Variation der Schwimmer (Pontons) und Lücken zwischen den Paneelen und der Struktur möglich ist (Haas et al. 2020). Nach Aussagen von Christoph Kutter, R&D Engineer für Floating-PV bei BayWa r.e., wird die effektive Transparenz eines PV-Moduls aus der Modulfläche abzgl. Zell-, Rahmen- und ASD (Automatic Storage Device) berechnet, diese liegt bei gängigen bifazialen Modulen laut Christoph Kutter im Bereich von 5 % (C. Kutter, mündliche Mitteilung 20.11.2022). Ein Paneel besteht aus widerstandsfähigen Trägermaterialien aus Weißglas oder speziellem Antireflexglas auf der Modulvorderseite, mit einem Transmissionsgrad, einer Lichtdurchlässigkeit von > 90 % und > 95 % (Wesselak et al. 2017). Ein Aluminium- oder Stahlrahmen schützt die Glaskanten des Moduls vor Stoßbelastungen und eindringender Feuchtigkeit, gleichzeitig dient er zur Befestigung der Module auf einer Unterkonstruktion. Bei Freiflächenanlagen oder horizontalen Anlagen gilt, je größer der Abstand zwischen den Modulreihen, desto geringer sind die Verschattungsverluste, aber auch die Flächenausnutzung. Ein mögliches Anwendungsbeispiel wären Photovoltaik-Module, die einen effektiven transparenten Bereich von mindestens 30 % besitzen, wie die bifacial Solarmodule der Firma BISOL (Abb. 3; BISOL Group 2022). Allerdings werden diese Paneele nur mit einer verhältnismäßig geringen Leistung von bis zu 420 W hergestellt und haben eine Effektivität auf der Vorderseite von 13,5 % bis maximal 19 % mit der Rückseite.

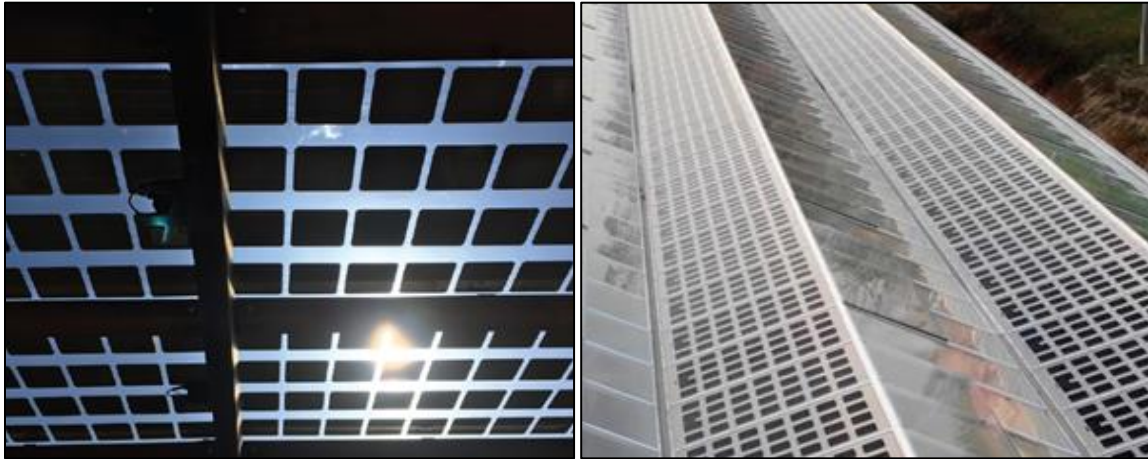


Abb. 3: Bifacial Photovoltaik-Module „Lumina“ von der Firma BISOL mit transparenten Bereichen zwischen den Solarzellen, nach Herstellerinformationen beträgt der transparente Bereich mindestens 30 % (BISOL Group 2022).

Um den weltweiten Energiebedarf zu decken, eignen sich auch FPV-Anlagen in mariner Umgebung, die zwar höhere Kosten verursachen und größerem Stress durch Wellen, Windlasten, Salzgehalt und Wasserlebewesen ausgesetzt sind, aber durch die bessere natürliche Kühlung 12,96 % mehr Effizienz gegenüber landbasierten Systemen besitzen (Golroodbari & Van Sark 2020; Vo et al. 2021). Auch neue verdunstungsgesteuerte Generatoren, die von Perez et al. (2018) mit FPV verglichen wurden, waren in Bezug auf Energieerzeugung und Wassereinsparung durch Verdunstung FPV-Systemen noch deutlich unterlegen. Ein Verdunstungsmotor befindet sich ähnlich einer FPV-Anlage direkt über dem Wasser und nimmt den aufsteigenden Wasserdampf, der ein hohes chemische Potenzial besitzt, auf und gibt das Wasser mit einem niedrigeren chemischen Potenzial an die Atmosphäre wieder ab (Cavusoglu et al. 2017). Die Technologie ist in der Lage, die durch die Sonnenenergie angetriebene natürliche Verdunstung in Arbeit und damit in Energie umzuwandeln. In den Vereinigten Staaten wäre mit dieser neuen Technologie schätzungsweise eine Energieproduktion von 2,85 TWh pro Jahr möglich und gleichzeitig würden die Verdunstungsverluste fast halbiert werden. Außerdem wurde von Perez et al. (2018) festgestellt, dass Photovoltaik eine bessere Flächeneffizienz hat als bestehende Wasserkraftwerke in den Vereinigten Staaten, eine vollständige Abdeckung mit FPV auf den 128 größten Wasserreservoirs würde eine elektrische Energie von 9250 TWh/a produzieren, dies entspricht dem 80-fachen der jährlichen Stromerzeugung aus der Wasserkraft von 112 TWh in den USA. Bereits 1,2 % FPV- Abdeckung, bei einem Modulwirkungsgrad von 24 %, würde die gleiche Menge an elektrischer Energie erzeugen wie die existierenden Wasserkraftanlagen.

3.1.1 Energieproduktion und Flächenbedarf von FPV

Eine Photovoltaikanlage arbeitet aufgrund der Einstrahlungsbedingungen nur etwa die Hälfte der 8760 Stunden pro Jahr, und selbst dann meist nur unter Teillast (Wirth 2022). Die horizontale Globalstrahlung für die Jahre 1998 - 2018 in Deutschland lag im Mittel bei 1088 kWh/m²/a, mit einem Neigungswinkel ~ 30 ° und der Ausrichtung nach Süden lässt sich die Einstrahlungssumme auf die Module um 15 % auf 1250 kWh/m²/a maximieren. Somit können in etwa 1000 Volllaststunden in Deutschland durch die Sonne aufgefangen werden (Mertens 2022). In anderen Ländern gibt es andere Einstrahlungssituationen, somit kommt man in Südspanien auf rund 1800 kWh/m²/a. Der tatsächliche Systemwirkungsgrad, der sogenannten Performance Ratio beschreibt das Verhältnis von real generierten Anlagenertrag zu theoretisch möglichen Anlagenertrag, dieser liegt bei guten Photovoltaikanlagen im Bereich von 85 % - 90 % (Wesselak & Voswinkel 2016; Wirth 2022). Die reale Energieproduktion ist selten über 65 % der installierten Nennleistung aufgrund der Performance Ratio (< 90 %) und der schwankenden Wetterlage deutschlandweit (Wirth 2022). Die elektrische Nennleistung (P_{STC}) ist gleich die optische Leistung (P_{Opt}) multipliziert mit dem Wirkungsgrad des Moduls (η_{Modul}). Es folgt die Bestrahlungsstärke (E_{STC}) multipliziert mit der Modulfläche (A) und dem Wirkungsgrad des Moduls. Daraus ergibt sich die folgende Gleichung nach Mertens (2022):

$$1. P_{STC} = P_{Opt} \times \eta_{Modul} = E_{STC} \times A \times \eta_{Modul}$$

Aus der Nennleistung und dem spezifischen Jahresertrag (w_{Jahr} , Kilowattstunden pro Kilowattpeak) lässt sich mit folgender Gleichung die jährlich erzeugte Energiemenge berechnen:

$$2. W_{Jahr} = P_{STC} \times w_{Jahr}$$

Ein Prozent aller Ackerflächen in Deutschland haben eine Fläche von ca. 1.200 km² (Mertens 2022). Unter Annahme eines Flächennutzungsgrads von 45 % ergibt sich eine verfügbare Modulfläche von 540 km² und daraus eine nutzbare Strahlungsenergie von 648 TWh/a. Es ergibt sich eine installierte Leistung von 108 GWp für Freiflächenanlagen (Standardmodul mit Wirkungsgrad von 20 %) und daraus eine elektrische Energie von 117 TWh/a unter Berücksichtigung von Systemverlusten. Dies sind 20,71 % von 565 TWh des inländischen Brutto-Stromverbrauchs von Deutschland aus dem Jahr 2021 (Icha et al. 2022). Nach Angaben des Statistischen Landesamt Bremen (2021) hat eine Großstadt wie Bremen einen jährlichen Endenergieverbrauch (Strom), einschließlich Industrie, von 4.507 Mio. kWh. Um 50 % des jährlichen Strombedarfs zu decken, wäre eine Wasserfläche von 1.736,5 ha oder 17,4 km² für FPV erforderlich.

Um die benötigte Wasserfläche und die Größe einer FPV-Anlage und die zu erwartende Energieproduktion abzuschätzen, wurden zwei Beispiele von FPV-Anlagen in Deutschland

herangezogen und der Energieertrag extrapoliert. Im Juli 2019 wurde eine neue FPV-Anlage auf dem Maiwaldsee, einem Baggersee, des Kieswerks Ossola in Renchen, Baden-Württemberg in Betrieb genommen (Erdgas Südwest 2020; EnBW AG 2021). Eckdaten: 43 ha Gewässergröße, 7.700 m² FPV-Anlage (~2 % der Fläche), 2.304 Module, 749 kWp Nennleistung & 800.000 kWh Strom pro Jahr geschätzt. Nach internen Berechnungen seitens Erdgas Südwest sollte die Anlage rund 3 % - 4 % Mehrertrag zu einer herkömmlichen Landanlage erbringen (Erdgas Südwest 2020). Tatsächlich konnte die FPV-Anlage wegen der vielen Sonnenstunden im Spätsommer 2019 und im ersten Halbjahr 2020 rund 853.328 kWh in den ersten 12 Monaten erzeugen, dies entspricht einer Zunahme von + 6,67% der ursprünglich geschätzten Stromerzeugung. Im Mai 2022 ging eine weitere FPV-Anlage in Deutschland, auf dem Silbersee III bei der Stadt Haltern, ans Netz (Abb. 1B; Quarzwerke GmbH 2022 b). Eckdaten: ~70 ha Gewässergröße, 18.000 m² FPV-Anlage (~2,3 % der Fläche), 5.800 Module, 3,1 MWp Nennleistung & jährlich rund 2,9 Millionen Kilowattstunden (Quarzwerke GmbH 2022 a). Ausgehend von einer durchschnittlichen Bestrahlungsstärke beider FPV-Systeme von ~ 650 W/m² und einem durchschnittlichen spezifischen Ertrag von 1.001,79 kWh/kWp bei einem Modulwirkungsgrad von 20% ergab sich eine Nennleistung von ~ 1,3 MWp pro Hektar und damit eine jährliche Energieproduktion von 1.305 MWh bzw. 1,3 GWh pro Hektar für FPV.

3.2 Die Auswirkungen von FPV auf das Ökosystem See

Ein Großteil der bisherigen Forschung zu FPV fokussierte sich auf die bessere Energieerzeugung gegenüber terrestrischen Photovoltaikanlagen und die Wassereinsparungen durch die reduzierte Verdunstung (Da Silva & Branco 2018; Rosa-Clot 2020; Cuce et al 2022). Die Auswirkungen auf das Ökosystem des Sees sowie die damit verbundenen Ökosystemleistungen wurden dagegen bisher häufig vernachlässigt (Exley et al. 2021 b). Es gibt eine Reihe von interagierenden physikalischen, chemischen und biologischen Gewässereigenschaften, die ausschließlich innerhalb des Wasserkörpers oder durch Wechselwirkungen mit der Atmosphäre oder den Sedimenten beeinflusst werden (Armstrong et al. 2020). Eine FPV-Anlage kann diese Wechselwirkungen in komplexer Weise beeinträchtigen. Existierende wissenschaftliche Untersuchungen haben dabei insbesondere potenzielle Beeinträchtigungen des Wasserhaushalts, der Stoffkreisläufe, der chemisch-physikalischen Gewässerbeschaffenheit sowie der Flora und Fauna im und am Gewässer betrachtet (de Lima et al. 2021; Exley et al. 2021 a; Cuce et al. 2022).

3.2.1 Auswirkungen von FPV auf den Wärmehaushalt im See

Die physikalischen Ökosystemfunktionen eines Gewässers werden durch das Strahlungsklima, die Wettereinflüsse, sowie den Wärmefluss infolge von Niederschlag und Verdunstung bestimmt (Schwoerbel & Brendelberger 2013; Nützmann & Moser 2016). Das in das Wasser eindringende Licht wird von den Wasserschichten gestreut und absorbiert. Aus der Strahlungsintensität, der Wärmeverteilung im Gewässer, sowie der Wärmeaufnahme und -abgabe an die Atmosphäre ergibt sich der Wärmehaushalt eines Wasserkörpers. Die Verteilung der Wärmeenergie im Gewässer geschieht fast ausschließlich durch die mechanische Verfrachtung mit dem Wind. Die Winddurchmischung und die Oberflächentemperatur regulieren das thermische Regime des Wasserkörpers, indem sie das Auftreten, die Länge und die Stärke der sogenannten Schichtung, der Durchmischung im Wasserkörper und auch die Dynamik der Tiefe der Schichtungen bestimmen (Woolway et al. 2017).

Im Jahresverlauf kommt es zu thermischen Schichtungen im See aufgrund der wechselnden Wärmeaufnahme aus der Atmosphäre und den spezifischen Ausdehnungseigenschaften, sowie geringen Wärmeleitfähigkeit des Wassers (Schwoerbel & Brendelberger 2013; Woolway & Merchant 2019). In den warmen oder sehr kalten Monaten werden die tiefen Wasserschichten durch die Temperaturdifferenzen in den Oberflächenbereichen isoliert, es kommt zu einer temperaturbedingten Stratifikation durch die unterschiedlichen Dichteverhältnisse der Wasserschichten (Nützmann & Moser 2016). Bei der Temperatur von 4 °C besitzt Wasser seine

höchste Dichte und es kann zu einer Durchmischung im gesamten Wasserkörper kommen. Ein Gewässer lässt sich nach Art und Anzahl von Zirkulations- und Stagnationsphasen in einem geographischen Seentypus einteilen (Schwoerbel & Brendelberger 2013). Ein See, der ständig durchmischt ist, wird als kontinuierlich polymiktisch bezeichnet und ein See, der sich häufig mischt, ist diskontinuierlich polymiktisch (Woolway & Merchant 2019). Bei weiteren Zyklustypen kommt es zu regelmäßigen (meromiktischen) Durchmischungen von Teilbereichen des Tiefenwassers, seltenen und unregelmäßigen Durchmischungen (oligomiktisch) oder saisonalen Schichtungen. Ein See mit zwei Stratifikationsperioden wird als dimiktisch eingestuft, ein häufiger Seentyp in den gemäßigten Klimazonen. Bei einmaliger saisonaler Schichtung werden Seen als monomiktisch bezeichnet (Schwoerbel & Brendelberger 2013).

In den gemäßigten Klimazonen der Erde weist die Oberfläche eines Sees einen deutlichen jährlichen Temperaturzyklus auf (Nützmann & Moser 2016). Die Wärmeverfrachtung ist im Sommer auf die warme, thermisch homogene Oberflächenschicht beschränkt, das Epilimnion. Während der Sommerstagnation findet eine weitgehende Isolierung der darunter liegenden Wasserschichten statt. Dadurch kommt es im Metalimnion, der Sprungschicht und dem Hypolimnion, dem Tiefenwasser, zu charakteristischen Unterschieden im vertikalen Sauerstoffprofil. Besonders in dieser Zeit macht sich der biogene Sauerstoffverbrauch, durch Abbauprozesse, in den tieferen isolierten Wasserschichten bemerkbar, sodass während der Sommerstagnation häufig kein oder nur wenig Sauerstoff im Hypolimnion gelöst ist. Im Herbst vollzieht sich durch die Abkühlung des Sees von der Wasseroberfläche aus der umgekehrte Prozess, der zur Winterschichtung führen kann (Nützmann & Moser 2016). Die vertikale Schichtung übt einen starken Einfluss auf den Transport von Nährstoffen, den Sauerstofftransport zwischen dem Oberflächen- und Tiefenwasser und damit auch auf die Zusammensetzung und Verteilung der Organismen im See aus (Woolway & Merchant 2019).

Viele Forscher konnten in den letzten Jahren die Effizienzsteigerung von FPV-Systemen gegenüber herkömmlichen PV-Systemen an Land durch den Kühleffekt des Wassers nachweisen (Choi 2014; Kamuyu et al. 2018; Liu et al. 2018; Golroodbari & Van Sark 2020; Kjeldstad et al. 2021). Die standortabhängigen Wassertemperaturen und die verwendete Technologie hatten einen Einfluss auf die Ertragssteigerung von FPV (Oliveira-Pinto & Stokkermans 2020; Dörenkämper et al. 2021). Erste Felduntersuchungen und Simulationen über die Auswirkungen von FPV auf die Wasserqualität und die Ökologie von Seen konnten belegen, dass der Einsatz von FPV im Umkehrschluss auch Einfluss auf die thermische Struktur eines Sees hatte (de Lima et al. 2021; Exley et al. 2021 a). Ein Mesokosmenexperiment von Andini et al. (2021) konnte durchschnittlich geringere Wassertemperaturen mit einer 100 % FPV-Abdeckung im Vergleich zu unbedeckten Wasserflächen messen. Die Wassertemperatur wurde durch Konvektion von der Lufttemperatur und durch die Globalstrahlung im Laufe des Tages verändert. Durch eine FPV-Abdeckung wurde dieser Effekt auf den Wasserkörper abgeschwächt. Auch

Untersuchungen von Château et al. (2019) und Wang et al. (2021) konnten bei FPV-Abdeckungen von 40 % über Fischteichen niedrigere Wassertemperaturen als in den unbedeckten Kontrollteichen feststellen.

Ein detailliertes Computermodell von Exley et al. (2021 a) simulierte den Einsatz von unterschiedlichen FPV-Systemen, unabhängig ihrer Bauart und dem Ausmaß der Oberflächenabdeckung, um damit die Änderungen der thermischen Dynamik des Wasserkörpers wie Schichtung, Wassertemperatur und Durchmischungstiefen zu ermitteln. Eine FPV-Abdeckung verändert die Windgeschwindigkeit und die Sonneneinstrahlung an der Seenoberfläche. Diese beiden treibenden Variablen wurden mit einem skalierbaren prozentualen Anteil von 1 % - 100 % genutzt, um das Ausmaß und die Größenordnung der FPV-induzierten Veränderungen auf die Eigenschaften und Ökosystemfunktionen eines Sees zu simulieren. Durch ein winddominantes Systemdesign, z.B. horizontale Solarmodule mit geringem Abstand zur Wasseroberfläche, ist die Einstrahlung in den See geringer als die Windscherung (Ilgen et al. 2022). Das südliche Becken des gut erforschten, monomiktischen und mesotrophen Reservoirs Windermere im Nordwesten Englands mit einer Fläche von etwa 6,7 km², diente als Modell für die Simulationen (Exley et al. 2021 a). Alle berechneten Szenarien, bei denen sowohl die Sonneneinstrahlung als auch die Windeinwirkung reduziert wurden, führten zu einer Senkung der durchschnittlichen jährlichen Temperatur, der gesamten jährlichen Verdunstung des Sees, zu einer Verkürzung der Schichtung und flacheren Durchmischungstiefen (Exley et al. 2021 a). Eine Reduktion beider Variablen (Wind & Sonneneinstrahlung) um 10 % steht nicht für ein FPV-System, das 10 % der Wasserfläche abdeckt, sondern repräsentiert den Einfluss einer FPV-Anlage auf den Wasserkörper und soll über die Veränderungen der Ökosystemleistungen informieren. Die Ergebnisse dieser Studie gelten als relevant für ähnliche Seentypen in der gemäßigten Zone, aber lassen sich aufgrund der lokalen klimatischen Bedingungen und der geografischen und morphologischen Faktoren nicht ohne Veränderungen auf andere aquatische Ökosysteme übertragen. Grundsätzlich konnte die Studie für einen der häufigsten Seentypen in den gemäßigten Breiten einen direkten Zusammenhang zwischen der relativen Flächenabdeckung einer FPV-Anlage und der Beeinträchtigung des Wasserkörpers zeigen (Tab. 2). Negative Auswirkungen von FPV auf die Seenökosysteme waren dabei allerdings nicht linear zur FPV-Größe, sodass Gewässerbeeinträchtigungen durch diese technischen Anlagen ebenso komplex sein können wie die Prozesse, die sie verändern.

Tab. 2: Übersicht einiger Szenarien (Sz.) für ökologische Auswirkungen von FPV in eigener Darstellung nach den Simulationen von Exley et al. (2021 a). Die Angaben sind unterteilt in prozentuale Anteile der Reduktion (Wind & Sonneneinstrahlung) stellvertretend für den Abdeckungsgrad mit FPV. Die reduzierten Antriebsvariablen sind (W) Windgeschwindigkeit und (S) Sonnenstrahlung im Verhältnis 1:1 oder als winddominante oder solardominante Szenarien (Sz.). Außerdem werden die durchschnittlichen jährlichen Temperaturen in °C für Oberflächen- (OW) und Tiefenwasser (TW) und die gesamte jährliche Verdunstung in % dargestellt. Dazu gibt es eine kurze Erklärung der Veränderungen im See. Die Symbole ▼▲ stehen für die Temperaturrückgänge (blau) und -steigungen (rot), ▼ steht für die Verringerung der Verdunstung und + zeigt einen Nettogewinn von Wasser aufgrund von Taubildung an. Die prozentuale Veränderung der Verdunstung steht im Vergleich zur Basislinie von 375,2 mm pro Jahr. Die durchschnittlichen Wassertemperaturen für das unveränderte System betragen an der Oberfläche 11,2 °C und im Tiefenwasser 7,0 °C.

Reduktion von Wind und Sonneneinstrahlung in % (W:S)	Durchschnittliche jährliche Temperatur (OW; Oberflächen-/TW Tiefenwasser) in °C und die gesamte jährliche Verdunstung in %	Erklärung der Veränderungen
10 % - 1:1	OW ▼ 0,3 °C TW ▼ 0,2 °C Verdunstung ▼ 17,27 %	Eine FPV-Anlage, die zu einer 10 % Reduktion der Variablen führt, ruft nur geringe Veränderungen hervor
25 % - 1:1	OW ▼ 0,8 °C TW ▼ 0,6 °C Verdunstung ▼ 42,2 %	Deutliche Senkung der Temperatur des Tiefenwasser um den Faktor 3 im Vergleich zu einer 10 % Reduktion
25 % - 25:50 <i>winddominant</i>	OW ▼ 2,4 °C TW ▼ 1 °C Verdunstung ▼ 75,9 %	Sonneneinstrahlung ist bei winddominanten Sz. stärker reduziert, Wassertemperaturen und Verdunstung werden stark verringert
25 % - 50:25 <i>solardominant</i>	OW ▼ 0,4 °C TW ▼ 0,7 °C Verdunstung ▼ 5,9 %	Windgeschwindigkeit ist bei solardominanten Sz. stärker reduziert, Wassertemperaturen und Verdunstung werden leicht verringert
30 % - 30:0 <i>solardominant</i>	OW ▲ 0,75 °C TW - Verdunstung ▼ 46,2 %	Bei reduzierter Windgeschw. setzt die Schichtung im Jahr früher ein, die Oberflächenwassertemperatur erhöht sich leicht
40 % - 1:1	OW ▼ 1,6 °C TW ▼ 1 °C Verdunstung ▼ ~65 %	Jährliche Durchmischungstiefe verringert sich um 0,58 m jede 10 %ige Reduktion bis zu 40%. Verursacht durch Änderungen in der Schichtungsdauer. Es kam immer zu einer Verflachung der mittleren sommerlichen Durchmischungstiefe

45 % - 1:1	OW ▼ 2 °C TW ▼ ~1,5 °C Verdunstung ▼ 68,9 %	Dauer der Schichtung wird noch nicht beeinträchtigt, Schichtungszeitraum verlagert sich auf späteren Zeitpunkt. Jede weitere Reduktion um 10 % verringert die Schichtungsdauer um durchschnittlich 39 Tage
50 % - 1:1	OW ▼ 2,2 °C TW ▼ ~1,2 °C Verdunstung ▼ 77,9 %	Größere Bedeckungen von über 50 % sorgen für starke Temperaturveränderungen und weitreichende Änderungen des Schichtungszeitpunkts
50 % - 50:75 <i>winddominant</i>	OW ▼ 4,7 °C TW ▼ 2,5 °C Verdunstung + 1 %	Bei winddominanten Sz mit 75 % reduzierter Sonneneinstrahlung kommt es zu einem Nettogewinn + an Wasser
50 % - 75:50 <i>solardominant</i>	OW ▼ 1,9 °C TW ▼ 1,5 °C Verdunstung ▼ 81 %	Ein solardominantes Sz. zeigt deutlich geringere Veränderungen der Wassertemperaturen als ein winddominantes Sz.
74 % - 1:1	OW ▼ 4,9 °C TW ▼ ~2,2 °C Verdunstung + 0,5 %	Schwellenwert überschritten: Tau-Bildung und Verdunstung bedeutet Nettogewinn an Wasser
90 % - 1:1	OW ▼ 7 °C TW ▼ ~2,5 °C Verdunstung + 6 %	Eisschicht über mehrere Wochen, Schichtung verlagert sich von monomiktisch zu dimiktisch

Ein Anstieg der Wassertemperatur oder eine Verlängerung der Schichtungsdauer trat nur in den seltenen Fällen auf, wenn eine FPV-Abdeckung für eine erhebliche Verringerung der Windgeschwindigkeit und einer minimalen Verringerung der Sonneneinstrahlung sorgte (Exley et al. 2021). Die simulierten Szenarien von Exley et al. (2021 a) zeigten, dass eine schwimmende Solaranlage die 25 % der beiden Variablen (Wind und Sonneneinstrahlung) reduziert, zu einer durchschnittlichen Senkung der Oberflächenwassertemperatur um 0,8 °C, des Tiefenwassers um 0,6 °C und der Verdunstung um 42,2 % führt. Eine 30 % Reduzierung der Variablen senkte die Oberflächenwassertemperatur um ~ 1,08 °C und die Temperatur im Tiefenwasser um 0,8 °C.

Eine der ersten Feldstudien in den Niederlanden durch de Lima et al. (2021) an einer großen FPV-Anlage, die 30 % der Seenoberfläche abdeckt, wurden unter dem Solarsystem niedrigere Wassertemperaturen von 3,3 % im Vergleich zur unbedeckten Seenoberfläche gemessen. In absoluten Zahlen ausgedrückt sank die Wassertemperatur im Epilimnion um durchschnittlich 0,4 °C, wohingegen im Hypolimnion weniger Fluktuationen auftraten und die Wassertemperatur nur um 0,2 °C gegenüber der nicht abgedeckten Wasserfläche absank. Diese Ergebnisse sind

wahrscheinlich auf die Abschattungseffekte der Module und den geringeren Windeinfluss zurückzuführen. Dennoch gelangten der Wind und ein Teil des Sonnenlichts noch unter die FPV-Anlage und traf auf die Wasseroberfläche (de Lima et al. 2021). Auch bei Untersuchungen an einer FPV-Pilotanlage durch Ziar et al. (2020) verringerte sich die Wassertemperatur durch den Kühlungseffekt der FPV-Systeme unter den PV-Modulen im Sommer im Durchschnitt nur um 0,8 °C und im Frühling um 0,2 °C.

Bisherige empirische Befunde (de Lima et al. 2021) als auch Simulationen (Exley et al. 2021 a) und Experimente (Andini et al. 2021) zeigten, dass die Abschirmung der Sonneneinstrahlung und die Veränderungen des Windflusses aufgrund der FPV-Bedeckung die Wassertemperatur senken, die Schichtungsdauer verkürzen und die Schichtungsintensität abmildern (Abb. 4). Bei einer hohen Reduktion von Wind und Sonneneinstrahlung um mehr als 50 % durch FPV kann das thermische Regime des Gewässers stark beeinflusst werden, indem die Durchmischungstiefe und damit der Zeitpunkt und die Dauer der thermischen Schichtung stark verringert werden. Ein großer Einfluss auf die Tiefe des Epilimnions resultiert aus der Verringerung der Windeinwirkung, während eine geringere Sonneneinstrahlung und damit eine niedrigere Wassertemperatur tendenziell mehr Einfluss auf das thermodynamische Gleichgewicht und die Schichtung im See haben (Ros-Clot 2020; Exley et al. 2021). Grundsätzlich gilt, je größer die Oberflächenerwärmung, desto weniger tief ist die Mischschichttiefe durch den Wind (Schwoerbel & Brendelberger 2013; Woolway & Merchant 2019). Im Umkehrschluss führt eine niedrige Oberflächentemperatur durch eine FPV-Anlage zu einer Verringerung der Schichtungsstärke und ermöglicht leichtere Durchmischung, während eine geringere Winddurchmischung die Schichtung verstärkt (Woolway et al. 2017). Eine Zunahme der Schichtungsdauer zwischen 3 und 13 Tagen wird angenommen, wenn der Wind durch eine Anlage wesentlich stärker blockiert wird als die Sonneneinstrahlung. Gegenteilige Effekte (verringerte Schichtungsdauer) sind anzunehmen, wenn die Sonneneinstrahlung stärker reduziert wird als der Windeinfluss (Exley et al. 2021 a). Bei der Installation von FPV-Anlagen in den gemäßigten Breiten besteht laut Exley et al. (2021 a) das wahrscheinlichste und häufigste Szenario aus einer Temperaturreduktion mit verkürzter Schichtungsdauer und verringerten Schichtungstiefen.

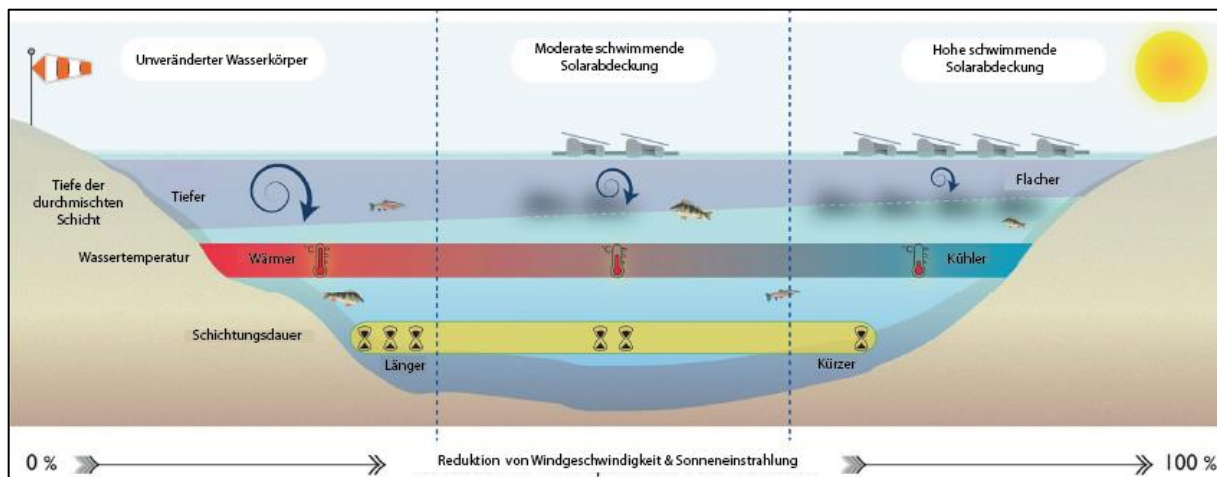


Abb. 4: Auswirkungen von FPV-induzierten Änderungen der Windgeschwindigkeit und der Sonneneinstrahlung auf die thermische Struktur des Sees als eindimensionales Modell (Exley et al. 2021 a modifiziert). Die beobachtete Windgeschwindigkeit und Sonneneinstrahlung wurden mit einem Ansatz von 0 % bis 100 % skaliert. Die Tiefe der Wasserschichten, die Wassertemperatur und die Dauer der Schichtung von einem unveränderten Wasserkörper zu einem Wasserkörper mit hoher FPV-Abdeckung sind hier dargestellt.

Solange die Reduktion von Wind und Sonneneinstrahlung durch ein FPV-System nicht mehr als 45 % betrug, war die Dauer der Schichtung bis auf wenige Tage mit der eines unbedeckten Gewässers vergleichbar (Exley et al. 2021 a). Darüber hinaus verringerte sich die Dauer der Schichtung um ~ 39 Tage für jede weitere Reduktion um zusätzliche 10%. Die sogenannte Schmidt-Stabilität beschreibt den Energieaufwand, der zur Aufhebung der thermischen Schichtung führt und die tiefen Wasserschichten auf den ungeschichteten Zustand anhebt (Schönborn & Risse-Buhl 2013). Die Stabilität der Schichtung verringerte sich ab einer Reduktion der Variablen von 13 % um $\pm 10 \text{ J/m}^2$ (Wärmedichte pro Fläche), dies sind 3 % Differenz zum unveränderten System (Exley et al. 2021 a). Ein FPV-System das mehr als 13 % der Variablen reduziert, verringerte die Schmidt-Stabilität erheblich (Exley et al. 2021 a). Eine Erhöhung der Stabilität trat nur in den Fällen auf, in denen die Windgeschwindigkeit deutlich ($> 50 \%$) und die Sonneneinstrahlung um nicht mehr als 20 % reduziert wurde. Eine Studie des Fraunhofer-Instituts ISE konnte zeigen, dass ein winddominantes FPV-Anlagendesign, welches die Einstrahlung in den See stärker reduziert als den Einfluss des Windes, möglicherweise zu einer instabilen Schichtung und kürzeren Schichtungsdauer führt (Ilgen et al. 2022).

Die durchschnittliche jährliche minimale Oberflächen-Erwärmungsrate durch die Klimaveränderungen beträgt aktuell rund $0,35 \text{ }^\circ\text{C}$ je Dekade (Woolway et al. 2019). Eine FPV-Anlage, die Windgeschwindigkeit und Sonneneinstrahlung auf dem See um etwa 10 % reduziert, könnte somit theoretisch ein Jahrzehnt der Erwärmung ausgleichen und gleichzeitig nur verhältnismäßig geringe Veränderungen auf das Gewässer ausüben (Exley et al. 2021 a).

Eine Verringerung der Sonneneinstrahlung wirkt sich tendenziell stärker auf die Schichtung und Durchmischung aus (Exley et al. 2021 a). Ein FPV-System, das den größten Teil der Sonneneinstrahlung reduziert, aber den Wind nicht oder nur geringfügig blockiert, führte zu einer Verlängerung der Schichtung um mindestens 29 Tage bis zu 214 Tagen und könnte somit die Klimaveränderungen verschärfen. In Singapur stieg die Wassertemperatur unter einem FPV-System im Durchschnitt um 0,3 °C, während die Stabilität in der Wassersäule zunahm und die Durchmischungsenergie unter den Paneelen im Vergleich zu unbedeckten Wasserflächen deutlich geringer war (Yang et al. 2022). Ein Anstieg der Wassertemperatur entstand durch den aufgewärmten Luftraum unter den PV-Paneelen, verursacht durch die konduktive Erwärmung der erheblich erhitzten Paneele. Die kurzwellige Strahlung wurde erwartungsgemäß von den Paneelen absorbiert, aber die Paneele selbst emittieren langwellige Strahlung (Infrarotstrahlung) und erhöhen damit die langwellige Nettostrahlung drastisch. Das Ergebnis der geringeren Windlast durch das FPV-System und der reduzierten Sonneneinstrahlung, aber stark erhöhten Infrarotstrahlung, war der bereits erwähnte Gesamteffekt. Ein FPV-System mit z. B. hoher Lichtdurchlässigkeit und offener Struktur (Dörenkämper et al. 2021) könnte wahrscheinlich die Auswirkungen einer längeren Schichtung verringern, den Wärmestau reduzieren und damit die Wahrscheinlichkeit eines Anstiegs der Wassertemperatur verringern. Es konnten zudem zeitliche Unterschiede zwischen den Temperaturspitzen der oberflächennahen Wasserschichten unterhalb von FPV-Anlagen und der umliegenden Lufttemperaturen gemessen werden (de Lima et al. 2021; Ilgen et al. 2022). Das Wasser unterhalb der Kollektoren braucht also länger, um sich zu erwärmen oder abkühlen. So dienen die Paneele als Puffer für plötzliche Wetterumschwünge, haben ihre stärkste kühlende Wirkung an heißen Tagen und eine verminderte Wärmeabgabe des Sees in der Nacht. Das Fraunhofer Institut ISE kam in einer aktuellen Modellierungsarbeit zu dem Ergebnis, dass eine FPV-Anlage durch instabile und kürzere Schichtungsperioden genau gegensätzlich zu den Effekten des Klimawandels wirkt und somit die Folgen des Klimawandels gut abmildern könnte (Ilgen et al. 2022).

3.2.2 Reduzierung der Verdunstung durch FPV

Global betrachtet fokussiert sich die Anwendung von FPV-Systemen aktuell auf künstliche Gewässer wie Staudämmen, Teichen und Stauseen aufgrund ihrer Vorteile, die Verdunstung zu verringern und damit die Wassermengen zu erhalten, die Minimierung von Landverbrauch und die bessere Energieerzeugung durch höhere Sonneneinstrahlung, sowie durch die Verdunstungskühlung der Module und Kabel (Galdino & de Almeida Olivieri 2017). Einige Länder, wie Jordanien, deren trockenen Regionen hohem Wasserstress ausgesetzt sind, könnten mit hohen FPV-Abdeckungsgraden (> 30 %) die Wasserreserven sichern und das Algenwachstum

einschränken (Al-Widyan et al. 2021). Die FPV-Systeme konnten durchschnittlich 5,33 % mehr Strom im Vergleich zu den bodenmontierten PV-Paneelen erzeugen und bei einer FPV-Abdeckung von 30 % konnten 31,2 % der Verdunstungswassermenge eingespart werden. Mit einer FPV-Bedeckung von 50 % konnten ungefähr 54,5 % der Verdunstungswassermenge eingespart werden (Al-Widyan et al. 2021). Modellierungen von Farrar et al. (2022) konnten darüber hinaus nachweisen, dass eine FPV-Anlage mit einem "large footprint" jährlich 42 % Wasser in Jordanien einsparen kann, im Vergleich zu einem nicht abgedeckten Wasserreservoir. Eine FPV-Anlage mit einem "small footprint" konnte nur 8 % des Wassers jährlich im Vergleich zu einer unbedeckten Wasserfläche einsparen. Der deutliche Unterschied in der Verdunstungsrate zwischen den FPV-Anlagen war auf die Tatsache zurückzuführen, dass erstere fast die gesamte einfallende kurzweilige Strahlung blockiert, während bei der FPV-Anlage mit der kleineren Kontaktfläche zum Wasser weiterhin die diffuse Sonneneinstrahlung auf die Wasseroberfläche treffen konnte. Ähnliche Ergebnisse lieferten auch andere Studien, in denen verschiedene Abdeckungen oder Objekte genutzt wurden, um die Wasserverdunstung zu messen (Taboada et al. 2017). Eine Wasserfläche mit 91 % scheibenförmigen Elementen abgedeckt, konnte in einer Studie von Lehmann et al. (2020) die Verdunstung um 80 % reduzieren. Eine FPV-Bedeckung, die mehr als 74 % der einfallenden Sonneneinstrahlung und im gleichen Maße den Windeinfluss blockiert, könnte zu Tauablagerungen über dem Wasserkörper führen, was einen Nettogewinn an Wasser für einen See bedeutet (Exley et al. 2021 a).

3.3 Auswirkungen von FPV auf die Stoffkreisläufe und Nährstoffe im See

Veränderungen des Wärmehaushalts und der Schichtung von Seen sind von fundamentaler Bedeutung für den Stoffhaushalt, die gleichmäßige Verteilung des sauerstoffreichen Wassers, des Planktons im See und für die Oxidation vieler Stoffe, wie Nitrat, Sulfat und Phosphat (Schwoerbel & Brendelberger 2013; Schönborn & Risse-Buhl 2013). Neben den periodischen Zirkulationen gibt es in stehenden Gewässern noch andere horizontale und vertikale Wasserbewegungen, die durch thermische Veränderungen, Luftdruckunterschiede und Wind hervorgerufen werden.

Eine Literaturstudie von Armstrong et al. (2020) legte dar, dass eine FPV-Anlage theoretisch zu Beeinträchtigungen der Ökosystemfunktionen führen kann, indem sie die Luft-Wasser-Konnektivität und die Strahlungsintensität vermindert und damit einen Einfluss auf alle Lebensgemeinschaften im Gewässer hat. Der gesamte Stoffhaushalt eines Gewässers setzt sich aus der Summe aller gelösten Stoffe, des Energieumsatzes und der Bioaktivität der Organismen

zusammen (Schwoerbel & Brendelberger. 2013). Als Folge einer FPV-Anlage könnte sich die Energieaufnahme und dadurch auch die Aktivität der Organismen zur Produktion von Biomasse und Sauerstoff verändern. Im Gewässer zählen alle höheren Pflanzen, Algen, Cyanobakterien und andere Bakterien, die Photosynthesefarbstoffe wie Chlorophyll a besitzen, zu den Produzenten (Schwoerbel & Brendelberger 2013). Nur die Produzenten haben die Fähigkeit zur Primärproduktion, d. h. den Aufbau von Biomasse aus im Wasser gelösten anorganischen Verbindungen und Strahlungsenergie durch biochemische Photosynthese. Die pflanzlichen Produzenten bilden die Basis des biogenen Stoff- und Energiehaushalts und sind der Beginn der Konsumentenkette als organische Energiequelle im Ökosystem See.

Die Trophie ist die Intensität der Primärproduktion in einem Gewässer, wobei aus anorganischen Stoffen (Nährstoffen und Gasen) und Energie aus Sonnenlicht organische Stoffe wie Kohlenhydrate entstehen (Schönborn & Risse-Buhl 2013). Als Indikator für die Trophie lässt sich die Menge des produzierten Sauerstoffs aus dem biochemischen Prozess der Photosynthese durch die Primärproduzenten beschreiben. Häufig dient der Chlorophyll a-Gehalt als Indikator der Trophie, da die Biomasse und die Primärproduktion positiv miteinander korrelieren und etwa die Hälfte der Phytoplanktonbiomasse aus Chlorophyll a besteht. Ein Gewässer mit niedrigem Gehalt an Nährstoffen wird als oligotroph bezeichnet und solche mit hohem Nährstoffgehalt als eutroph (Schönborn & Risse-Buhl 2013). Ein oligotropher See zeichnet sich durch eine ganzjährige und gleichmäßige Sauerstoffverteilung und durch eine annähernd konstante Konzentration von Sauerstoff um etwa 10 mg/L^{-1} aus. In einem eutrophen See kann es aufgrund der hohen Nährstoffe, vor allem Phosphor (P) und Nitrat-Stickstoff (N) und der daraus resultierenden Überproduktion von organischem Material in Phasen der Stagnation zu einem Sauerstoffdefizit kommen. Durch die Menschen verursachte Belastungen und Nährstoffanreicherungen sind vor allem die eutrophen Gewässer heutzutage weit verbreitet, bzw. werden die Alterungsprozesse von Seen global durch anthropogene Nährstoffeinträge und Klimawandel stark beschleunigt (Wittig & Niekisch 2014; Nützmann & Moser 2016).

3.3.1 Einfluss von FPV auf den Sauerstoffhaushalt

In die Sauerstoffbilanz eines Sees zählen zu dem aus der Photosynthese produzierten Sauerstoff noch weitere Einträge aus der Atmosphäre und durch Zuflüsse (Schwoerbel & Brendelberger 2013). Die Löslichkeit und damit auch die Sättigung von Sauerstoff und Kohlenstoffdioxid verringert sich bei steigenden Temperaturen von über 10 °C deutlich (Wittig & Niekisch 2014; Nützmann & Moser 2016). Je höher die Eutrophierung und die Temperaturen, desto größer ist das Defizit des gelösten Sauerstoffs im Wasser bis hin zu einem anaeroben Zustand (Schwoerbel & Brendelberger 2013; Schönborn & Risse-Buhl 2013). Der Verbrauch

an Sauerstoff in einem Gewässer entsteht durch Atmung der Bakterien, durch den Verlust an die Atmosphäre und zum größten Teil durch den mikrobiellen Abbau organischer Pflanzen- und Tierreste im Profundal, der Wasserschicht über dem Sediment. Eine Folge zu hoher Stoffeinträge sind starke Algenentwicklung, zunehmende Trübung und der Sauerstoffmangel in den tiefen Wasserschichten, dem Meta- und Hypolimnion (Nützmann & Moser 2016). Eine Beschattung durch z.B. schwimmende Strukturen kann die einfallende Lichtintensität wirksam reduzieren, dadurch den Chlorophyll a-Gehalt, das Wachstum und die Zelldichte der Algen deutlich verringern (Li et al. 2011). Schwimmende Häuser sorgen nachweislich für einen niedrigen Gehalt an gelöstem Sauerstoff in der Wassersäule unter den Strukturen (Foka et al. 2014). Der Gehalt an gelöstem Sauerstoff unter den Häusern unterschreitet allerdings nicht den kritischen Wert von 4,5 mg/L - 5 mg/L, der ein gesundes aquatisches Leben in Teichen und Gewässern gewährleistet (Foka et al. 2014; de Lima et al. 2022). Die Stickstoff- und Phosphorkonzentration im Wasser werden durch eine Beschattung nicht verringert, sondern steigen an und können von den Algen nach dem Entfernen der Abdeckung wieder absorbiert werden (Li et al. 2011). Infolge des langfristigen Abbaus der Algen in ihre Bestandteile wird weiterer Sauerstoff verbraucht (Andini et al. 2022). Dass schwimmende Strukturen einen Einfluss auf den Sauerstoffgehalt eines Gewässers haben können, zeigten Untersuchungen mit einer Unterwasserdrohne an verschiedenen schwimmenden Gebäuden (de Lima et al. 2022). Die Konzentrationen des gelösten Sauerstoffs in einer Tiefe von 1,25 m – 1,75 m unter den Strukturen waren statistisch signifikant niedriger als auf dem offenen Wasser, im Mittelwert zwischen 0,96 mg/L und 0,25 mg/L niedriger. Allerdings blieben die Konzentrationen des gelösten Sauerstoffs an den meisten Standorten im Bereich von 6 mg/L - 9 mg/L.

Das Fraunhofer Institut ISE und die Universität Freiburg hatten in einer aktuellen Untersuchung an einer kleinen FPV-Anlage (2% FPV der Gesamtfläche) keine signifikanten Auswirkungen auf die Konzentration von gelöstem Sauerstoff feststellen können. Eine FPV-Abdeckung von 100 % konnte den Sauerstoffgehalt in einem Testbecken (L 50 cm x W 50 cm x H 100 cm) allerdings unter einen Grenzwert von 4 mg/L verringern (Andini et al. 2022). Bei Messungen unter FPV-Pilotanlagen mit einer geringen Größe (~ 5 m² und ~ 30 m²), massiven Schwimmern, sowie einem großen Abstand zur Wasseroberfläche traten hypoxische Bedingungen (Konzentrationen von gelöstem Sauerstoff unter 6 mg/L) viel häufiger auf als im Freiwasserbereich, 157-Mal im Vergleich zu 87-Mal (Ziar et al. 2020). Während der Überwachung einer FPV-Anlage, die in etwa 30 % des Sees abdeckt, wurden Konzentrationen an gelöstem Sauerstoff von 4,6 mg/L unter den Solarmodulen in einer Tiefe von 1,5 m und ein Minimum von 6 mg/L im offenen Wasser gemessen. Der Hauptunterschied zwischen dem Gehalt an gelöstem Sauerstoff war in den tiefen Bereichen auf 30 m - 33 unter der FPV-Anlage und dem offenen Wasser am größten (de Lima et al. 2021). Trotz eines installierten Belüfters konnten auch in Fischzuchtteichen unter 40 % FPV-Abdeckungen signifikant niedrigere tägliche

Konzentrationen von 1,7 mg/L an gelöstem Sauerstoff festgestellt werden (Wang et al. 2021). Diese Differenzen wurden ebenfalls auf eine verminderte Photosynthese zurückgeführt, da die direkte Sonneneinstrahlung von den Schwimmkörpern oder den FPV-Anlagen blockiert wird (Wang et al. 2021; de Lima et al. 2022). Die Tatsache, dass die Wasseroberfläche unter den Paneelen einer FPV-Anlage mit einer Abdeckung von 30 % lichtlimitierenden Bedingungen unterliegt, welche die Photosynthese hemmen und zu einem Rückgang der Chlorophyll a-Konzentration von etwa 20 % an der Oberfläche und 30 % in Bodennähe führen, wurde ebenfalls von Yang et al. (2022) bestätigt. Die Atmung und eine weniger gut durchmischte Wassersäule führten zu einer Verringerung des gelösten Sauerstoffs, besonders am Boden des Gewässers (Yang et al. 2022). Zusätzlich könnte auch die verringerte Belüftung durch die begrenzte Luft-Wasser-Schnittfläche für einen Rückgang an gelöstem Sauerstoff sorgen (de Lima et al. 2022). Solche Ergebnisse erfordern, dass die Umweltauswirkungen von FPV auf das Ökosystem individuell und gewässerabhängig berücksichtigt und beachtet werden müssen.

3.3.2 Einfluss von FPV auf die Wasserqualität und die Nährstoffe im See

Die euphotische Zone ist für ein stehendes Gewässer von besonderer Bedeutung, in diesem Bereich wird die Hauptmenge der licht- und temperaturabhängigen Photosyntheserate umgesetzt (Schwoerbel & Brendelberger 2013; Schönborn & Risse-Buhl 2013). Diese Zone zieht sich durch das Pelagial (Freiwasserzone) und das Litoral (Uferzone) und endet in Bereichen, in denen die Lichtintensität des für die Pflanzen nutzbaren kurzwelligen Spektralbereichs auch PAR (photosynthetisch aktive Strahlung) von 400 nm - 700 nm noch 1% beträgt. Ein Gewässer ist eine verdünnte Nährlösung für alle Phytoplankton-Arten, die sich in Gruppen der prokaryotischen Cyanobakterien und eukaryotischen Algen unterteilen lassen und die charakteristische Lebensgemeinschaft im Pelagial eines jeden Sees sind (Schwoerbel & Brendelberger 2013). Die Phytoplankton-Arten passen sich an die Umweltfaktoren im See an, schichten sich nach ihren Präferenzen, der Temperatur und Lichtintensität, in unterschiedliche Tiefegradienten auf, dabei bestimmt die Nährstofflimitierung und die interne Konkurrenz die Verhältnisse zwischen den einzelnen Arten (Schönborn & Risse-Buhl 2013). Während der Zirkulationsphasen im Frühjahr oder Herbst wird das Wachstum und die Aktivität des Phytoplanktons durch die verbesserte Nährstoffversorgung und zunehmendes Sonnenlicht gefördert und die Phytoplanktondichte erreicht ihr Maximum. In Phasen der Stagnation limitiert die Tiefe des Epilimnions und der euphotischen Zone die Nährstoffversorgung des Planktons (Schönborn & Risse-Buhl 2013; Kraemer et al. 2015). Daher ist die Tiefe der durchmischten Schicht und der euphotischen Zone ein grundlegender Einflussfaktor auf die Chemie und Biologie von Seeökosystemen und von ausschlaggebender Bedeutung für die Wasserqualität.

In der Sommerstagnation ist die Phytoplanktendichte normalerweise rückläufig, da die verfügbaren Nährstoffe in den oberen Wasserschichten aufgebraucht werden (Schönborn & Risse-Buhl 2013). In eutrophen Gewässern sind häufig hohe Phosphor- und Stickstoff-Konzentrationen und bereits große Mengen CO_2 aus dem Abbau von organischen Stoffen vorhanden. Deshalb kommt es bei intensiver Sonneneinstrahlung in eutrophen Seen zu Massenerkrankungen von Algen oder Bakterien, sogenannten Algenblüten. Ein verstärktes Wachstum wird ebenfalls durch die klimatischen und hydrologischen Bedingungen (Globalstrahlung, Temperatur, Verweilzeiten), die Hydrodynamik (Schichtung, Strömung, Turbulenz) und die Sedimentation beeinflusst (Nützmann & Moser 2016). Hohe Phosphoreinträge, die durch Abwasser, Düngung oder nährstoffreiches Sickerwasser in den Wasserkreislauf gelangen, werden von Pflanzen und Bakterien aufgenommen und gelangen so in den Stoffkreislauf (Schönborn & Risse-Buhl 2013). Der überschüssige oder nicht aufgebrauchte Anteil des Phosphors sinkt ins Hypolimnion ab und geht mit dem Eisen im Sediment eine schwerlösliche Bindung ein. Dieser Effekt ist besonders stark bei flachen Seen ausgeprägt (Schwoerbel & Brendelberger 2013). Sinkt die Sauerstoffsättigung über dem Sediment durch die Zersetzung von Biomasse unter 10 %, wird das Eisen im Sediment reduziert und es kommt zu einer plötzlichen Lösung des angesammelten Phosphors aus dem Sediment ins Wasser (Schönborn & Risse-Buhl. 2013). Diese als interne Dünnung bezeichnete Rücklösung von Phosphor aus dem litoralen Sediment ist ein wesentlicher Treiber seeinterner Eutrophierung unter anaeroben Bedingungen während der im Sommer stattfindenden Stagnation (Schönborn & Risse-Buhl 2013). In der produktiven euphotischen Schicht der Plankter sorgt der aufsteigende Phosphor für einen schlagartigen Anstieg der Produktion und Anzahl der Organismen. Das wiederum erhöht die Zahl der toten Organismen, bewirkt weitere Zersetzung und intensivere Phosphorfreisetzung, Sauerstoffdefizite und Methangasbildung. Auch steigende Temperaturen, Aufwirbelung des Sediments, Abnahme des pH-Werts, Abnahme der im Sediment lebenden gramnegativen Bakterien oder das freigesetzte Methangas fördern diesen Prozess (Schönborn & Risse-Buhl. 2013).

Kürzlich durchgeführte Untersuchungen der ökologischen Auswirkungen an FPV-Pilotanlagen stellten keine signifikanten Veränderungen bei den Wasserqualitätsparametern wie Gesamtstickstoff, Wassertemperatur, Gesamtphosphor, Chlorophyll a oder Cyanobakterienkonzentrationen fest (Ziar et al. 2020). Auffällig war der Rückgang der Biomasse der submersen Makrophyten unter den FPV-Systemen um den Faktor drei, ein verringertes Pflanzenwachstum war jedoch weiterhin möglich. Zusätzlich zu den Auswirkungen auf die Gesamtbio-masse könnte die FPV-bedingte Veränderung der thermischen Struktur und die Einschränkung der lokalen photosynthetischen Aktivität, besonders in nicht-eutrophierten Gewässern, sich negativ auf das aquatische Leben auswirken (Thackeray et al. 2008; Galdino & de

Almeida Olivieri 2017; Exley et al. 2021 b; Reges et al. 2022). Durch die mosaikartige Lichtverfügbarkeit unter einer FPV-Anlage, der Verschiebung des Zeitpunkts und des Auftretens der Phytoplanktonblüte ändert sich die Zusammensetzung der Phytoplanktongemeinschaften und es entsteht ein Ungleichgewicht. Die jährliche Desynchronisierung des Phytoplanktonwachstums könnte sich auf die Nahrungsnetzhierarchie auswirken und dazu führen, dass Nährstoffe in der Wassersäule verbleiben (Thackeray et al. 2008; Exley et al. 2021 a). Weniger Nährstoffaufnahme durch die Algen würde wiederum zu einem Anstieg von Nitrat und Phosphat unter den FPV-Paneeelen führen. Einige koloniebildende Mikroorganismen, darunter einige Arten von Cyanobakterien, können ihren Auftrieb regulieren, was es ihnen erleichtert, sich an die geringe Lichtintensität unter einem FPV-System anzupassen und dadurch andere Phytoplanktonarten zu verdrängen (Schönborn & Risse-Buhl 2013; Exley et al. 2021 b). Gegenüber dem Phytoplankton haben Blaualgen unter eutrophen Bedingungen den zusätzlichen Vorteil, dass sie eine große Toleranz gegenüber extremen Umweltbedingungen (Nährstoffansprüche & Temperaturen) haben und ihren Energiebedarf auch unter anaeroben Bedingungen (anoxygene Photosynthese) decken können, d.h. sie produzieren keinen Sauerstoff (Schwoerbel & Brendelberger 2013). Die geringere Lichtverfügbarkeit und die geringere photosynthetische Sauerstoffproduktion unter den FPV-Systemen könnten somit auch die Algenblüte fördern und sich negativ auf Fische und andere Organismen auswirken, indem die Sauerstoffsättigung über dem Sediment sinkt und eine interne Düngung ausgelöst wird (Schönborn & Risse-Buhl. 2013; Bax et al. 2022).

Viele Literaturstudien, die sich mit den Auswirkungen von FPV auf das Ökosystem See beschäftigen, gehen davon aus, dass eine FPV-Anlage das Potenzial hat, starkes Algenwachstum durch die verringerte Sonneneinstrahlung wirksam zu reduzieren (Sahu et al. 2016; Rosa-Clot 2020; Cuce et al 2022). Außerdem könnte eine geringere vertikale Durchmischung durch eine Oberflächenabdeckung wie eine FPV-Anlage die Sedimentation verbessern und damit den Phosphorgehalt an der Sediment-Wasser-Grenzfläche verringern (Exley et al. 2021 b). Eine Verringerung der Algenvermehrung dürfte insgesamt und besonders in eutrophen Seen zu einer Verbesserung der Wasserqualität führen (Page et al. 2018; Cuce et al. 2022). Der Anteil der von einem FPV-System bedeckten Wasseroberfläche war dabei ausschlaggebend für die Stärke der Auswirkung auf den Wasserkörper (Galdino & de Almeida Olivieri 2017; Grojjan et al. 2020). Eine FPV-Anlage im großen Maßstab (> 50 %) hat nach Exley et al. (2021 a) durch ihren Kühlungseffekt das Potenzial, viele temperaturabhängige Stoffwechselprozesse, das Verhalten der Tiere, den Kohlenstoffkreislauf, die Dauer der Schichtung und die Tiefe der Wasserschichten zu verändern. Eine FPV-Bedeckung von 40 % könnte Algenblüten verhindern, aber ein hoher Nährstoffgehalt (Eutrophierung) der das Algenwachstum fördert, wird dadurch nicht beeinflusst, sodass es im Sommer mit Abdeckungen von bis zu 30 % noch

zu Algenblüten kommen kann (Li et al. 2011; Haas et al. 2020). Mit zunehmender FPV-Bedeckung von 60 % - 100 % und der daraus resultierenden Verringerung der einfallenden kurzwelligeren Sonneneinstrahlung durch die Beschattung wird das Algenwachstum stark eingeschränkt (Haas et al. 2020; Andini et al. 2022). Dadurch könnten alle Arten von Primärproduzenten der pelagischen Zone, wie z. B. Mikroalgen, reduziert werden und als wichtiger Teil der Dynamik des Nahrungsnetzes eines Sees wegfallen, was die Aufrechterhaltung des Ökosystems gefährden würde (Haas et al. 2020; Al-Widyan et al. 2021; Andini et al. 2022). In Fischzuchtteichen mit einer 40 % FPV-Abdeckung verringerte sich die durchschnittliche Menge der Planktonbiomasse um etwa die Hälfte im Vergleich zu entsprechenden Kontrollteichen (Wang et al. 2021). Experimente von Al-Widyan et al. (2021) und Andini et al. (2022) bestätigten, dass die Beschattung eines FPV-Systems die photosynthetische Leistung der Algen beeinträchtigt, gemessen an der Abnahme der Chlorophyll a-Konzentration und der Konzentration an gelöstem Sauerstoff im Wasser. Eine Verlängerung der Schichtung erhöht die Wahrscheinlichkeit einer hypolimnischen Anoxie und damit einer verstärkten Rücklösung von löslichem Phosphor und Metallen aus dem Seesediment (Schönborn & Risse-Buhl 2013; Exley et al. 2021 a). Bei höheren FPV-Abdeckungsgraden mit weiterhin starker Sonneneinstrahlung kann sich die Schichtungsdauer verkürzen, was tendenziell den gegenteiligen Effekt einer Verringerung der Anoxie und der internen Belastung mit Nährstoffen und Metallen hätte (Exley et al. 2021 a). Die Tatsache, dass die Größe und Struktur einer FPV-Abdeckung unterschiedliche Auswirkungen auf die Wasserqualität haben können, unterstreicht die Notwendigkeit eines durchdachten Systemdesigns.

Wenn extreme Bedeckungsgrade angestrebt werden, besteht eine Möglichkeit darin, auf die Transparenz von FPV-Installationen einzuwirken, wodurch die Auswirkungen auf das Ökosystem minimiert werden können (Haas et al. 2020). Eine mögliche Lösung ist laut Galdino & de Almeida Olivieri (2017) und Zhang et al. (2020) die Verwendung von halbtransparenten PV-Modulen, wie z. B. Glas-Glas-Modulen, die spezifische Transmissionsfenster zur Steuerung der Lichtintensität bieten und ein Mittel zur Regulierung des Phytoplanktonwachstums sind. Die Verwendung von Agri-Photovoltaik (APV) auf Agrarflächen, einer weiteren Anwendungsmöglichkeit von modernen Photovoltaik-Systemen, führte zu einer Veränderung der mikroklimatischen Bedingungen und der Pflanzenproduktion (Weselek et al. 2021). Große Abstände (5 m) zum Boden, Reihenabstände zwischen den Modulen, der richtige Neigungswinkel und die richtige Ausrichtung ermöglichten jedoch eine Optimierung zwischen PV-Ertrag und photosynthetischem Ertrag durch eine gleichmäßige Lichtverteilung. Die photosynthetisch aktive Strahlung nahm unter der APV-Anlage im Durchschnitt um etwa 30 % ab, dabei nahm die Pflanzenhöhe bei allen Kulturpflanzen unter der APV zu, aber auch Ertragsminderungen unterhalb der Anlage waren wahrscheinlicher. Jedoch wurden die Wachstumsbedingungen

der Kulturpflanzen unter heißen und trockenen Wetterbedingungen durch die Beschattung begünstigt.

3.4 Auswirkungen von FPV-Abdeckungen auf die Flora und Fauna

Die Auswirkungen schwimmender Solaranlagen auf die Ökosystemleistungen und die Biologie eines Gewässers wurden zum derzeitigen Stand kaum untersucht. Aktuelle wissenschaftliche Literaturstudien von Lammerant et al. (2020), Schlegel (2020), Bax et al. (2022), Essak & Ghosh 2022 und erste Forschungen an FPV-Anlagen von de Lima et al. (2020) stimmten darüber ein, dass ein dringender Bedarf an detaillierten Studien über die Auswirkungen von FPV auf das aquatische Ökosystem besteht. Ein Hauptanliegen der Forschung über FPV-Systeme sollte sein, genügend Studien und Modellierungen zu generieren, um negative Auswirkungen auf die Wasserqualität ausschließen zu können (Essak & Ghosh 2022). In einer von Exley et al. (2021 b) durchgeführten Stakeholder-Studie gaben FPV-Betreiber an, dass es keine Auswirkungen durch FPV auf die Wasserqualität gab, aber nur 15 % überwachten und analysierten die Wasserqualität, während die Mehrheit nur unzureichende Sichtkontrollen durchführte.

Die physikalischen Auswirkungen von FPV auf den Wasserkörper sind reduzierte Verdunstung, reduzierte Wassertemperatur und eine Veränderung der Durchmischung des Gewässers. Die Reaktion eines stehenden Gewässers auf FPV-induzierte thermodynamische Veränderungen variieren mit den morphometrischen Merkmalen; Seefläche, Volumen, Tiefe und der geografischen Lage (Kraemer et al. 2015; Woolway et al. 2017; Exley et al. 2021 a). Kleinere Seen mit weniger Oberfläche sind anfälliger für Störungen und unterliegen breiteren Temperaturschwankungen, während größere Seen-Systeme weniger anfällig für Temperaturschwankungen oder Sediment Resuspensionen sind (Schönborn & Risse-Buhl 2013; Exley et al. 2021 a). In Flachseen sorgen die Lichtverhältnisse und der Nährstoffgehalt häufiger für Algenblüten und der Wind kann aufgrund der geringen Wassertiefe für eine ständige Zirkulation sorgen (Schönborn & Risse-Buhl 2013). Die Charakteristik eines solchen Gewässers ähnelt eher den Eigenschaften des Litorals der geschichteten Seen. Das Licht dringt bei eutrophen flachen Standgewässern ungefähr bis in eine Tiefe von 8 m ein, daher kann bei den richtigen Lichtverhältnissen der Gewässerboden durch Makrophyten besiedelt sein (Schönborn & Risse-Buhl 2013). Die klassische pelagische oder die mikrobielle Nahrungskette der Bodenzone im Ökosystem von stehenden Gewässern baut auf dem Phytoplankton, den höheren Pflanzen und den verfügbaren Nährstoffen (Pflanzenmaterial und sedimentierte Organismenreste) auf (Schwoerbel & Brendelberger 2013; Schönborn & Risse-Buhl 2014). Auf diese Produzenten folgen die Konsumenten, beginnend mit den pflanzenfressenden Organismen und Bakterien als sogenannte Primärkonsumenten, danach folgt die Gruppe der

Sekundärkonsumenten, der fleischfressenden Organismen und die pelagischen oder benthisches lebenden Fische. Am Ende der Nahrungskette stehen Raubfische als Endkonsumenten. Die vorhandenen Ressourcen und der Fraßdruck durch die Konsumenten limitieren die Biomasseproduktion (Schwoerbel & Brendelberger 2013). Eine indirekte Begünstigung oder Beeinträchtigung einer Organismengruppe durch z.B. die thermischen Veränderungen einer FPV-Anlage kann durch einen "Kaskadeneffekt" Einfluss auf eine andere Organismengruppe in direkter Nahrungsbeziehung haben und dadurch die gesamte Konsumkette beeinflussen (Schwoerbel & Brendelberger 2013).

Erste Vorhersagen über die potenziellen Auswirkungen von FPV auf die Flora und Fauna vermuten einen Rückgang der Biomasse von Wasserpflanzen direkt unterhalb der Anlage und im Benthos des Gewässers (Ziar et al. 2020), eine höhere Sterblichkeit bei Fischen aufgrund der höheren Wahrscheinlichkeit einer Hypoxie unter den FPV-Anlagen (Da Silva & Branco et al. 2018; Ziar et al. 2020) und eine Verringerung der Wachstumsraten aller aquatischen Lebewesen (Cuce et al. 2022). Im Gegensatz zur natürlichen Beschattung von Gewässern besteht der Unterschied bei künstlichen Überwasser- oder Schwimmstrukturen darin, dass ein großer Teil oder die Gesamtheit des einfallenden Lichts über eine große Fläche blockiert werden kann (Cuce et al. 2022). Ein Vergleich dazu wären zugefrorene Seen, bei denen es häufiger zu einer Sauerstoffverarmung kommt, einem dem wichtigsten Faktor für das Auftreten von Fischsterben (Exley et al. 2021 b). Eine Eisbedeckung isoliert den Wasserkörper in den Wintermonaten vollständig von der Luft, während sich FPV-Abdeckungen nicht vollständig über die Wasseroberfläche erstrecken und sich dieser Vergleich damit nur für extreme Anlagendimensionen eignet. Nachweislich können Eisbedeckungen im Winter mit einer Lichttransmissionsreduzierung von 53 % - 82 % (Lenard & Wojciechowska 2013) oder auch Ansammlungen schwimmender Makrophyten (Pinto et al. 2007) die Phytoplanktondichte, Biomasse und Chlorophyll a-Konzentration verringern. Dieser Vergleich gilt nur für hohe Oberflächenbedeckungen (> 90 %) welche die Wassertemperatur und die Windgeschwindigkeiten so weit reduzieren, dass die Wassertemperatur merklich abfällt und die Bildung von Eisdecken gefördert wird (Exley et al. 2021 a). Es fehlen jedoch detaillierte Studien oder Modellierungen einzelner Standgewässer, so dass die Gefahr einer Anoxie durch FPV nicht eindeutig ist (Armstrong et al. 2020). Daher wird empfohlen, eine vollständige Abdeckung durch FPV möglichst zu vermeiden, um die Fische nicht zu beeinträchtigen (da Silva & Branco 2018) und extreme Sauerstoffdefizite von vornherein auszuschließen.

Nach Exley et al. (2021 b) sind die biologischen Auswirkungen von Oberflächenabdeckungen auf drei Ebenen festgestellt worden: Phytoplankton, Zooplankton und Fische. Die Ausnutzung der planktischen Primärproduktion durch Konsumenten wie das Zooplankton hängt von einer Reihe von Faktoren ab (Schwoerbel & Brendelberger 2013). Die Fressbarkeit, Assimilierbarkeit und die Algenkonzentration im Gewässer sind für sie von Bedeutung. Ein oligotropher

See mit geringer Algenbiomasse und ein eutropher See mit hoher Algenbiomasse sind für das filtrierende Zooplankton stark unterschiedliche Lebensräume, sodass pauschale Aussagen über die Wirkung von FPV in diesem Kontext nicht möglich sind. Auch im Sommer oder Winter ändern sich die Zusammensetzungen des Phytoplanktons und damit auch die Artenzusammensetzung der Zooplankter. Da FPVs zum Beispiel die Wassertemperatur verringern, indem sie die Sonneneinstrahlung zu großen Teilen blockieren, kann es zu einem Rückgang und zu einer Veränderung der Zusammensetzung des Zooplanktons kommen. Haberman & Haldna (2017) konnten nachweisen, dass ein Rückgang der Wassertemperatur um 1 °C in einem polymiktischen flachen See zu einem Rückgang der Zooplanktondichte im Herbst um 9 % führt. Während ein Anstieg der Temperatur um einen Grad im Frühjahr die Zooplanktonabundanz um 27 % erhöhte (Haberman & Haldna 2017). Die Untersuchungen zeigten einen signifikanten Einfluss der Temperatur auf die Entwicklung des Zooplanktonvorkommens und eine Korrelation zwischen den jahreszeitlichen Temperaturveränderungen, den Zooplanktonarten und Zooplanktontaxa. Im Frühjahr und Herbst bestimmen abiotische Faktoren wie die Temperatur die Zusammensetzung und Verteilung der Zooplanktongemeinschaft und in den Sommermonaten spielen biotische Faktoren wie Nahrung und Prädation eine bedeutende Rolle (Haberman & Haldna 2017). Eine FPV-Anlage könnte also das Vorkommen von Makrophyten, Phytoplankton und Zooplankton verringern, indem es das Sonnenlicht blockiert und die Wassertemperatur senkt.

3.4.1 Auswirkungen von FPV auf Fische

Künstliche Strukturen bieten Fischen einen stabilen Lebensraum mit geringeren täglichen Temperaturschwankungen und niedrigeren Wassertemperaturen als im Vergleich zum offenen Wasser (Ahn et al. 2018). Daher sind Sichtungen von Fischen jeder Altersgruppe unter Unterständen wie FPV-Anlagen (Rosa-Clot 2020; de Lima et al. 2021) und schwimmenden Häusern (de Lima et al. 2022) zu erwarten. Eine FPV-Anlage könnte die Fische vor räuberischen Vögeln schützen (Pringle et al. 2017). Gleichzeitig könnte die dunklere Umgebung die Nahrungsaufnahme als auch die Räubervermeidung beeinträchtigen (Ono & Simenstad 2014; Munsch et al. 2017) und damit das generelle Verhalten der Fische beeinflusst werden (Watz et al. 2015; Pringle et al. 2017). Es wurden bereits viele sessile Organismen an schwimmenden Strukturen wie Häusern gefunden (z. B. Dreikantmuscheln), die auch für Zooplankton und Schwebegarnelen attraktiv waren (Wang et al. 2021; De Liam et al. 2022). Dabei wurde beobachtet, dass unterschiedliche Materialien einen Einfluss auf die Art und Menge der Vegetation auf der Oberfläche dieser Strukturen haben. Auch in einer marinen

Umgebung könnten schwimmende Installationen als geschützte Lebensräume für Fische dienen und eine Plattform für Muscheln und Seegras bieten (Vo et al. 2021).

Die Habitatnutzung junger Fische wie Barsch und Rotauge am Ufer variiert zwischen Tag und Nacht (Lewin et al. 2004). Tagsüber nutzten beide Arten strukturierte Lebensräume aus Gehölzen und nachts wurden vor allem offene Habitate von den Fischen angesteuert. In den USA wurden durch das Wisconsin Department of Natural Resources und die örtliche Land- und Wasserschutzbehörde die Auswirkungen von insgesamt 39 Stegen oder Bootsanlegestellen auf aquatische Organismen untersucht (Garrison et al. 2005). Die Beschattung der Stege verringerte die durchschnittliche Lichtintensität (PAR) in einer Wassertiefe von 45,7 cm - 152,4 cm unter den Strukturen um 38 % - 44 % zu den unbedeckten Kontrollstellen. Die Beschattung nahm weiter zu, je näher das Deck des Piers an der Wasseroberfläche lag. Die durchschnittliche Makrophytenbedeckung betrug 14 % - 25 % unter den Strukturen und durchschnittlich 85 % in den Kontrollflächen. In den Kontrollgebieten wurden deutlich mehr Makroinvertebraten und durchschnittlich 43 - 90 Organismen gefunden, während es unter den Stegen nur 19 - 30 Organismen waren. Auch bei Fischfängen mit einer Reuse wurden unter den Stegen weniger Fische gefangen als in den Kontrollgebieten. Die Ergebnisse zeigten, dass mehr Fische in unmittelbarer Nähe zu nicht fragmentierten Habitaten und Uferabschnitten mit geringerer Stegdichte vorkommen. Eine Bebauung der Litoralzone eines Sees kann somit Auswirkungen auf Makrophyten, Makroinvertebraten und letztlich auf den Lebensraum von Fischen haben. Die Wahl des Lebensraums der Fische ist artabhängig (Schwoerbel & Brendelberger 2013). Dennoch sollte eine Installation von FPV im Uferbereich vermieden werden. Welche Auswirkungen die Veränderungen in der thermodynamischen Struktur und der Nahrungskette eines Sees durch FPV auf den Lebensraum von Fischen und weiteren Tiergruppen im Gewässer hat, wurde bisher gar nicht oder nur unzureichend untersucht.

3.4.2 Auswirkungen von FPV auf Vögel

Die Umweltauswirkungen einer FPV-Anlage auf Wildtiere wie Vögel, die ein stehendes Gewässer als natürlichen Lebensraum nutzen, sind kaum untersucht worden, sodass keine abschließende Bewertung vorgenommen werden kann. Die Gefahr, dass Vögel mit den Solaranlagen kollidieren und dadurch die Mortalitätsrate gesteigert wird, wurde bisher nur an großen Anlagen an Land untersucht, zu FPV gibt es bisher keine Studien. Kosciuch et al. (2020) hat Daten aus 13 Jahren aus zwei US-amerikanischen Staaten von 10 USSE- „utility-scale solar energy“ Photovoltaik-Anlagen zur Vogelsterblichkeit ausgewertet. Die durchschnittliche jährliche Sterblichkeitsrate bekannter und unbekannter Todesursachen lag bei 2,49 Vögeln pro Megawatt (Kosciuch et al. 2020). In den Vorjahren wurde eine Gesamtsterblichkeit von 9,9

Vögeln pro Megawatt festgestellt, allerdings wurde dabei die gesamte umliegende Infrastruktur (Stromleitungen & Zäune) miteinbezogen (Walston et al. 2016). Grundsätzlich war die Mortalität von Vögeln durch Photovoltaik-Paneele, d.h. durch den Aufprall, ähnlich hoch einzuschätzen wie im Windenergiesektor (Kosciuch et al. 2020).

Der massive Eintrag von Vogelkot führte an einer FPV-Anlage zu einer teilweisen Beschattung der FPV-Module, was innerhalb von etwa 10 Tagen zu einem Leistungsrückgang von mehr als 10 % führte (Liu et al. 2018). Außerdem kann Vogelkot 25 % bis 34 % der externen Phosphorbelastung eines städtischen Sees ausmachen und bei der Reinigung des FPV-Systems oder bei starken Regenfällen ins Wasser gelangen und eine zusätzliche Nährstoffbelastung darstellen (Scherer et al. 1995; Exley et al. 2021 b). In einer Studie konnten künstliche Pflanzeninseln einen Lebensraum für Wasservögel wie Weißschnabel- und Mandarinenten bieten und Nahrungsressourcen bereitstellen (Kim et al. 2019). Die trockenen Pflanzeninseln wurden hauptsächlich als Ruheplatz und nicht als Nahrungsgebiet genutzt. Es ist denkbar, dass FPV-Anlagen ähnlich wie künstliche Inseln, einen Rückzugsort bieten und den Lebensraum verbessern. Die Präsenz von Vögeln wurde wiederholt durch Kamerafallen (Ziar et al. 2020) an FPV-Anlagen nachgewiesen. In Italien wurde sogar ein Möwennest unterhalb der Solarmodule beobachtet (Rosa-Clot 2020) und auch von de Lima et al. (2021) in den Niederlanden wurden mehrmals Vögel und Enten auf und unterhalb der schwimmenden Strukturen gesichtet. Die Tiere nutzten die geschützten Bereiche der FPV-Anlagen als Orte zum Ausruhen und Nisten.

Die Ergebnisse legen nahe, dass die Vögel durch die FPV-Systeme nicht erheblich gestört oder durch die Module gefährdet werden. Allerdings können die Aktivitäten der Vögel zur Degradation der Module und zur Verringerung der Energieerzeugung beitragen (Liu et al. 2018). Der Auswirkungen von Vogelnestern und Hinterlassenschaften waren auf den Modulflächen mit geringerem Neigungswinkel und geringerem Abstand zum Wasser intensiver. Laut Ziar et al. (2020) kann zur schonenden Kontrolle der Anwesenheit von Vögeln auf den Moduloberflächen der Abstand zum Wasser und der Neigungswinkel der Paneele verändert werden, und ein "Wasservorhang" könnte die Module kühlen und die Anlage von Vogelkot befreien.

3.4.3 Aquavoltaik

Während die FPV-Industrie zunehmend stärker ausgebaut wird, fehlt es bisher fast vollständig an Studien über die ökologischen Auswirkungen von FPV auf Fischteichen, der sogenannten Aquavoltaik (Château et al. 2019; Rosa-Clot 2020), welche die Kombination aus Aquakulturen zur tierischen Lebensmittelproduktion z.B. zur Fischzucht und FPV beschreibt. Das Ziel der Aquavoltaik ist die effiziente wirtschaftliche Nutzung von Wasser für die Ernährung als auch für die Energieerzeugung (Rosa-Clot 2020). Die heimische Aquavoltaik in Baden-Württemberg

(Bundesland) kann nachweislich nachhaltige tierische Lebensmittel produzieren (Wind et al. 2022). Die Forellenproduktion konnte durch Futtermittel mit einem hohen Fischmehlanteil (35 % Fischmehl & 65 % pflanzliche Komponenten) und der Stromproduktion aus einer FPV-Anlage (Abdeckungsgrad von 40 %) die CO₂-Emissionen auf 1,18 kg CO₂ pro Kilogramm Forelle um 34,8 % reduzieren, deutlich geringer im Vergleich zu Rind (20 kg CO₂/kg) oder Schwein (4 kg CO₂/kg). Zusätzlich bedeutet die Beschattung der FPV-Anlage eine geringe Wassertemperatur und weniger Prädationsdruck für die Fische (Wind et al. 2022). In Studien von Château et al. (2019) und Wang et al. (2021) aus Taiwan wurden u. a. Milchfische (*Chanos chanos*) einer FPV-Abdeckung von 40 % ausgesetzt, die aus Hydrelion-Schwimmkörpern bestand (Abb. 2 B). Seichte Fischzuchtteiche sind eine kontrollierte aquatische Umwelt für Fische, die an warme Wassertemperaturen von 25 °C bis 31 °C angepasst sind und denen Nährstoffe zugeführt werden, um die Wachstumsrate zu erhöhen (Pringle et al. 2017; Château et al. 2019). Sowohl im Sommer als auch im Winter nahmen die Wassertemperatur, der gelöste Sauerstoff, die Chlorophyll a-Konzentration, die Anzahl der Fische und die Menge der Schwebstoffe im Wasser mit zunehmender Abdeckungsfläche ab (Château et al. 2019). Eine FPV-Bedeckung von 40 % führte dazu, dass die Konzentration des gelösten Sauerstoffs an einem Wintertag um durchschnittlich 0,26 mg/L (von etwa 7,4 mg/L auf 7,14 mg/L) und an einem Sommertag um 0,31 mg/L (von 7 mg/L auf 6,69 mg/L) abnahm. Die durchschnittliche Wassertemperatur war unter der Abdeckung dauerhaft um durchschnittlich 0,3 °C niedriger. Diese kühlende Wirkung verringerte den Appetit der Fische und damit ihr Wachstum. Das mathematische Modell von Château et al. (2019) ergab, dass auch bei einer größeren FPV-Abdeckung von 60 % der gesamten Wasseroberfläche die Fischproduktion um 10 % fällt und die ganzjährige Produktivität bei über 70 % erhalten bleibt. Wang et al. (2021) untersuchten die Auswirkungen der Beschattung auf die Wasserqualität und drei verschiedene Fischarten über drei Monate mit Schwimmern, die mit einem schwarzen HDPE-Netz mit 95 % Beschattung abgedeckt waren. Die Ergebnisse zeigten signifikant niedrigere Temperaturspitzen bei einer Wassertiefe von 20 cm bis 30 cm in allen Teichen im Vergleich zu den Kontrollteichen, die Differenzen betragen - 4,9 °C und - 2,1 °C in der Spitze und gleichbleibenden niedrigen Temperaturen bei 24,3 °C - 24,9 °C. Die tägliche durchschnittliche Wassertemperatur war an zwei Standorten um 0,7 °C und 1,4 °C niedriger. Die verringerte Sonneneinstrahlung führte zu einem Rückgang des Phytoplanktons, damit zu einem Rückgang der Photosynthese und des gelösten Sauerstoffs (Château et al. 2019; Wang et al. 2021). Dabei bedeutet eine verringerte Phytoplankton-Biomasse und ein Anstieg des Gesamtstickstoffs bei steigenden Abdeckungsgraden, dass weniger Ammoniak durch das Phytoplankton assimiliert werden konnte (Château et al. 2019). Infolgedessen könnte sich für Fische toxischer Ammoniumstickstoff bilden. Während der Studien führten die niedrigeren Wassertemperaturen jedoch zu einer stabilen Umgebung an den besonders heißen Tagen und somit zu einer verbesserten Nahrungsaufnahme

der Zielarten, die ansonsten unter Extrembedingungen reduziert wäre. Wang et al. (2021) schlussfolgerten, dass eine FPV-Anlage hohe Temperaturspitzen und Schwankungen der Wasserqualität abmildern könnte, welche sonst diverse Stressantworten und damit verbundene Produktionseinbußen in der Aquakultur verursachen würden. Die Überlebensrate stieg für alle drei kultivierten Arten in den mit FPV abgedeckten Teichen um 0,9 % und die Produktion war um 1,1-fach - 1,4-fach höher als in den Kontrollteichen ohne Abdeckung (Wang et al. 2021). In der Studie von Château et al. (2019) wurden die biochemischen Auswirkungen eines FPV-Systems auf den Zustand eines Teichs mit Milchfischen (*Chanos chanos*) untersucht. Wang et al. (2021) untersuchten neben anderen Arten auch Milchfische, belüfteten jedoch alle untersuchten Teiche und speisten Regenwasser ein, um die Verdunstungsverluste auszugleichen, was wahrscheinlich einen stärkeren Rückgang der Sauerstoffkonzentration und damit eine Produktionsverringerung verhinderte. Ein FPV-System von 40 % - 60 % würde in einem Gewässer ohne künstliche Sauerstoffzufuhr und Zufütterung wahrscheinlich zu einem leichten bis mäßigen Rückgang des Fischbestands führen.

3.5 Analysetool aus einem europäischen Nachbarland und Auswertung der Anwendungsbeispiele

Jedes Jahr publiziert die niederländische Umweltprüfungsbehörde „*Planbureau voor de Leefomgeving*“ (PBL) eine Zusammenfassung über die aktuelle Klima- und Energielage der Niederlande (Overveld et al. 2021). Es wurde festgestellt, dass zur Erreichung des europäischen „Green Deal“ und zur Klimaneutralität bis zum Jahr 2050 in den Niederlanden die CO²-Emissionen rasant abnehmen müssen. Um die gemeinsamen Ziele der Europäischen Union noch rechtzeitig zu erreichen, müssen die Niederlande in den kommenden Jahren ihre Emissionen doppelt so schnell reduzieren wie beispielsweise Schweden, um den Übergang von fossiler zur nachhaltigen Energie zu bewältigen. Die Stiftung STOWA ist ein nationales Netzwerk aus Regierungsbehörden, Unternehmen und Forschungseinrichtungen und bildet das Fachzentrum für die angewandte Wasserforschung und Wasserwirtschaft in den Niederlanden (Loos & Wortelboer 2018). Unter dem Arbeitstitel „*Zon op Water*“ (Sonne auf Wasser) haben einige Wasserverbände und die Behörde Rijkswaterstaat ein gemeinsames Projekt gestartet. Das Ziel ist es, die finanziellen und ökologischen Aspekte von schwimmenden Solaranlagen auf ihre Durchführbarkeit und ihre Auswirkungen auf die Wasserqualität und Ökologie zu untersuchen. Als Ergebnis ist ein Leitfaden für die Genehmigung von schwimmenden Solarparks entstanden. Loos & Wortelboer (2018) fassen in ihrer Studie die Umwelt- und Rechtsvorschriften der Niederlande in einem Flussdiagramm zusammen und entwickelten ein Analysewerk-

zeug, um die Auswirkungen von schwimmenden Solarparks auf Oberflächengewässer berechnen zu können. Damit soll die Beantragung, Genehmigung, Entwicklung und die Investitionsbereitschaft für schwimmende Solarparks verbessert und unterstützt werden. Für alle im Analysetool definierten Wasserqualitätsindikatoren (Tab. 3) zeigt das Tool die erwartete positive oder negative Veränderung als Δ -Differenz nach der Installation einer FPV-Anlage im Vergleich zur Referenzsituation ohne Anlage an.

Tab. 3: Auflistung der Indikatoren des Analyse-Tools 'Zun op Water' mit dazugehörigen Einheiten (Wortelboer et al. 2018). Die Indikatoren (Ind.) 3 und 5 sind in a bis c Abschnitte für Obere-, mittlere und Bodenwasserschichten unterteilt. Indikator 6 a - f sind unterteilt in Intensität und Anteil bei verschiedenen Grenzwerten für die gelöste Sauerstoffkonzentration. Indikator 7 a - c sind nach der gesamten Chlorophyll a-Konzentration, außerhalb und unterhalb des PV-Systems eingeteilt.

Nr.	Indikatoren	Einheit
1	Anteil der für Wasserpflanzen geeigneten Bodenoberfläche	--
2	Durchschnittliche Lichtintensität unter der PV-Anlage	[W/m ²]
3 (a - c)	Durchschnittliche Wassertemperatur im Sommerhalbjahr (April-September)	[°C]
4	Maximale Wassertemperatur im Sommerhalbjahr (April-September)	[°C]
5 (a - c)	Durchschnittlicher Sauerstoffgehalt im Wasser in verschiedenen Tiefen	[mg/L]
6 (a - f)	Boden in den unteren Wasserschichten in dem Sauerstoffmangel auftritt für Grenzwerte von 3; 5 & 6 mg/L	--
7 (a - c)	Chlorophyll a-Konzentration im Sommerhalbjahr, Oberflächenschicht	[µg/L]

Das niederländische Modell, das auf Microsoft Excel und insgesamt 736 Modellläufen basiert, wurde auf den typischen Baggersee von Nikolaus et al. (2021) aus Abschnitt 2.2.1 angewendet. Im Bundesland Niedersachsen gibt es eine Vielzahl von künstlichen oberirdischen Stillgewässern, entstanden durch den Abbau von Quarz, Sand, Kies oder Naturstein (Nikolaus et al. 2020; Theis 2021). Eine Erfassung von Kartenmaterial über Niedersachsen konnte 313 Baggerseen mit einer Größe von > 10 ha und einer Gesamtwasserfläche von 5.919,3 ha identifizieren, außerdem wurden 14 Baggerseen mit einer Größe von > 50 ha und einer Fläche von 1.332,6 ha, 24 Talsperren mit einer Größe von > 10 ha - > 50 ha und mit einer Gesamtfläche

von 1.559,6 ha festgestellt (Nikolaus et al. 2020). Insgesamt kommt Niedersachsen auf eine Anzahl von 37.973 Gewässern mit einer Fläche von 29.434,2 ha. Der größte Teil der Oberflächengewässer sind potenziell künstliche Gewässer mit einer Größe von 0 ha - 10 ha, diese machen 48,04 % (14.141 ha) aus. Baggerseen und Talsperren mit der Größe > 10 bis > 50 ha haben insgesamt eine Fläche von 8811,5 ha (29,93 %) und Naturseen der Größe > 10 - > 50 ha sind mit einer Fläche von 6.481,7 ha (22,02 %) in Niedersachsen ausgemacht worden.

Für den fiktiven Baggersee in Niedersachsen mit einer kleinen Fläche von bis zu 10 ha, einer Tiefe bis zu 10 m und einem mesotrophen Nährstoffstatus sind nach den Ergebnissen des ersten Anwendungsbeispiels (Abb. 5) nur geringe Auswirkungen auf die Wasserqualität und die Ökologie des Gewässers durch eine FPV-Anlage mit einem Abdeckungsgrad von 25 % zu erwarten.

Analyse-Tool Sonne auf Wasser				
Eigenschaften des Gebiets				
Größe des Gewässers		10 ha		
Maximale Tiefe		10 m		
Nährstoffstatus	Mesotroph			
Bodentyp	Sand			
Eingabe der PV-Eigenschaften				
Fläche des PV-Systems		25 % der Wasseroberfläche	(= 25000 m ²)	
Lichtdurchlässigkeit PV-System		25 % vom auftreffenden Licht (Paneele + Konstruktion)		
Ergebnisse anzeigen				
Indikator	Referenz	PV	Δ	Δ (%) Beschreibung
1	0,28	0,25	-0,02 ▼	-8,0 Anteil der geeigneten Bodenfläche für Wasserpflanzen [-]
2	79,02	21,97	-57,05 ▼	-72,2 Durchschnittliche Lichtintensität unter der PV-Anlage [W/m2]
3a	17,56	17,91	0,35 ▲	2,0 Durchschnittliche Wassertemperatur im Sommerhalbjahr (Apr-Sep) (Oberflächenschicht) [°C]
3b	13,95	15,66	1,71 ▲	12,3 Durchschnittliche Wassertemperatur im Sommerhalbjahr (Apr-Sep) (mittlere Schicht) [°C]
3c	11,81	14,24	2,43 ▲	20,6 Durchschnittliche Wassertemperatur im Sommerhalbjahr (Apr-Sep) (Bodenschicht) [°C]
4	28,71	28,57	-0,14 ▬	-0,5 Maximale Wassertemperatur im Sommerhalbjahr (Apr-Sep) [°C]
5a	8,48	8,76	0,28 ▲	3,3 Durchschnittlicher Sauerstoffgehalt des Wassers in verschiedenen Tiefen (Oberflächenschicht) [mg/l]
5b	9,18	9,17	0,00 ▬	0,0 Durchschnittlicher Sauerstoffgehalt des Wassers in verschiedenen Tiefen (mittlere Schicht) [mg/l]
5c	7,67	7,70	0,03 ▬	0,4 Durchschnittlicher Sauerstoffgehalt im Wasser in verschiedenen Tiefen (Bodenschicht) [mg/l]
6a	0,21	0,30	0,09 ▲	40,5 Anteil des Bodenareals in den unteren Wasserschichten die sauerstoffarm sind (Grenzwert: 6 mg/l) [-]
6b	0,03	0,04	0,00 ▲	10,8 Intensität in den unteren Wasserschichten, in denen Sauerstoffmangel auftritt (Grenzwert: 6 mg/l) [-]
6c	0,21	0,21	0,00 ▬	0,6 Anteil des Bodenareals in den unteren Wasserschichten die sauerstoffarm sind (Grenzwert: 5 mg/l) [-]
6d	0,02	0,02	0,01 ▲	36,6 Intensität in den unteren Wasserschichten, in denen Sauerstoffmangel auftritt (Grenzwert: 5 mg/l) [-]
6e	0,00	0,06	0,06 ▲	4740,0 Anteil des Bodenareals in den unteren Wasserschichten die sauerstoffarm sind (Grenze: 3°C) [-]
6f	0,00	0,00	0,00 ▲	41789,1 Intensität in den unteren Wasserschichten, in denen Sauerstoffmangel auftritt (Grenzwert: 3 mg/l) [-]
7a	12,61	13,90	1,29 ▲	10,2 Chlorophyll-a-Konzentration im Sommerhalbjahr, Oberflächenschicht, gesamt [ug/l]
7b	12,61	17,50	4,90 ▲	38,8 Chlorophyll-a-Konzentration im Sommerhalbjahr, Oberflächenschicht, außerhalb des PV [ug/l]
7c	0,00	13,01	13,01 ▲	nvt. Chlorophyll-a-Konzentration im Sommerhalbjahr, Oberflächenschicht, unter PV [ug/l]

Abb. 5: Analyse-Tool 'Zon op Water' ('Sonne auf Wasser') von Loos & Wortelboer (2018) basierend auf Microsoft Excel mit den Ergebnissen des ersten Anwendungsbeispiels (übersetzt aus dem Niederländischen).

Die roten Symbole zeigen, dass der Anteil der für Wasserpflanzen geeigneten Bodenfläche im Vergleich zur Referenzsituation leicht reduziert wird (Ind. 1: - 8 %). Die durchschnittliche Lichtintensität unter der FPV-Anlage nimmt ab (Ind. 2: - 72,2 %). Ein relativ kleines System oberhalb besonders ausgeprägter Tiefenzonen eines Sees ist in der Wirkung jedoch vernachlässigbar (Loos & Wortelboer 2018). Dabei simuliert das Tool den ungünstigen Fall, bei dem eine FPV-Anlage in der Nähe des Ufers, im flachen und lichtreichen Teil des Baggersees

platziert wird. Somit müsste eine FPV-Anlage nach Loos & Wortelboer (2018) in der Mitte eines Gewässers über dem tiefsten Teil noch weniger Auswirkungen auf die Wasserpflanzen haben. Bei flachen Seen ist der Effekt größer, da im Prinzip der gesamte Boden mit Wasserpflanzen bedeckt sein kann. Die durchschnittliche Wassertemperatur im Sommerhalbjahr steigt in der Oberflächenschicht leicht an (Ind. 3a - c: 1,7 °C - 2,43 °C), mit einer Zunahme der Temperaturen zu den tieferen Wasserschichten hin. Diese Werte sind mit einem grünen Symbol gekennzeichnet. Eine Erhöhung der Wassertemperatur wird damit erklärt, dass sich die FPV im Sommer tagsüber erwärmt, diese Wärme wieder an das Wasser abgibt und sich das verdunstete Wasser unter der Anlage staut, wodurch der Kühleffekt aufgehoben wird (Loos & Wortelboer 2018). Die maximale Wassertemperatur nahm allerdings durch die FPV-Abdeckung nicht zu (Ind. 4: - 0,5 %). Erst bei hohen Abdeckungsgraden (> 50 %) bleibt die Wassertemperatur in flachen Seen tagsüber im Sommer niedriger (Loos & Wortelboer 2018). Dabei wird vom Analysetool nur die Auswirkung der Bestrahlung auf die Wassertemperatur berücksichtigt. Der durchschnittliche Sauerstoffgehalt steigt durch die FPV-Anlage nur in der Oberflächenschicht leicht (Ind. 5a: 3,3 %) an und bleibt in den tieferen Wasserschichten (Ind. 5b - c) nahezu unverändert. In kleinen und mittelgroßen Seen nimmt der Sauerstoffgehalt mit zunehmender Bedeckung vor allem in den oberen Wasserschichten zu (Loos & Wortelboer 2018). Die FPV-Abdeckung wirkt sich auf die Algenblüte in der Wassersäule aus und verringert den Sauerstoffbedarf des Bodens, was wiederum zu Veränderungen in der Primärproduktion des Phytoplanktons führt (erhöhte Sauerstoffproduktion) und die Fläche der sommerlichen Sauerstoffverarmung am Boden verringert. Der Anteil des Bodenareals und die Intensität in den unteren Wasserschichten, in denen ein Sauerstoffmangel auftritt, nimmt für alle Grenzwerte somit leicht bis sehr stark ab (Ind. 6a - f). Nur der Indikator 6c bei einem Grenzwert von 5 mg/L bleibt unverändert. Die horizontale Wasserdurchmischung ermöglicht es, dass sich auch Algen unter der FPV-Anlage befinden können (Loos & Wortelboer 2018). Ein höherer Chlorophyll a-Gehalt im Wasser bedeutet, dass mehr Nahrung vorhanden ist für Zooplankton und damit auch für Fische und Vögel. Die Chlorophyll-a-Konzentrationen im Sommerhalbjahr steigen in der Oberflächenschicht bei einer Abdeckung von 25 % und einer Lichtdurchlässigkeit des PV-Systems von 25 % im gesamten Gewässer um 1,29 µg/L (Ind. 7a: 10,2 %), außerhalb des PV-Systems um 4,9 µg/L (Ind. 7b: 38,8 %) und unter dem FPV befindet sich eine Chlorophyll a-Konzentration, die in etwa ein Drittel der Konzentration außerhalb der FPV entspricht.

Das Ergebnis widerspricht der vorherigen Literaturrecherche. Ein verringerter Lichteinfall in das Gewässer reduzierte grundsätzlich die Temperatur und die Photosyntheserate (Li et al. 2011; Ziar et al. 2020; de Lima et al. 2021; Exley et al. 2021 a; Andini et al. 2022). Gleichzeitig fällt der Sauerstoffgehalt im Benthos, außer wenn der Kühlungseffekt die Temperatur so stark senkt, dass mehr Sauerstoff gelöst werden konnte.

Das zweite Anwendungsbeispiel ist in Abb. 6 zu sehen und zeigt die Ergebnisse der Auswirkungen einer FPV auf den Baggersee mit einem eutrophen Nährstoffstatus. Die geeignete Bodenfläche für Wasserpflanzen (Ind. 1: - 6,4 %) und die Lichtintensität unter der PV-Anlage (Ind. 2: - 41,18 %) zeigen bessere Werte (+ 1,6 %) im Vergleich zum ersten mesotrophen Beispielsee. Die durchschnittliche und maximale Wassertemperatur (Ind. 3a – c & 4) bleiben bei diesem Anwendungsbeispiel unverändert und scheinen nur mit den Eigenschaften des PV-Systems verbunden zu sein. Erst die Werte für den durchschnittlichen Sauerstoffgehalt in verschiedenen Tiefen zeigen einen deutlichen Unterschied des Sauerstoffgehalts in der gesamten Wassersäule. In der Bodenschicht ist der Sauerstoffgehalt deutlich höher als im ersten Anwendungsbeispiel mit einem mesotrophen Nährstoffstatus (Ind. 5a: 0,68 mg/L; 5b: 0,58 mg/L & 5c: 0,94 mg/L). Der höhere Nährstoffgehalt im Gewässer fördert hier sichtbar die Sauerstoffproduktion der Algen und Wasserpflanzen und damit die durchschnittliche Sauerstoffkonzentration in allen Tiefen. Während das erste Anwendungsbeispiel bei den Indikatoren 6a bis f eine Verbesserung aufweist, nimmt durch den eutrophen Nährstoffstatus vor allem die Intensität des Sauerstoffmangels (Ind. 6b, d & f) in den unteren Wasserschichten im Vergleich zum unbedeckten Gewässer deutlich zu (~ 30 %) und fällt in den negativen Prozentbereich. Eine Abnahme der Sauerstoffkonzentration in den Tiefenwasserschichten durch mikrobielle Abbauprozesse deckt sich mit den Ergebnissen der Literaturrecherche (Schönborn & Risse-Buhl 2013; de Lima et al. 2021; Yang et al. 2022). Ähnlich wie im ersten Beispiel steigt die Chlorophyll a-Konzentration im gesamten See (Ind. 7a: 6,2 %) im Vergleich zur Referenz an. Außerhalb des FPV-Systems sinkt die Konzentration (Ind. 7b: - 9,2 %) und unterhalb des PV-System beträgt die Konzentration des Chlorophylls in etwa 60 % im Vergleich zur gesamten Chlorophyll a-Konzentration. Die Konzentration im eutrophen Gewässer nimmt dabei nur geringfügig zu, dafür befinden sich im Referenzgewässer aufgrund des Nährstoffstatus bereits eine höhere Chlorophyll a-Konzentration im Vergleich zum mesotrophen Gewässer. Nach Loos & Wortelboer (2018) bleibt bei einer FPV-Anlagenabdeckung von > 25 % der Chlorophyll a-Gehalt niedriger bei einer Lichtdurchlässigkeit von 0 % im Vergleich zu einer höheren Lichtdurchlässigkeit. Wenn das gesamte Licht unter dem FPV-System blockiert wird, würde auch die Primärproduktion gehemmt werden. Eine Abdeckung des Wassers durch eine FPV-Anlage verhindert nicht automatisch die Algenblüte in eutrophen Situationen und infolge der horizontalen Wasserdurchmischung können Algen während des Tages noch unter einer FPV-Anlage mit einer Lichtdurchlässigkeit von 0 % bestehen (Loos & Wortelboer 2018).

Eigenschaften des Gebiets				Ansicht der zugrunde liegenden Modellannahmen	
Größe des Gewässers	10 ha			Ergebnisse anzeigen	
Maximale Tiefe	10 m				
Nährstoffstatus	Eutroph				
Bodentyp	Sand				
Eingabe der PV-Eigenschaften					
Fläche des PV-Systems	25 % der Wasseroberfläche	(= 25000 m ²)			
Lichtdurchlässigkeit PV-System	25 % vom auftreffenden Licht (Paneele + Konstruktion)				

Indikator	Referenz	PV	Δ	Δ (%)	Beschreibung
1	0,21	0,20	-0,01 ▼	-6,4	Anteil der geeigneten Bodenfläche für Wasserpflanzen [-]
2	57,82	16,64	-41,18 ▼	-71,2	Durchschnittliche Lichtintensität unter der PV-Anlage [W/m ²]
3a	17,56	17,91	0,35 ▲	2,0	Durchschnittliche Wassertemperatur im Sommerhalbjahr (Apr-Sep) (Oberflächenschicht) [°C]
3b	13,95	15,66	1,71 ▲	12,3	Durchschnittliche Wassertemperatur im Sommerhalbjahr (Apr-Sep) (mittlere Schicht) [°C]
3c	11,81	14,24	2,43 ▲	20,6	Durchschnittliche Wassertemperatur im Sommerhalbjahr (Apr-Sep) (Bodenschicht) [°C]
4	28,71	28,57	-0,14 ▼	-0,5	Maximale Wassertemperatur im Sommerhalbjahr (Apr-Sep) [°C]
5a	9,89	10,57	0,68 ▲	6,9	Durchschnittlicher Sauerstoffgehalt des Wassers in verschiedenen Tiefen (Oberflächenschicht) [mg/l]
5b	9,21	9,79	0,58 ▲	6,3	Durchschnittlicher Sauerstoffgehalt des Wassers in verschiedenen Tiefen (mittlere Schicht) [mg/l]
5c	5,52	6,45	0,94 ▲	17,0	Durchschnittlicher Sauerstoffgehalt im Wasser in verschiedenen Tiefen (Bodenschicht) [mg/l]
6a	0,39	0,39	0,00	0,0	Anteil des Bodenareals in den unteren Wasserschichten die sauerstoffarm sind (Grenzwert: 6 mg/l) [-]
6b	0,14	0,09	-0,05 ▼	-35,2	Intensität in den unteren Wasserschichten, in denen Sauerstoffmangel auftritt (Grenzwert: 6 mg/l) [-]
6c	0,39	0,39	0,00	0,0	Anteil des Bodenareals in den unteren Wasserschichten die sauerstoffarm sind (Grenzwert: 5 mg/l) [-]
6d	0,11	0,07	-0,04 ▼	-34,5	Intensität in den unteren Wasserschichten, in denen Sauerstoffmangel auftritt (Grenzwert: 5 mg/l) [-]
6e	0,30	0,39	0,09 ▲	31,7	Anteil des Bodenareals in den unteren Wasserschichten die sauerstoffarm sind (Grenze: 3°C) [-]
6f	0,07	0,05	-0,02 ▼	-26,7	Intensität in den unteren Wasserschichten, in denen Sauerstoffmangel auftritt (Grenzwert: 3 mg/l) [-]
7a	36,32	38,58	2,26 ▲	6,2	Chlorophyll-a-Konzentration im Sommerhalbjahr, Oberflächenschicht, gesamt [µg/l]
7b	36,32	32,98	-3,34 ▼	-9,2	Chlorophyll-a-Konzentration im Sommerhalbjahr, Oberflächenschicht, außerhalb des PV [µg/l]
7c	0,00	24,96	24,96 ▲	nvt	Chlorophyll-a-Konzentration im Sommerhalbjahr, Oberflächenschicht, unter PV [µg/l]

Abb. 6: Analyse-Tool 'Zon op Water' ('Sonne auf Wasser') von Loos & Wortelboer (2018) basierend auf Microsoft Excel mit den Ergebnissen des dritten Anwendungsbeispiels mit einem eutrophen Nährstoffstatus und einer Lichtdurchlässigkeit des PV-Systems von 25 % (übersetzt aus dem Niederländischen).

Die meisten Abweichungen von der Ausgangssituation treten bei einem Deckungsgrad von 50 % oder mehr auf (Loos & Wortelboer 2018). Der durchschnittliche Sauerstoffgehalt in der Bodenschicht fängt bei hohen Bedeckungsgraden (> 50 %) an abzunehmen und führt in der Folge möglicherweise zur Hypoxie. Alle Ergebnisse zeigten bessere Indikatoren oder nur geringe Verschlechterungen der Wasserqualität, daher wären alle FPV-Systeme in den Anwendungsbeispielen nach Loos & Wortelboer (2018) für den Einsatz geeignet. Erst ein FPV-Abdeckungsgrad von 90 % wirkt sich auf die Wahrscheinlichkeit der Schichtung aus, da der Durchmischungseffekt des Windes entfällt, und hat eine deutliche Auswirkung auf die Temperatur (Absenkung) am Boden des Gewässers (Loos & Wortelboer 2018). In Kombination mit einer Lichtdurchlässigkeit des FPV-Systems von 0 % sind die Auswirkungen so groß, dass die Primärproduktion des Phytoplanktons zusammenbricht und das Nahrungsnetz kaum noch unterstützt werden kann. Die Lichtdurchlässigkeit der FPV-Anlage schwächt die Auswirkungen ab, daher können FPV-Anlagen für einen bestimmten Zweck optimiert werden. Das Handbuch bildet nach Loos & Wortelboer (2018) kein eindeutiges Bewertungsinstrument und ist nicht validiert, sondern ein Hilfsmittel für den Genehmigungsprozess, mit Anleitungen für Antragsteller und Genehmigungsbehörden.

3.6 Übersicht der potenziellen Reaktionen eines Standgewässers auf FPV

FPV-Anlagen stehen grundsätzlich in direkter Konkurrenz zu terrestrischen LBPV-Anlagen. Die Umweltauswirkungen von FPV-Anlagen involvieren komplexe Wechselwirkungen zwischen den physikalischen und biologischen Komponenten des Ökosystems (Armstrong 2020) und den menschlichen Aktivitäten (Exley 2021 b) und sind in hohem Maße von den lokalen Bedingungen der Umwelt abhängig (Nützmann & Moser 2016; Oliveira-Pinto & Stokkermans 2020). Die folgende graphische Darstellung (Abb. 7) zeigt die voraussichtlichen Auswirkungen von FPV auf einen Wasserkörper in den gemäßigten Klimazonen der Erde basierend auf den Erkenntnissen dieser Arbeit.

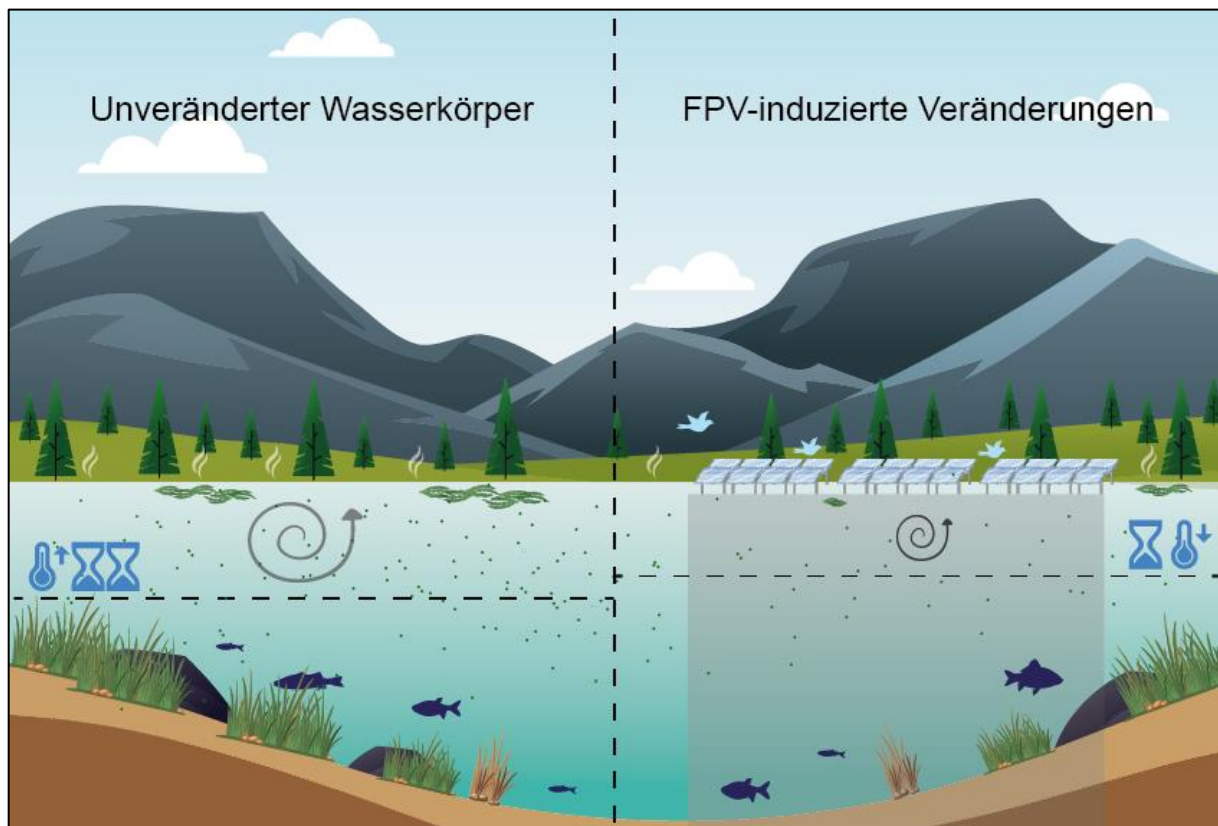


Abb. 7: Die Auswirkungen der Bedeckung eines FPV-Systems auf den Wasserkörper im direkten Vergleich zu einem unbedeckten Wasserkörper nach den Erkenntnissen dieser Bachelorarbeit (eigene Darstellung). Die Beschattung einer FPV-Anlage verringert die Abundanz des Phytoplanktons und die Dichte der Wasserpflanzen am Boden des Gewässers. In der oberen Wasserschicht werden die Algenmenge und die Verdunstung des Wassers durch das FPV-System reduziert. Die Windgeschwindigkeit und die Wassertemperatur unter der FPV-Anlage nehmen ab, wodurch sich die Durchmischungstiefe verringert und die Schichtungsdauer verkürzt.

Grundsätzlich muss die Reaktion der Umwelt auf FPV in Langzeit und in Kurzzeit Auswirkungen unterschieden werden. Die meisten oberirdischen Gewässer in Deutschland sind bereits stark durch menschliche Aktivitäten beeinträchtigt (Wittig & Niekisch 2014) oder sind, wie im Bundesland Niedersachsen, meist vollständig anthropogenen Ursprungs (Nikolaus et al. 2020). Aufgrund der weltweiten Nachfrage nach mineralischen Rohstoffen nimmt die Zahl der künstlich angelegten Baggerseen weiter zu (Theis 2021). Von der Bundesregierung der Bundesrepublik Deutschland sind künstliche und erheblich veränderte Gewässer für die Installation einer FPV-Anlage vorgesehen (Drucksache 20/1630 2022). Eine erste Untersuchung an einem FPV-Standort wie dem Maiwaldsee (Erdgas Südwest 2020; EnBW AG 2021) zeigte, dass sich künstliche Seen gut für eine Anlage eignen (Ilgen et al. 2022). Ein Vergleich von FPV zu LBPV und die Einstellung der Öffentlichkeit zu solchen Systemen werden in den folgenden Abschnitten zusammengefasst.

3.6.1 Gesellschaftliche Akzeptanz von FPV-Anlagen

Die gesellschaftliche Akzeptanz in Verbindung mit dem lokalen Naturschutz sind wichtige Elemente für die Geschwindigkeit des Ausbaus von Photovoltaikanlagen und die Gewinnung von Solarenergie. Dies zeigen Untersuchungen aus den vergangenen Jahren zu Freiflächen-Photovoltaikanlagen wie Solarparks und Agri-Photovoltaik (APV) auf Agrarflächen in Deutschland (Schlegel 2021). Die Wahl des Standortes war dabei von entscheidender Bedeutung für die Akzeptanz der Bevölkerung, bevorzugt wurden in der Vergangenheit intensiv genutzte Flächen mit einer geringen naturschutzfachlichen Bedeutung und hoher Vorbelastung für PV-Anlagen ausgewählt (Schlegel 2021). Nach Angaben des Fraunhofer-Instituts ISE und einer repräsentativen Umfrage von Lichtblick gehören Solaranlagen zu den beliebtesten Kraftwerken bei der Bevölkerung in Deutschland, noch vor Windkraftanlagen (Wirth 2022; Schlegel 2021). Die Einstellungen der bundesdeutschen Gesellschaft zu FPV sind jedoch noch weitgehend unerforscht.

Vor dem Bau einer FPV-Anlage an einem Erholungssee wurden lokale Gemeindemitglieder und Erholungssuchende mit dem Ziel interviewt, die öffentliche Unterstützung für die Einführung eines solchen Pilotprojekts zu untersuchen (Bax et al. 2022). In der einjährigen Testphase wurden Gespräche mit den behördlichen Autoritäten und mit Vertretern der Gemeinschaft geführt. Alle betroffenen Gruppen sprachen dem Gewässer hohe Natur- und Erholungswerte zu. Dabei wiesen einige Geschäftsinhaber und die Mitglieder einer lokalen Protestgruppe auf den Beitrag des Sees zur lokalen Wirtschaft hin, während die Tauchsportler den Bildungswert des Sees betonten. Im Gegensatz zu konventionellen Solaranlagen auf reservierten Flächen wie

Ackerland und Land entlang von Autobahnen sind Seen, insbesondere Erholungsgewässer, Orte, an denen verschiedene Nutzungen und Nutzergruppen zusammenkommen (Bax et al. 2022). Im Allgemeinen wurde die Entwicklung von erneuerbaren Energien von der Gemeinschaft als Chance für Beschäftigungsmöglichkeiten, vergünstigte Energietarife und anderen finanziellen Anreizen gesehen. Die lokalen Autoritäten erhoffen sich mit dem Projekt positiv auf die biologische Vielfalt des Sees und den Lebensraum einzuwirken. Viele der Interessengruppen sahen die Generierung von Wissen als weiteren Vorteil des Projekts. Die landschaftlichen Auswirkungen von FPV, dem visuellen Aspekt der Infrastruktur, wurden von den Erholungssuchenden hauptsächlich aus einer negativen Perspektive betrachtet (Bax et al. 2022). Unternehmer bewerteten die Auswirkungen in erster Linie unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten, Natur-NGOs richteten ihr Augenmerk vor allem auf ökologische Erwägungen, während die Bedenken der Angler- und Tauchverbände sich darauf bezogen, wie das Pilotprojekt die Freizeitaktivitäten ihrer Mitglieder behindern könnte. Eine zentrale Rolle für Bedenken und gegen die Entwicklung von einem FPV-Projekt waren Unsicherheiten und Wissensdefizite in Bezug auf Nutzen, technische Leistung und vor allem Auswirkungen auf die Umwelt und Lebewesen. Dennoch fiel die Gesamtbeurteilung des Pilotprojekts durch Erholungssuchende weitgehend positiv aus. Ein Vertrauensaufbau in die Technologie der schwimmenden Solaranlagen aus der Rolle der Behörden und der Stadtverwaltung könnte laut Bax et al. (2022) die Bereitschaft für Projekte der erneuerbaren Energien positiv beeinflussen. Eine weltweite Umfrage unter FPV-Betreibern mit Anlagen unterschiedlicher Größe auf vom Menschen geschaffenen Gewässern ergab keine negativen Auswirkungen auf die Wasserkörper (Exley et al. 2021 b). Nur Probleme von technischer Natur bei Betrieb und Wartung wurden gemeldet. Allerdings fand eine spezifische Überwachung nur an zwei Standorten statt, daher könnten potenzielle Auswirkungen auch übersehen worden sein. Auch bei dieser Befragung waren Ungewissheiten in Bezug auf das Potenzial der FPV-Anlagen und nur begrenzte Kenntnisse seitens der Betreiber, was durch eine begrenzte Überwachung der Anlagen untermauert wurde, aufgefallen. Die potenziellen Auswirkungen einer FPV-Anlage, die Verdunstung zu verringern und ein geringes Phytoplanktonwachstums wurden als die größten Chancen in Bezug auf die Auswirkungen auf die Wasserqualität angesehen. Veränderungen der Gewässereigenschaften und -prozesse wie die Nitrifikation und die Hypoxie im Wasser und die Ausbreitung von Blaualgen wurden als potenzielle größte Bedrohung durch FPVs wahrgenommen. Zusätzliche Forschung und eine Ausweitung des Monitorings für das dringend benötigte Verständnis der FPV-spezifischen Auswirkungen auf die Wasserqualität und die Gewässereigenschaften sowie ein stärkerer Fokus auf die betroffenen Nutzergruppen können die Bedrohung für das Ökosystems minimieren, die planerische Umsetzung erleichtern und die Interessen der lokalen Gemeinschaft in Bezug auf den Naturschutz, die Erholung und die lokale Wirtschaft fördern (Exley et al. 2021 b; Bax et al. 2022).

3.6.2 FPV im Vergleich zu konventioneller Photovoltaik

In der Phase der Installation einer Solaranlage kommt es vermehrt und über einen kurzen Zeitraum zu potenziellen Störungen des Ökosystems durch Lärm und Luftverschmutzung durch die Baumaschinen und einer Zunahme der Abfälle aus Überbleibsel aus der Konstruktion (Silvia et al. 2018). Oft werden bei terrestrischen PV-Anlagen Betonfundamente benötigt, die das Gewicht der Struktur tragen, dafür ist wiederum ein höherer Einsatz von schweren Maschinen erforderlich (Schlegel 2021). Bei der Installation eines FPV-Systems besteht die Möglichkeit, dass ein Ankersystem auf dem Grund des Sees und auf dem Boden verlegte Kabel zu einer Veränderung der Wasserqualität durch Umwälzung von Sedimenten und erhöhter Wassertrübung führen (Da Silva & Branco 2018; Cuce et al. 2022). Außerdem besteht bei beiden Systemtypen die Gefahr, dass während der Projektdurchführung Öl und Schmiermittel freigesetzt werden. Der Installationsprozess für FPV ist oft einfacher als der für LBPV, solange die Verankerung und Vertäuung sich nicht als kompliziert gestaltet (WorldBank Group 2019). Ein FPV-System kann an Land montiert und dann in das Gewässer gebracht oder über eine Rampe ins Wasser gerollt werden (Cuce et al. 2022).

Der Abschnitt der langfristigen Auswirkungen und Störungen auf die Umwelt beginnt während und nach der Installationsphase mit dem möglichen Verlust von Lebensraum (Silvia et al. 2018; Cuce et al. 2022). Die Veränderung der Umwelt während der Bauphase kann eine Vielzahl von Auswirkungen auf den Boden, Luft, Wasser, Fauna und Flora haben (Walston et al. 2016; Da Silva & Branco 2018). So kann beispielsweise die Abholzung von Waldgebieten für konventionelle PV-Anlagen als negative Auswirkung angesehen werden. Großflächige Photovoltaik-Anlagen an Land bedeuten umfangreiche Landschaftsveränderungen, die sich auf die Lebensraumqualität und Migrationsrouten der Tiere auswirken und damit zu Verlust und Fragmentierung von Lebensraum führen (Dhar et al. 2020). Die Beseitigung von Vegetation für terrestrische Anlagen führt zu Bodenerosion und zu erhöhtem Stau von Regenwasser. Allerdings können Flächen aus intensiver Landwirtschaft durch eine LBPV-Anlage an Biodiversität zunehmen, sich über einen längeren Zeitraum renaturieren und bei richtiger Bewirtschaftung neue Lebensräume z. B. für bodenbrütende Vögel schaffen (Schlegel 2020; Wirth 2022). Funde aus einer 39 ha großen USSE-Anlage in den Niederlanden belegen, dass Habitatspezialisten unter den Kulturlandvögel wie der Steinschmätzer oder die Feldlerche von Freiflächenanlagen profitierten (Moore-O'Leary et al. 2017).

Schwimmende Strukturen müssen Umwelteinflüssen wie Wind und Wasser widerstehen und sich flexibel an unterschiedliche Wasserstände anpassen können (Sahu et al. 2016; Da Silva & Branco 2018). Mit dem Kontakt zum Wasser tritt ein weiteres Problem auf, nämlich die potenzielle Auswaschung „leaching“ von Schwermetallen und giftigen Substanzen aus den

Solarpaneelen und weiteren schwimmenden Bestandteilen (Mathijssen et al. 2020; Wirth 2022). Die Gefahr besteht vor allem, wenn fragmentierte Module und Beschädigungen des Deckglases oder der Randversiegelungen bestehen und diese über längere Zeit der Witterung ausgesetzt bleiben. Die Auswaschrates hängt von pH-Wert und Temperatur des Wassers ab (Wirth 2022). Beispielsweise lässt sich Blei nur in einer stark sauren oder basischen Umgebung auswaschen. Die Bestandteile der Modultypen unterscheiden sich, daher sollte die Gefahr differenziert bewertet werden. In einem sogenannten Auslaugungstest bei einer Wassertemperatur von 20 °C wurden Materialien getestet, die bei einer FPV-Anlage am meisten mit Wasser in Berührung kommen, darunter Dichtungsmittel, Polyethylenschläuche und Kappen eines FPV-Systems (Mathijssen et al. 2020). Es wurden nur geringe Mengen an Aluminium, Kupfer, Mangan und Zink freigesetzt. Die Schwermetallkonzentrationen waren um ein Vielfaches niedriger als die internen Standards der niederländischen Wasserversorger für hergestelltes Trinkwasser. Dennoch müssen die längerfristigen Ausspülungen aus einer FPV-Anlage weiterhin überwacht werden. In der Nähe einer Solaranlage auf dem Land wurden einige erhöhte Schwermetallkonzentrationen festgestellt, jedoch waren im Durchschnitt keine Elemente in Konzentrationen vorhanden, die ein Risiko für nahegelegene Ökosysteme darstellen würden (Mathijssen et al. 2020). Eine Ausbreitung von gesundheitsgefährdenden Mikroorganismen konnte bisher ebenfalls nicht festgestellt werden, die Transparenz eines schwimmenden PV-Systems für UV-Licht (typischerweise zwischen 0 und 67 %) ist bei Abdeckungen von 10 % - 30 % der Wasseroberfläche ausreichend, um kritische Werte zu vermeiden (Mathijssen et al. 2020).

Ähnlich wie Seemauern oder Pfähle im Wasser bilden schwimmende Objekte große Unterwasserflächen an denen Filtrierer wachsen können, die Plankton aus dem Wasser herausfiltern und die Wasserqualität verbessern (Cole et al. 2005). Die übermäßige Zersetzung abgestorbener Organismen solcher Bioablagerungen könnte zu einem niedrigen Gehalt an gelöstem Sauerstoff und einer höheren Nährstoffbelastung am Boden des Gewässers führen, was wiederum die Wasserqualität verschlechtern könnte (Kitazawa et al. 2010). Dennoch bieten diese Gebiete Schutzzonen für Fische und gleichzeitig nahrungsreiche Flächen. Die Unterwasserdrohnenaufnahmen von de Lima et al. (2021) zeigten die Bildung einer noch dünnen Biofilmschicht auf den untersuchten FPV-Strukturen innerhalb von 4 bis 5 Monaten, nach 9 Monaten bedeckten bereits kleine Muscheln den untergetauchten Teil der Kunststoffschwimmer. Somit können FPV-Anlagen neben der Präsenz von Vögeln und der Ansiedlung von sessilen Organismen zur Verbesserung der Ökologie und der Artenvielfalt beitragen, aber auch die Korrosion der Module kann durch den biologischen Bewuchs, dem Biofouling, beschleunigt werden (Liu et al. 2018; de Lima et al. 2021; Ziar et al. 2021).

Die Einführung und Nutzung von FPV-Systemen hat gegenüber LBPV-Systemen den Vorteil, dass sie die Wasserverluste durch Verdunstung verringern und durch die höhere Effizienz der Module mehr Strom aus einer erneuerbaren Quelle erzeugen (Reges et al. 2022). Eine höhere Stromerzeugung führt zu einer besseren Einsparung von Treibhausgasemissionen (Yousuf et al. 2020; Semeskandeh et al. 2022). Dafür sind die Kosten von FPV im Vergleich zu LBPV geringfügig höher, da Schwimmer, Verankerung, Vertäuerung und Konstruktion der Anlage meist noch kostenintensiver sind (Cuce et al. 2022; Essak & Ghosh 2022; Yashas et al. 2022). Allein in Niedersachsen könnten FPV-Anlagen mit einem Abdeckungsgrad von 15 % eine Fläche von 1.322 ha innerhalb der gesetzlichen Vorgaben auf den Baggerseen und Talsperren mit einer Größe von > 10 - > 50 ha einnehmen (Nikolaus et al. 2020; Drucksache 20/1630 2022). Nach den Gleichungen von Mertens (2022) und den beiden Beispielen von FPV-Anlagen in Deutschland in Abschnitt 3.1.1 würde dies eine Energieproduktion von rund 1.718 GWp oder 1,72 TWp bei einem Modulwirkungsgrad von 20 % bedeuten. Dies entspräche einer jährlichen Strommenge von 1723 TW, was etwa dem Dreifachen des deutschen Brutto-Stromverbrauchs aus dem Jahr 2021 entspricht (Icha et al. 2022). Diese Berechnung berücksichtigte keine technischen Randbedingungen, sondern soll verdeutlichen, dass FPVs den Vorteil haben, bisher ungenutzte Freiflächen für den Ausbau der erneuerbaren Energien zu nutzen und das Potenzial haben, die Landnutzungskonflikte in der Bundesrepublik Deutschland zu verringern. FPV ist eine Lösung für eine nachhaltige Zukunft, wenn Forschung und Analyse erhebliche negative Auswirkungen auf die Wasserqualität und die aquatischen Ökosysteme ausschließen können (Reges et al. 2022). Schließlich würde mit der Zunahme von Solarprojekten weltweit auch der gefährliche PV-Abfall zunehmen (Yashas et al. 2022). Daher ist es wichtig, dass strenge Recycling-Richtlinien erlassen werden, um die Nachhaltigkeit von Solarprojekten zu gewährleisten.

4. Diskussion

4.1 Technologie der schwimmenden Photovoltaik Systeme

Im Rahmen dieser Arbeit wurden fünf verschiedene Strukturtypen mit unterschiedlichen technischen Ansätzen für eine effiziente Energieausbeute von FPV-Anlagen identifiziert, ermöglicht durch direkten oder indirekten Kontakt zum Wasser und die Kühlwirkung durch den Wasserkörper (Liu et al. 2018; Kamuyu et al. 2018; Kjeldstad et al. 2021). Die Ertragssteigerung von FPV im Vergleich zu konventionellen PV-Anlagen an Land lässt sich durch das thermische Verhalten der Technologien auf dem Wasser, welche einen besseren flächenbezogenen Wärmeverlustkoeffizienten besitzen, und den Standort erklären (Dörenkämper et al. 2021). Eine erhöhte Betriebstemperatur und eine unzureichende Hinterlüftung der Module wirken sich negativ auf die Effizienz von PV-Anlagen aus (Wesselak & Voswinckel 2016), daher kann die Effizienz von FPV-Anlagen durch die Wasserkühlung verbessert werden (Kjeldstad et al. 2021). Wie hoch die prognostizierte Leistungssteigerung eines FPV-Systems nun tatsächlich ist, konnte nicht auf einen konkreten Prozentsatz festgelegt werden, da sowohl der Wirkungsgrad eines Moduls als auch die Art der Solarzellen und die örtlichen klimatischen Bedingungen die tatsächliche Leistung beeinflussen (Rahman et al. 2015; Oliveira Pinto et al. 2020; Dörenkämper et al. 2021; Mertens 2022). In tropischen Regionen mit einer hohen Globalstrahlung, beispielsweise Singapur oder Brasilien, konnten erwiesenermaßen die höchsten Ertragssteigerungen erzielt werden (Dörenkämper et al. 2021). Die FPV-Anlage auf dem Maiwaldsee des Kieswerks Ossola in Renchen konnte aufgrund der vielen Sonnenstunden im Spätsommer 2019 und im ersten Halbjahr 2020 rund 6,67% kWh mehr Strom erzeugen (Erdgas Südwest 2020; EnBW AG 2021). Wenn die angegebene Nennleistung von 800.000 kWh Strom pro Jahr bereits den vom Betreiber geschätzten Mehrertrag für FPV von 3 % - 4 % beinhaltete, wurden schätzungsweise 10 % mehr Energie mit einer FPV-Anlage in der Bundesrepublik Deutschland erzeugt. Neueste Studien, die sowohl die verwendete Technologie als auch den Standort berücksichtigten, kamen auf Leistungssteigerungen im Bereich von 0,31 % (Oliveira-Pinto & Stokkermans 2020) - 6 % (Dörenkämper et al. 2021) für FPV-Systeme gegenüber Anlagen an Land. Betreiber der größten europäischen FPV-Anlagen in den Niederlanden, wie die Firma BayWa r.e. Solar Projects GmbH und ihre Tochtergesellschaft GroenLeven, geben keine Informationen zur tatsächlichen Energieerzeugung ihrer FPV-Anlagen. Aus diesem Grund wurden in dieser Arbeit kleinere FPV-Anlagen in der Bundesrepublik Deutschland herangezogen, um zu zeigen, welche Fläche eine potenzielle FPV-Anlage einnehmen könnte und wie viel Energie sie produzieren würde.

Die Klassifizierung von FPV-Systemen in fünf Strukturtypen basierte auf Studien, die sich mit dem technischen Design von FPV befassen und sie je nach Bedeckungsdichte als "freistehend", "kleine Kontaktfläche", "große Kontaktfläche" und "isoliert" definierten, was eine ungefähre Richtung der Auswirkungen auf die Funktion des Gewässers und die FPV-Leistung ermöglichen sollte (Liu et al. 2018). Bei der Recherche wurde deutlich, dass leichte Dünnschichtmodule oder Unterwasser-PV bisher nicht in großen Anlagen betrieben werden, sondern nur in experimentellen Versuchen als Pilotanlagen oder bei Tests eingesetzt wurden. Je nach Design und Kontaktfläche zum Wasser können FPVs an den jeweiligen Nutzen angeglichen werden. Eine offene Struktur kann den Wärmeverlustkoeffizienten verbessern und dadurch den Energieertrag im Vergleich zu LBPV-Anlagen deutlich steigern (Dörenkämper et al. 2021; Kjeldstad et al. 2021). Das Verständnis über neue FPV-Designs auszubauen und die Struktur entsprechend dem Nutzen zu modifizieren, um die Auswirkungen auf das Ökosystem zu minimieren, z. B. durch die Verwendung von Modulen mit hoher Transparenz, sollte das Ziel der zukünftigen Forschung zum Einsatz von FPV auf einem Gewässer sein.

4.2 Welche Auswirkungen hat eine FPV-Anlage auf den Wasserkörper?

Durch die Literaturrecherche wurde der aktuelle Stand des Wissens zu den Auswirkungen einer FPV-Anlage auf die Ökologie eines Standgewässers unter Berücksichtigung der Größe und Gestaltung zusammengefasst. Die Veränderungen der Wassertemperaturen unter einer FPV-Anlage kamen hauptsächlich durch die blockierte Sonneneinstrahlung zustande, wodurch sich das Wasser meist abkühlte (Château et al. 2019; Ziar et al. 2020; de Lima et al. 2021; Wang et al. 2021). Das Oberflächenwasser im Epilimnion kühlt stärker ab als das Wasser im Hypolimnion (de Lima et al. 2021; Exley et al. 2021 a). Dies lässt sich mit der typischen thermischen Schichtung eines Standgewässers und der bereits durch die FPV-Anlage verringerten Strahlungsintensität erklären, die mit höherer Wassertiefe immer weiter abnimmt (Schwoerbel & Brendelberger 2013; Nützmann & Moser 2016; Woolway et al. 2017). Detaillierte Veränderungen der thermischen Struktur aufgrund einer künstlichen Oberflächenabdeckung wurden aber bisher nur mit den Simulationen von Exley et al. (2021 a) konkret berechnet. Diese Simulationen galten allerdings für einen bestimmten Seentyp in der gemäßigten Klimazone und es kann davon ausgegangen werden, dass die Wirkung einer FPV-Abdeckung auf Gewässer mit anderen morphologischen und geographischen Merkmalen unterschiedlich ausfällt (Exley et al. 2021 a). Darauf deutete auch die Studie von Yang et al. (2022) über einen FPV-Standort an einem flachen tropischen Stausee in Singapur hin, bei

dem die Durchschnittstemperaturen und die Globalstrahlung deutlich höher sind als in den Niederlanden und im Vereinigten Königreich (Mertens 2022).

Für den fiktiven niedersächsischen Baggersee mit einer kleinen Fläche von bis zu 10 ha, einer Tiefe von bis zu 10 m und einem mesotrophen Nährstoffzustand (Nikolaus et al. 2021) bedeutet eine FPV-Anlage eine Verringerung des Windeinflusses und der Sonneneinstrahlung auf den Wasserkörper (Exley et al. 2021 a). Infolgedessen sinkt die Wassertemperatur, die Schichtungsdauer verkürzt sich, die Schichtungstiefe und die Verdunstung nehmen ab. Eine FPV-Anlage verlangsamt die Temperaturanpassung der oberflächennahen Wasserschichten des Baggersees an die Lufttemperatur und hat einen starken Kühleffekt an besonders heißen Tagen (Wang et al. 2021; Ilgen et al. 2022). Da der Baggersee im Verhältnis zu den Modellgewässern von Exley et al. (2021 a) oder de Lima et al. (2021) wesentlich flacher ist ($\sim \frac{1}{3}$), würden sich die Temperaturveränderung vermutlich stärker auswirken (Schönborn & Risse-Buhl 2013; Exley et al. 2021 a).

Ein FPV-System, das die Sonneneinstrahlung und den Wind um 10 % reduziert, verringerte die durchschnittliche Jahrestemperatur im Epilimnion um bis zu 0,3 °C, im Hypolimnion um bis zu 0,2 °C und die Verdunstung um 17,27 % (Exley et al. 2021 a). Die 10 %-Reduktion der beiden Variablen entsprechen jedoch nicht einer 10 %-Abdeckung. Vielmehr ist es eine technische Herausforderung, genau herauszufinden, welche Auswirkungen eine bestimmte FPV-Anlage auf ein Gewässer hat, indem genaue Informationen darüber bereitgestellt werden, wie viel Sonnenstrahlung in welchem Wellenlängenbereich und wie viel Wind tatsächlich blockiert werden. Zum Vergleich betrug die durchschnittliche Temperaturreduktion einer 30 % FPV-Abdeckung bei Felduntersuchungen von de Lima et al. (2021) im Epilimnion um 0,4 °C und im Hypolimnion um 0,2 °C gegenüber der nicht abgedeckten Wasserfläche. Weiterhin bedeutet eine 10 % Reduktion bzw. eine entsprechende FPV-Anlage bis schätzungsweise einem Abdeckungsgrad von 30 % für den Baggersee, dass sich die jährliche Durchmischungstiefe um 0,58 m verringert und sich die Schichtungsdauer um wenige Wochen verkürzen würde. Grundsätzlich führt die niedrigere Temperatur im Epilimnion zu einer geringeren Schichtungsstabilität und ermöglicht eine leichtere Durchmischung (Woolway et al. 2017; Exley et al. 2021 a). Die Reaktion des Sees auf zunehmende Oberflächenabdeckungen verläuft nicht linear, dennoch wird davon ausgegangen, dass der Effekt einer kleinen FPV-Anlage auf das Gewässer entgegen den erwarteten Auswirkungen des Klimawandels wirken und durchaus positiv sein kann (Exley et al. 2021 a; Ilgen et al. 2022). Höhere Reduktionen der Sonneneinstrahlung und des Winds von über 13 % durch FPV beeinflussen die Stabilität des Wasserkörper bereits erheblich und noch größere Oberflächenabdeckungen ($> \sim 50\%$) führen zu großen Temperaturveränderungen und sehr weitreichenden Änderungen des Schichtungszeitpunktes (Exley et al. 2021 a).

4.3 Welche Auswirkungen kann eine FPV-Anlage auf das Ökosystem See und die lebenden Organismen haben?

Der Einsatz von FPV soll schädliche Auswirkungen und Störungen auf das aquatische Ökosystem möglichst minimieren (Armstrong et al. 2020). Erste Untersuchungen an einer FPV-Anlage in Deutschland zeigten, dass sich künstliche Seen gut als Standorte eignen und FPVs das Potenzial haben, die Auswirkungen des Klimawandels auf Seen durch eine anpassungsfähige Einbettung und fundierte Standortentscheidungen zu verringern (Ilgen et al. 2022). Letztlich erfordert dieses Ziel, dass Forschende interdisziplinär zusammenarbeiten, um Informationen zu gewinnen und Innovationen zu entwickeln.

Durch die Verringerung der direkten Strahlungsenergie unter einer FPV-Anlage würde die Primärproduktion im fiktiven Baggersee abnehmen und es würde weniger Biomasse aufgebaut werden, wodurch die Zahl der zur Photosynthese fähigen Organismen, wie Phytoplankton und Algen, und damit auch die Sauerstoffkonzentration abnimmt (Li et al. 2011; Haas et al. 2020; Al-Widyan et al. 2021; Andini et al. 2022). Eine Solarzelle nutzt dabei den Teil des Spektralbereichs, welcher auch von den Pflanzen zur Photosynthese (PAR) genutzt wird (Schwoerbel & Brendelberger 2013; Schönborn & Risse-Buhl 2013; Mertens 2022). Das bedeutet, dass es von der Struktur der Module (Transparenz) und der FPV-Konstruktion (Abstände und Lücken) abhängt, wie viel Sonneneinstrahlung noch auf die Wasseroberfläche des Sees treffen kann (Galdino & de Almeida Olivieri 2017; Wesselak et al. 2017; Haas et al. 2020; Zhang et al. 2020). Eine sehr kleine FPV-Anlage (~ 2 % der Gewässerfläche) zeigte bei FPV-internen Messungen keine signifikante Auswirkung auf den Gehalt des gelösten Sauerstoffs (Ilgen et al. 2022). Massive schwimmende Strukturen hatten allerdings einen starken lokalen Effekt auf die Konzentration des gelösten Sauerstoffs, ohne jedoch kritische Werte für einen gesunden aquatischen Lebensraum zu unterschreiten (Foka et al. 2014; de Lima et al. 2022). Dennoch könnte sich die Gefahr von hypoxischen Bedingungen deutlich erhöhen (Ziar et al. 2020).

Häufig leiden Seen mit einem hohen Nährstoffgehalt (Eutrophierung) unter starkem Algenwachstum bzw. Algenblüten. Diese ließen sich mit FPV-Bedeckungen von 30 % zumindest einschränken und mit FPV-Bedeckungen von 40 % sogar verhindern. Infolgedessen könnte es aber zu massiven mikrobiellen Abbauprozessen der abgestorbenen Biomasse im Hypolimnion kommen (Schönborn & Risse-Buhl 2013; Nützmann & Moser 2016; Haas et al. 2020; Andini et al. 2022). Dies würde wiederum die Wahrscheinlichkeit einer hypolimnischen Anoxie erhöhen und die Rücklösung von löslichem Phosphor und anderen Metallen aus dem Seesediment verstärken (Schönborn & Risse-Buhl 2013). Es besteht jedoch auch die Möglichkeit, dass eine FPV-Anlage die Sedimentation verbessert und dieses Risiko mindern kann, indem die Durchmischung unter der Anlage verringert wird (Exley et al. 2021 b). Dieser Faktor von FPV

ist weitgehend unerforscht und es fehlt an Daten für eine eindeutige Antwort (Haas et al. 2020). Ein Rückgang der Algenvermehrung in eutrophen Seen würde sich allerdings positiv auf die Wasserqualität auswirken (Page et al. 2018; Cuce et al. 2022).

Auf dem niedersächsischen mesotrophen Beispielbaggersee limitierte das nun flachere Epilimnion in Phasen der Stagnation die Nährstoffversorgung des Planktons (Schönborn & Risse-Buhl 2013; Kraemer et al. 2015). Die kürzere Stratifikationszeit, die veränderte thermische Struktur, die geringere Bestrahlungsstärke und eine ungleichmäßige Lichtverteilung unterhalb der FPV-Anlage können besonders im Frühjahr und Herbst, in denen normalerweise das Wachstum des Phytoplanktons gefördert wird und sich das Epilimnion bildet, zu einer Verschiebung des Zeitpunkts der Blüte und zu einer Veränderung der Artenzusammensetzung der Phytoplanktongemeinschaften führen (Schwoerbel & Brendelberger 2013; Thackeray et al. 2008; Galdino & de Almeida Olivieri 2017; Exley et al. 2021 b; Reges et al. 2022). Besonders Blaualgenpopulationen könnten die Lichtverhältnisse und auch anaerobe Bedingungen im See nutzen und sich ausbreiten, mit negativen Folgen für die Wasserqualität. FPV-Anlagen von 30 % und 40 % Abdeckungsgrad können den Sauerstoffgehalt in der gesamten Wassersäule unter der Anlage signifikant verringern (de Lima et al. 2021; Wang et al. 2021). Die größten Differenzen in den Konzentrationen an gelöstem Sauerstoff wurden bei FPV-Anlagen von 30 % am Boden der Gewässer gemessen (de Lima et al. 2021; Yang et al. 2022). Ob dies durch die Zersetzung der sinkenden Biomasse im Hypolimnion und/oder durch die weniger gut durchmischten Wassersäule ausgelöst wurde, ist nicht geklärt. Die Werte für den gelösten Sauerstoff und die Wasserqualität blieben im Abstand zu den FPV-Anlagen unverändert (de Lima et al. 2021; Yang et al. 2022). Es fehlen allerdings verlässliche Aussagen, ab wann der gesamte Sauerstoffgehalt im See einen kritischen Grenzwert erreichen könnte. Eine extrem hohe FPV-Bedeckung (> 50 % - 100 %) reduziert die einfallende kurzweilige Sonnenstrahlung potenziell so stark, dass der Rückgang von Algen und Phytoplankton nach Expertenmeinung zu einem Zusammenbruch der Dynamik der Nahrungskette des Sees führen könnte (Haas et al. 2020; Andini et al. 2022). Da ein flacher See anfälliger für Störungen ist, breiteren Temperaturschwankungen unterliegt und potenziell mehr Makrophyten am Boden des Gewässers aufweist, werden die Auswirkungen einer FPV auf einen flachen Baggersee vermutlich stärker sein (Schönborn & Risse-Buhl 2013; Exley et al. 2021 a). Wenn sich die Phytoplanktongemeinschaften verändern, müssen sich die Konsumenten im See darauf einstellen (Schwoerbel & Brendelberger 2013). Die Temperaturreduktion führte außerdem zu einer niedrigeren Abundanz des Zooplanktons im Herbst und im Frühjahr (Habermann & Haldna 2017). Durch den Kaskadeneffekt haben diese Veränderungen wiederum Auswirkungen auf die weiteren trophischen Ebenen und die Nahrungskette (Schwoerbel & Brendelberger 2013; Schönborn & Risse-Buhl 2013).

Die Beobachtungen von vielen verschiedenen Vögeln und manchmal sogar Nestern an verschiedenen FPV-Anlagen (Liu et al. 2018; Rosa-Clot 2020; Ziar et al. 2020; de Lima et al. 2021) und die geringe Sterblichkeit von Vögeln an großen landgestützten Photovoltaikanlagen (Kosciuch et al. 2020) geben keinen Anlass zur gesteigerten Sorge, dass FPV-Anlagen diese Tiere zusätzlich gefährden könnten. Vogelkot könnte jedoch die Paneele stark verunreinigen, was zu spürbaren Leistungsproblemen und gleichzeitig zu einem Nährstoffeintrag führen könnte (Scherer et al. 1995; Liu et al. 2018; Ziar et al. 2020). Es sollte überlegt werden, wie mit diesen Ereignissen umzugehen ist und wie man die Paneele regelmäßig und nicht chemisch reinigen könnte.

Fische werden häufig als wertvoll und schützenswert für aquatische Ökosysteme eingeschätzt. Ein Rückgang der Population der Fische oder der Schutz vor Fressfeinden durch eine FPV-Anlage wurden bisher nicht untersucht. Künstliche Unterstände können jedoch den aquatischen Lebensraum verbessern, indem sie Schutz vor hohen Temperaturen und Raubtieren bieten (Pringle et al. 2017; Ahn et al. 2018). Auf diese Weise könnten auch große Fischpopulationen vor Hitzestress in der Aquavoltaik geschützt und gleichzeitig die Nahrungsmittelproduktion unter einem FPV-System gewährleistet werden (Château et al. 2019; Wang et al. 2021). Dennoch handelt es sich bei Aquavoltaik um kontrollierte aquatische Umweltbedingungen, die nicht mit einem unbeeinflussten stehenden Gewässer verglichen werden können (Pringle et al. 2017; Château et al. 2019).

4.4 Diskussion des Analysetools „Zon op Water“

Die Auswirkungen einer FPV-Anlage, die 25 % eines flachen, mesotrophen Baggersees mit sandigem Boden und einer Größe von 10 ha abdeckt, waren nach den Ergebnissen des Tools "Zon op Water" von Loos & Wortelboer (2018) sehr gering. Es wurden nur zwei negative Indikatoren angezeigt. Unter Berücksichtigung der geringen Tiefe des Sees und der Simulation eines "worst case"-Szenarios im Litoral des Gewässers, war ein Rückgang der geeigneten Bodenfläche für Wasserpflanzen zu erwarten. Das Litoral gehört zur euphotischen Zone, in der die Hauptmenge der licht- und temperaturabhängigen Photosyntheserate umgesetzt wird und besonders in flachen Seen (Tiefe > 10 m) kann das Licht bis auf den Boden des Gewässers dringen und für einen Bewuchs des Bodens mit Makrophyten sorgen (Schwoerbel & Brendelberger 2013; Schönborn & Risse-Buhl 2014). Ein Rückgang der Pflanzenbiomasse und eine geringe Chlorophyll a-Konzentration durch die lichtlimitierenden Bedingungen unter einer FPV-Anlage wurde auch bei anderen Untersuchungen festgestellt (Ziar et al. 2020; Yang et al. 2022). Die Erwärmung der durchschnittlichen Wassertemperatur durch die erhitzten Pa-

neele im Sommer und die verringerte Verdunstung wird im Analysetool als positive Veränderung veranschaulicht (Loos & Wortelboer 2018). Außerdem erhöhte sich die Wassertemperatur in den tieferen Schichten sogar um mehr als 2 °C in beiden Anwendungsbeispielen. Dies ist widersprüchlich zu den Temperaturmessungen anderer Studien in den gemäßigten Klimazonen, die von einer geringen Wassertemperatur in oberflächennahen Wasserschichten unter einer FPV-Anlage berichteten (Ziar et al. 2020; de Lima et al. 2021) und noch geringere Temperaturfluktuationen in den tiefen Wasserschichten feststellen konnten (de Lima et al. 2021; Exley et al. 2021 a). Eine erhöhte Wassertemperatur und weniger Windeinfluss würden die Schichtungsdauer verlängern und die Schichtungsstärke erhöhen (Schwoerbel & Brendelberger 2013; Woolway & Merchant 2019; Exley et al. 2021 a). Dieser Effekt wäre ähnlich zu den Veränderungen durch die Klimaerwärmung (Woolway et al. 2019; Exley et al. 2021 a; Ilgen et al. 2022) und wird dennoch vom Analysetool als positive Veränderung dargestellt. Weshalb Loos & Wortelboer (2018) eine Temperaturveränderung und vor allem eine Erwärmung des Gewässers als positive Auswirkung interpretierten, wurde nicht erklärt. Die geringe Lichtdurchlässigkeit des FPV-Systems beeinflusst den Anteil des Bodens für die Wasserpflanzen, aber nicht die Wassertemperatur. Dies bedeutet, dass die gesamte Wärmeenergie der Module ans Wasser abgegeben wird. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Untersuchungen von Yang et al. (2022), wodurch nicht-strahlungsbedingte latente Wärme, fühlbare Wärme und Infrarotstrahlung der Paneele für einen Anstieg der Wassertemperatur sorgten. Allerdings beruhten diese Werte auf wesentlich höheren durchschnittlichen Wassertemperaturen von schätzungsweise ~ 31 °C, während die Wassertemperatur, mit der das Analysetool arbeitet, nur schätzungsweise ~ 15 °C beträgt (Wortelboer et al. 2018). Eine Erklärung dafür ist, dass das Analysetool den Einfluss des Windes auf die Wassertemperatur nicht berücksichtigt (Loos & Wortelboer 2018) und auch Yang et al. (2022) nahmen in den Modellen eine Windgeschwindigkeit von 0 m/s an, obwohl diese nach eigenen Angaben die latente und fühlbare Wärme beeinflusst. Ein FPV-System besitzt allerdings eine deutlich bessere Kühlwirkung, wenn der Wind unter die Anlage kommt und sich keine Wärme oder Verdunstungswasser anstauen kann (Dörenkämper et al. 2021). Es ist anzunehmen, dass eine hohe Windgeschwindigkeit unter der Anlage einen großen Teil der dort vorhandenen Wärme wegträgt und eine deutliche Erhöhung der Wassertemperatur unwahrscheinlicher macht.

Loos & Wortelboer (2018) gingen davon aus, dass der Sauerstoffgehalt mit zunehmender FPV in kleinen Seen vor allem im Epilimnion zunimmt und auch die sommerliche Sauerstoffverarmung am Boden reduziert wird. Der Grund dafür ist der geringere Sauerstoffbedarf des Bodens durch den Rückgang der Wasserpflanzen und dadurch eine Steigerung der Primärproduktion des Phytoplanktons (Loos & Wortelboer 2018). Der Chlorophyll a-Gehalt unterhalb der FPV sank im mestrophen See um etwa ein Drittel im Vergleich zum offenen Wasser. Im eutrophierten Baggersee fiel der Chlorophyll a-Gehalt unterhalb der FPV um etwa

60 % im Vergleich zum offenen Wasser und stieg insgesamt leicht an. Dabei berichteten die Studien von Haas et al. (2020) und Wang et al. (2021), dass sich die durchschnittliche Planktonbiomasse, gemessen an der Chlorophyll-Konzentration, bei einer FPV von 40 % im gesamten Gewässer deutlich verringern lässt. Das Analysetool von Loos & Wortelboer (2018) stellt ein extremes Szenario dar, welches sich in einigen Punkten, wie der hohen durchschnittlichen Wassertemperatur über der Bodenschicht und dem ansteigenden Chlorophyll a-Gehalt trotz eines hohen Abdeckungsgrads mit dem bestehenden Wissensstand nicht vollständig nachvollziehen lässt. Daher wird eine Bewertung der Auswirkungen einer FPV-Anlage auf ein Gewässer mit Hilfe des Analysetools im derzeitigen Entwicklungsstadium nicht empfohlen.

4.5 Vorteile & Nachteile von FPV-Anlagen im Vergleich zu konventionellen PV-Anlagen

Grundsätzlich liegen die Vorteile von FPV-Systemen in der einfachen Installation im Vergleich zu LBPV-Systemen (WorldBank Group 2019; Cuce et al. 2022), sofern massive Verankerungsstrukturen vermieden werden können. Ein begrenzter Einsatz von schweren Maschinen verringert die potenzielle Freisetzung von Öl und Schmiermitteln am Standort der Installation. Der Verlust und die Fragmentierung von Lebensraum (Dhar et al. 2020) kann als die schwerwiegendste ökologische Auswirkung von LBPV-Anlagen betrachtet werden. Dennoch können PV-Anlagen an Land und auf dem Wasser die Lebensraumqualität verbessern, wenn die richtigen Standorteigenschaften beachtet werden (Page et al. 2018 Schlegel 2020; Cuce et al. 2022; Wirth 2022). Die Gefahren der Auswaschung von Schwermetallen und toxischen Stoffen beim langfristigen Betrieb einer FPV-Anlage sind noch nicht geklärt. Ein erster Test unter „worst case“-Bedingungen konnte allerdings keine gefährlichen Konzentrationen von Elementen aus der FPV-Anlage oder eine Ausbreitung von gesundheitsgefährdenden Mikroorganismen nachweisen (Mathijssen et al. 2020). Nach 9 Monaten besiedelten kleine Muscheln den untergetauchten Teil einer FPV-Anlage (de Lima et al 2021). Ob dieser Bewuchs mit Organismen die Wasserqualität verbessert (Cole et al. 2005) oder ob der Effekt durch eine höhere Nährstoffbelastung und Zersetzung am Gewässergrund (Kitazawa et al. 2010) kompensiert wird und ob die Pontons durch einen Biofilm korrodieren (Liu et al. 2018; de Lima et al. 2021; Ziar et al. 2021), kann ebenfalls nur durch ein langfristiges Monitoring festgestellt werden. Eine Kosten-Analyse von FPV wurde in dieser Arbeit nicht tiefgehend weiterverfolgt, da keine Studien zu der Preisentwicklung auf dem deutschen Markt bekannt waren und der Schwerpunkt der Bachelorarbeit auf den Auswirkungen auf die Ökologie des Gewässers lag.

Während es bei großen LBPV-Anlagen zu einem Konflikt um die Landnutzung kommen kann, existieren viele ungenutzte künstliche Oberflächengewässer mit dem Potenzial eine große

Menge erneuerbarer Energie zu generieren. FPV-Abdeckungsgrade von 15 % auf allen großen künstlichen Gewässern in Niedersachsen (> 10 ha - > 50 ha; entsprechend einer Fläche von 1.322 ha) könnten 1,723 TWh Strom erzeugen; dieser Wert liegt über dem vom Fraunhofer Institut prognostizierten, technischen Potenzial von 44 GWp für die Bundesrepublik Deutschland (Wirth 2022). Ob diese Werte zustande kommen, weil die tatsächliche Anzahl der Oberflächengewässer nicht hinreichend bekannt ist und nur durch Erhebungen, wie die von Nikolaus et al. (2020), ermittelt werden kann oder weil Naturschutz, Infrastruktur, öffentliche Akzeptanz und konkurrierende Nutzungen (Wirth 2022) das Potenzial für FPV stark reduzieren würden, ist unklar und würde weitere Forschung erfordern.

Die restriktiven Rahmenbedingungen der Bundesregierung zur maximalen Flächenbedeckung für FPV und den festgelegten Uferabständen wurden von der Firma BayWa r.e. kritisiert, da diese den Ausbau der erneuerbaren Energien auf dem Wasser stark ausbremsen würden (Witsch 2022). Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigten, dass künstliche Gewässer mit hoher Eutrophierung von FPV-Abdeckungsgraden von bis zu 30 % profitieren können und dass FPV-Systeme über einen langen Zeitraum hinweg nachhaltig mehr Energie liefern können als herkömmliche PV-Systeme.

5. Fazit

Die in dieser Bachelorarbeit erfassten Ergebnisse geben einen Überblick über die möglichen Auswirkungen von FPV auf künstliche Standgewässer, vor allem im Hinblick auf die zu erwartenden Veränderungen eines Gewässers in den gemäßigten Klimazonen. Ein FPV-System kann die Wassertemperatur signifikant senken, die Gesamtverdunstung eines Sees reduzieren, zu einer Verkürzung der Schichtung und Verflachung des Epilimnions führen, wobei die Wirkung mit zunehmendem Umfang der FPV-Bedeckung nicht linear zunimmt. Die Leistung eines PV-Moduls kann durch die niedrigere Betriebstemperatur aufgrund des Kühleffekts über dem Wasser erhöht werden, wobei der Energiegewinn eines FPV-Systems je nach geografischem Standort zwischen 0,31 % und 6 % liegen dürfte. Aus der Recherchearbeit geht hervor, dass der Effekt von FPV auf die Biologie eines Sees zu weiten Teilen unerforscht ist und auf Informationen von Untersuchungen aus anderen Fachgebieten, wie aus der Klimaforschung oder Forschung zu schwimmender Infrastruktur, abgeleitet wurde. Aus diesem Grund sollte die zukünftige Forschung einen stärkeren Fokus auf den Einfluss von FPV auf die Wasserqualität, die Flora und Fauna und den Schutz der aquatischen Ökosysteme legen. Es sollte berücksichtigt werden, welche Maßnahmen sich positiv auf die Struktur eines Gewässers auswirken, wie z. B. ein verbesserter Kühleffekt an heißen Tagen und eine bessere Sedimentation durch FPV, und inwieweit eine geringe Wassertiefe die Auswirkungen von FPV verstärken könnte. Für die Bewertung der Auswirkungen von FPV sind umfassende Informationen über die langfristige Nutzung erforderlich, wobei zwischen den Auswirkungen von FPV auf künstliche und natürliche Seen unterschieden werden sollte. Die individuelle Bestimmung der Lichtdurchlässigkeit und des Windwiderstandes eines FPV-Systems könnte das Verständnis über die Auswirkungen eines FPV-Systems auf die thermische Struktur eines Sees erheblich verbessern und die Grundlage für neue Computermodelle bilden. Ähnlich wie bei der Agri-Photovoltaik könnten FPV-Systeme durch technische Modifikationen an die Gegebenheiten angepasst und optimiert werden. Hersteller, Betreiber und Wissenschaftler müssen Informationen austauschen und die FPV-Überwachung ausweiten, um über umfassendere Daten zu verschiedenen Untersuchungsparametern an möglichst vielen Standorten zu verfügen. Weiterhin müssen biotische Umweltfaktoren wissenschaftlich mit dem Abdeckungsgrad durch FPV in Beziehung gesetzt werden, um einen ökologischen und wirtschaftlichen Kompromiss zwischen Energieerzeugung und Umweltschutz gewährleisten zu können. Eine sehr große FPV-Bedeckung (> 50 %) ist nach heutigem Kenntnisstand nicht zu empfehlen. FPV-Anlagen, die maximal 30 % der Wasseroberfläche eines künstlichen Standgewässers, wie z. B. eines Baggersees, bedecken, werden wahrscheinlich nur sehr geringfügige Beeinträchtigungen des Ökosystems zur Folge haben. Es ist jedoch notwendig, die Störung des Ökosystems so gering wie möglich zu halten und Gefahren für die Erhaltung der aquatischen Lebensgemeinschaften zu vermei-

den. Gewässer in einem schlechten ökologischen Zustand mit starker Eutrophierung und massivem Algenwachstum können durch FPV-Anlagen aufgewertet werden. Bei Seen mit einem geringen Nährstoffgehalt könnten die Module mit hoher oder sogar variabler Transparenz die ökologischen Auswirkungen minimieren.

Der Ausbau von FPV bietet eine weitere Chance für eine erfolgreiche Energiewende mit einer durchschnittlich höheren Energieproduktion als Anlagen an Land, voraussichtlich geringen ökologischen Auswirkungen bei geringen FPV-Abdeckungsgraden (< 30 %) und der Möglichkeit, die Risiken für das Gewässer durch technische Anpassungen und die Standortwahl zu minimieren. Unabhängig von diesen zusammenfassenden Erkenntnissen bleibt eine individuelle Risikobewertung der potenziell für FPV nutzbaren Gewässer unumgänglich, um der starken Individualität der Seenökologie und der sozialen Bedeutung der Gewässer gerecht zu werden.

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Thomas Klefoth für seine intensive Betreuung während der Erstellung dieser Bachelorarbeit. Die hilfreichen Anregungen und konstruktive Kritik haben mich sehr motiviert und maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Bedanken möchte ich mich auch bei Herrn Dr. Robert Taube, der diese Arbeit als Zweitgutachter betreut und begutachtet hat. Abschließend möchte ich mich bei meinen Eltern und all jenen bedanken, die mir das Studium durch ihre Unterstützung ermöglicht haben und immer für ein ausführliches Gespräch zur Verfügung standen.

Literaturverzeichnis

AGEB Energiebilanzen (2022). Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2021. *Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V.* (Februar 2022).

AGEE-Stat - Geschäftsstelle der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (2022). Erneuerbare Energien in Deutschland Daten zur Entwicklung im Jahr 2021. *Umweltbundesamt*. ISSN: 2363-829X.

Ahn, C.H., Song, H.M., Park, J.R., Park, J.—H.; Jo, G.-H. & Park, J.O. (2018). Comparative evaluation of thermal stress of fish in a small pond with a fish shelter. *AIP Conference Proceedings*, 1973, 020018. DOI :10.1063/1.5041402.

Al-Widyan, M., Khasawneh, M., & Abu-Dalo, M. (2021). Potential of Floating Photovoltaic Technology and their Effects on Energy Output, Water Quality and Supply in Jordan. *Energies* 2021, 14(24). DOI: 10.3390/en14248417.

Allen, M.R., Dube, O.P., Solecki, W., Aragón-Durand, F., Cramer, W., Humphreys, S., Kainuma, M., Kala, J., Mahowald, N., Mulugetta, Y., Perez, R., Wairiu, M., & Zickfeld, K. (2018). Framing and Context. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. Cambridge University Press, 51-69. DOI: 10.1017/9781009157940.003.

Andini, S., Suwartha, N., Setlawan, E.A., & Maarif, S. (2022). Analysis of Biological, Chemical, and Physical Parameters to Evaluate the Effect of Floating Solar PV in Mahoni Lake, Depok, Indonesia: Mesocosm Experiment Study. *Journal of Ecological Engineering*, 23(4), 17–32. DOI: 10.12911/22998993/146385.

Armstrong, A., Page, T., Thackeray, S.J., Hernandez, R.R., & Jones, I.D. (2020). Integrating environmental understanding into freshwater floatovoltaic deployment using an effects hierarchy and decision trees. *Environmental Research Letters*, 15(11). DOI: 10.1088/1748-9326/abbf7b.

Armstrong, S., & Hurley, W.G. (2010). A thermal model for photovoltaic panels under varying atmospheric conditions. *Applied Thermal Engineering*, 30(11), 1488-1495. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2010.03.012.

- Bax, V., Van de Langeweg, W., Van den Berg, B., Hoosemans, R., & Terpstra, T. (2022). Will it float? Exploring the social feasibility of floating solar energy infrastructure in the Netherlands. *Energy Research & Social Science*, 89. DOI: 10.1016/j.erss.2022.102569.
- BISOL Group (2022). BISOL Lumina – Bifacial PV modules with transparent backsheet for improved transmittance of natural light. *BISOL Production Ltd.*, Broschüre (Februar 2022).
- Butcher, J.B., Nover, D., Johnson, T.E., & Clark, C.M. (2015). Sensitivity of lake thermal and mixing dynamics to climate change. *Climatic Change*, 129, 295-305. DOI: 10.1007/s10584-015-1326-1.
- Cavusoglu, A.H., Chen, X., Gentile, P., & Shin, O., (2017). Potential for natural evaporation as a reliable renewable energy resource. *Nature Communications*, 8, 617. DOI: 10.1038/s41467-017-00581-w.
- Château, P.-A., Wunderlich, R.F., Wang, T.-W., Lai, H.-T., Chen, C.-C., & Chang, F.-J. (2019). Mathematical modeling suggests high potential for the deployment of floating photovoltaic on fish ponds. *Science of The Total Environment*, 687, 654-666. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.05.420.
- Choi, Y.-K. (2014). A Study on Power Generation Analysis of Floating PV System Considering Environmental Impact. *International Journal of Software Engineering and Its Applications*, 8. DOI: 10.14257/ijseia.2014.8.1.07.
- Choi, Y.-K., Choi, W.S., & Lee, J.H. (2016). Empirical research on the efficiency of floating PVsystems. *Science of Advanced Materials*, 8(3), 681-685. DOI: 10.1166/sam.2016.2529.
- Chunduri, S.K., & Schmela, M. (2016). PERC Solar Cell Technology 2016 - Background, Status and Outlook. *TaiyangNews*. DOI: 10.13140/RG.2.2.14754.25288.
- Cole, V.J., Glasby, T.M., & Holloway, M.G. (2005). Extending the generality of ecological models to artificial floating habitats. *Marine Environmental Research*, 60, 195–210. DOI: 10.1016/j.marenvres.2004.10.004.
- Council of the European Union (COD) (2021). Interinstitutional File: 2020/0036. Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulation (EU) 2018/1999 (European Climate Law) – Letter to the Chair of the European Parliament Committee on the Environment, Public Health and Food Safety (ENVI), 8204/21 (05.05.2021).

- Da Silva, G.D.P., & Branco, D.A.C. (2018). Is floating photovoltaic better than conventional photovoltaic? Assessing environmental impacts. *Impact Assessment and Project Appraisal*, 36(5), 390-400. DOI: 10.1080/14615517.2018.1477498.
- de Lima, R.L.P., Graaf-van Dinther, R.E., & Boogaard, F.C. (2022). Impacts of floating urbanization on water quality and aquatic ecosystems: a study based on in situ data and observations. *Journal of Water and Climate Change*, 13(3). DOI: 10.2166/wcc.2022.325.
- de Lima, R.L.P., Paxinou, K., Boogaard, F.C., Akkerman, O., & Lin, F.-Y. (2021). In-Situ Water Quality Observations under a Large-Scale Floating Solar Farm Using Sensors and Underwater Drones. *Sustainability 2021*, 13(11). DOI: 10.3390/su13116421.
- Dhar, A., Naeth, M.A., Jennings, P.D., & Gamal El-Din, M. (2020). Perspectives on environmental impacts and a land reclamation strategy for solar and wind energy systems. *Science of The Total Environment*, 718. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134602.
- Dörenkämper, M., Wahed, A., Kumar, A., Jong, M., Kroon, J., & Reindl, T. (2021). The cooling effect of floating PV in two different climate zones: A comparison of field test data from the Netherlands and Singapore. *Solar Energy*, 214, 239-247. DOI: 10.1016/j.solener.2020.11.029.
- Drucksache 20/1630 des Deutschen Bundestags (2022). Entwurf eines Gesetzes zu Sofortmaßnahmen für einen beschleunigten Ausbau der erneuerbaren Energien und weiteren Maßnahmen im Stromsektor. *Gesetzentwurf der Bundesregierung Kommission*, 20. Wahlperiode (02.05.2022).
- Drucksache 20/1979 des Deutschen Bundestags (2022). Stellungnahme des Bundesrates und Gegenäußerung der Bundesregierung - Drucksache 20/1630 - Entwurf eines Gesetzes zu Sofortmaßnahmen für einen beschleunigten Ausbauder erneuerbaren Energien und weiteren Maßnahmen im Stromsektor. *Deutscher Bundestag*, 20. Wahlperiode (25.05.2022).
- Drucksache 20/2656 des Deutschen Bundestags (2022). Bericht des Ausschusses für Klimaschutz und Energie (25. Ausschuss). *Deutscher Bundestag*, 20 Wahlperiode (06.07.2022).
- Essak, L., & Ghosh, A. (2022). Floating Photovoltaics: A Review. *Clean Technologies*, 4, 752-769. DOI: 10.3390/.

- Exley, G., Armstrong, A., Page, T., & Jones, I.D. (2021 a). Floating photovoltaics could mitigate climate change impacts on water body temperature and stratification. *Solar Energy*, 219, 24-33. DOI: 10.1016/j.solener.2021.01.076.
- Exley, G., Hernandez, R.R., Page, T., Chipps, M., Gambro, S., Hersey, M., Lake, R., Zouannou, K.-S., & Armstrong, A. (2021 b). Scientific and stakeholder evidence-based assessment: Ecosystem response to floating solar photovoltaics and implications for sustainability. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 152. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111639.
- Farrar, L.W., Bahaj, A.S., James, P., Anwar, A., & Amdar, N. (2022). Floating solar PV to reduce water evaporation in water stressed regions and powering water pumping: Case study Jordan. *Energy Conversion and Management*, 260. DOI: 10.1016/j.enconman.2022.115598.
- Foka, E., Rutten, M., Boogaard, F., Graaf, R., de Lima, R., & Giesen, N. (2015). The effect of floating houses on water quality. *Amsterdam International Water Week Conference at: Amsterdam 2015*.
- Fraunhofer IWES (2015): Wie hoch ist der Stromverbrauch in der Energiewende? Energiepolitische Zielszenarien 2050 - Rückwirkungen auf den Ausbaubedarf von Windenergie und Photovoltaik. *Agora Energiewende*.
- Fthenakis, V., & Kim, H.C. (2009): Land use and electricity generation: A life-cycle analysis, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6). DOI: 10.1016/j.rser.2008.09.017.
- Galdino, M.A.E., & de Almeida Olivieri, M.M. (2017). Some Remarks about the Deployment of Floating PV Systems in Brazil. *Journal of Electrical Engineering*, 5(1), 10-19. DOI: 10.17265/2328-2223/2017.01.002.
- Garrison, P.J., Marshall, D.W., Stremick-Thompson, L., Cicero, P.L., & Dearlove, P.D. (2005). Effects of Pier Shading on Littoral Zone Habitat and Communities in Lakes Ripley and Rock, Jefferson County, Wisconsin. *Wisconsin Department of Natural Resources, Jefferson County Land and Water Conservation Department, and Lake Ripley Management District, PUB-SS-1006*.
- Golroodbari, S.Z., & Van Sark, W. (2020). Simulation of performance differences between offshore and land-based photovoltaic systems. *Progress in Photovoltaics*, 28(9), 873-886. DOI: 10.1002/pip.3276.

- Graichen, J., Healy, S., Siemons, A., Höhne, N., Kuramochi, T., Gonzales-Zuniga, S., Sterl, S., Kersting, J., & Wachsmuth, J. (2016). International Climate Initiatives – A way forward to close the emissions gap? Initiatives' potential and role under the Paris Agreement. *Umweltbundesamt UBA*, Climate Change Nr. 31, Projekt Nr. (FKZ) 3715 41 109. ISSN: 1862-4359.
- Grojian, S., Sharon, H., Ebadi, H., Kant, K., Scavo, F.B., & Tina, G.M. (2020). Recent Technical Advancements, Economics and Environmental Impacts of Floating Photovoltaic Solar Energy Conversion Systems. *Journal of Cleaner Production*, 278. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124285.
- Haahr, T., Wisdorff, A., Bauer, P., & Heinzl, H. (2021). EU-Klimaneutralität bis 2050: Europäisches Parlament erzielt Einigung mit Rat. *Europäisches Parlament*, Pressemitteilung (22.04.2021). REF: 20210419IPR02302.
- Haas, J., Khalighi, J., De la Fuente, A., Gerbersdorf, S.U., Nowak, W., & Chen, P.-J. (2020). Floating photovoltaic plants: Ecological impacts versus hydropower operation flexibility. *Energy Conversion and Management*, 206. DOI: 10.1016/j.enconman.2019.112414.
- Haberman J., & Haldna M. (2017). How are spring zooplankton and autumn zooplankton influenced by water temperature in a polymictic lake? *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*, 66 (3), 264–278. DOI: 10.3176/proc.2017.3.03.
- Hayibo, K.S., Mayville, P., Kailey, R.K., & Pearce, J.M. (2020). Water Conservation Potential of Self-Funded Foam-Based Flexible Surface-Mounted Floatovoltaics. *Energies* 2020, 13(23). DOI: 10.3390/en13236285.
- Hernandez, R.R., Easter, S.B., Murphy-Mariscal, M., Maestre, F.T., Tavassoli, M., Allen, E.B., Barrows, C.W., Belnap, J., Ochoa-Hueso, R., Ravi, S., & Allen, M.F. (2014). Environmental impacts of utility-scale solar energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 766-779. ISSN: 1364-0321, DOI: 10.1016/j.rser.2013.08.041.
- Ho, C.J., Chou, W.-L., & Lai, C.-M. (2015). Thermal and electrical performance of a water-surface floating PV integrated with a water-saturated MEPCM layer. *Energy Conversion and Management*, 89, 862-872. DOI: 10.1016/j.enconman.2014.10.039.
- Ho, C.J., Chou, W.-L., & Lai, C.-M. (2016). Thermal and electrical performances of a water-surface floating PV integrated with double water-saturated MEPCM layers. *Applied Thermal Engineering*, 94, 122-132. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.10.097.

- Icha, P., Lauf, T., & Kuhs, G. (2022). Entwicklung der spezifischen Treibhausgas-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2021. *Climate Change* 15/2022, Umweltbundesamt. ISSN: 1862-4359.
- Ilgen, K., Schindler, D., Wieland, S., & Lange, J. (2022). The Impact of Floating Solar Power Plants on the Water Quality of Quarry Lakes. *Fraunhofer ISE and University Freiburg, WCPEC-8, Session No.: 4AO.9.5 (26.09.2022)*.
- Kamuyu, W.C.L., Lim J. R., Won, C.S., & Ahn, H.K. (2018). Prediction Model of Photovoltaic Module Temperature for Power Performance of Floating PVs. *Energies* 2018, 11(2), 447. DOI: 10.3390/en11020447.
- Kim, K.-T., Hye-Joung, Y.K., Seoung-Yeal, K., Won-Kyong, W.-M & S. (2019). Usage of Waterbirds on the Artificial Floating Islands in Reservoir using UAV*. *Journal of the Korean Society of Environmental Restoration Technology*, 22(5), 57-67. DOI: 10.13087/kosert.2019.22.5.57.
- Kitazawa, D., Tabet, S., Fujino, M. & Kato, T. (2010). Assessment of environmental variations caused by a very large floating structure in a semi-closed bay. *Environmental Monitoring and Assessment*, 165, 461-474. DOI: 10.1007/s10661-009-0959-9.
- Kjeldstad, T., Lindholm, D., Marstein, E., & Selj, J. (2021). Cooling of floating photovoltaics and the importance of water temperature. *Solar Energy*, 218, 544-551. DOI: 10.1016/j.solener.2021.03.022.
- Kosciuch, K., Riser-Espinoza, D., Geringer, M., & Erickson, W. (2020). A summary of bird mortality at photovoltaic utility scale solar facilities in the Southwestern U.S.. *PLoS ONE*, 15(4). DOI: 10.1371/journal.pone.0232034.
- Kraemer, B.M., Anneville, O., Chandra, S., Dix, M., Kuusist, E., Livingstone, D.M., & McIntyre, P.B. (2015). Morphometry and average temperature affect lake stratification responses to climate change. *Geophysical Research Letters*, 42(12), 4981-4988. DOI: 10.1002/2015GL064097.
- Lammerant, J., Laureysens, I., & Driesen, K. (2020). Potential Impacts of Solar, Geothermal and Ocean Energy on Habitats and Species protected under the Birds and Habitats Directives. *Arcadis Belgium, BirdLife International, NIRAS, Stella Consulting, Ecosystems Ltd*, Final report under EC Contract ENV.D.3/SER/2017/0002.
- Lee, T.D., & Ebong, A.U. (2017). A review of thin film solar cell technologies and challenges. *Energy Reviews*, 70, 1286-1297. DOI: 10.1016/j.rser.2016.12.028.

- Lehmann, P., Aminzadeh, M., & Or, D. (2019). Evaporation Suppression From Water Bodies Using Floating Covers: Laboratory Studies of Cover Type, Wind, and Radiation Effects. *Water Resources Research*, 55(6), 4839-4853. DOI: 10.1029/2018WR024489.
- Lenard, T., & Wojciechowska, W. (2013). Phytoplankton diversity and biomass during winter with and without ice cover in the context of climate change. *Polish Journal of Ecology*, 61(4), 738-749.
- Lewin, W.-C., Okun, N. & Mehner, T. (2004). Determinants of the distribution of juvenile fish in the littoral area of a shallow lake. *Freshwater Biology*, 49, 410-424. DOI: 10.1111/j.1365-2427.2004.01193.x.
- Li, W., Guo, Y., & Fu, K. (2011). Enclosure Experiment for Influence on Algae Growth by Shading Light. *Procedia Environmental Sciences*, 10(B), 1823-1828. DOI: 10.1016/j.proenv.2011.09.285.
- Loos, S., & Wortelboer, R. (2018). Handreiking voor Vergunningverlening Drijvende Zonneparken op Water. STOWA - Rapport 73, Amersfoort. ISBN: 978.90.5773.832.6.
- Majumder, A., Innamorati, R., Frattolillo, A., Kumar, A., & Gatto, G. (2021). Performance Analysis of a Floating Photovoltaic System and Estimation of the Evaporation Losses Reduction. *Energies 2021*, 14(24). DOI: 10.3390/en14248336.
- Mathijssen, D., Hofsa, B., Spierenburg-Sacka, E., Van Asperena, R., Van der Wal, B., Vreeburg, J., & Ketelaars, H. (2020). Potential impact of floating solar panels on water quality in reservoirs; pathogens and leaching. *Water Practice & Technology*, 15(3), 807-811. DOI: 10.2166/wpt.2020.062.
- Mertens, K. (2022). Photovoltaik -Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis. Carl Hanser Verlag München, 6. E-ISBN: 978-3-446-47429-1.
- Munsch, S.H., Cordell, J.R., & Toft, J.D. (2017). Effects of shoreline armouring and overwater structures on coastal and estuarine fish: opportunities for habitat improvement. *Journal of Applied Ecology*, 54, 1373-1384. DOI: 10.1111/1365-2664.12906.
- Nikolaus, R., Matern, S., Schafft, M., Klefoth, T., Maday, A., Wolter, C., Manfrin, A., Lemm, J.U., & Arlinghaus, R. (2020). Einfluss anglerischer Bewirtschaftung auf die Biodiversität von Baggerseen: Eine vergleichende Studie verschiedener gewässergebundener Organismengruppen. *Lauterbornia*, 87, 153-187.

- Nikolaus, R., Schafft, M., Maday, A., Klefoth, T., Wolter, C., & Arlinghaus, R. (2021): Status of aquatic and riparian biodiversity in artificial lake ecosystems with and without management for recreational fisheries: Implications for conservation. *Aquatic Conservation: Marine Freshwater Ecosystems*, 2021, 31, 153–172. DOI: 10.1002/aqc.3481.
- Nützmann, G., & Moser, H. (2016). Elemente einer analytischen Hydrologie: Prozesse - Wechselwirkungen – Modelle. *Springer Spektrum*, 161-195. ISBN: 978-3-658-00311-1, DOI: 10.1007/978-3-658-00311-1.
- Oliveira-Pinto, S., & Stokkermans, J. (2020). Assessment of the potential of different floating solar technologies – Overview and analysis of different case studies. *Energy Conversion and Management*, 211. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.112747.
- Ono, K., & Simenstad, C.A. (2014). Reducing the effect of overwater structures on migrating juvenile salmon: An experiment with light. *Ecological Engineering*, 71, 180–189. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2014.07.010.
- Overveld, M.A., Blomjous, D., Boot, P., Van den Born, G.J., Brink, C., Brouwer, E.-J., Daniels, B., Drissen, E., Van Dam, D., Geilenkirchen, G., Hammingh, P., Hekkenberg, M., Harmsen, M., Hilbers, H., Hoen, M., Van Hout, M., Ivanova, O., Keys, A., Koelemeijer, R., Koutstaal, P., Lensink, S., Van Meerkerk, J., Van Minnen, J., Nauta, M., Özdemir, Ö., Peters, J., Van Schijndel, M., Schouten, M., Van Soest, H., Stutvoet-Mulder, K., Traa, M., Uitbeijerse, G., Vethman, P., Volkers, C., Vries, A., Van Vuuren, D., & Van der Zanden, E. (2021). Netherlands Climate and Energy Outlook 2021 - Summary. *PBL Netherlands Environmental Assessment Agency*, The Hague. PBL publication number: 4709.
- Page, T., Smith, P.J., Beven, K.J., Jones, I.D., Elliott, J.A., & Maberly, S.C. (2018). Adaptive forecasting of phytoplankton communities. *Water Research*, 134, 74-85. DOI: 10.1016/j.watres.2018.01.046.
- Perez, M., Perez, R., Ferguson, C. R., & Schlemmer, J. (2018). Deploying Effectively Dispatchable PV on Reservoirs: Comparing Floating PV to Other Renewable Technologies. *Solar Energy*, 174, 837-847. DOI: 10.1016/j.solener.2018.08.088.
- Pinto, P.D., Allende, L., & O'Farrell, I. (2007). Influence of free-floating plants on the structure of a natural phytoplankton assemblage: an experimental approach. *Journal of Plankton Research*, 29, 47–56. DOI: doi:10.1093/plankt/fbl056.

- Plenarprotokoll 20/47 des Deutschen Bundestags (2022). Stenografischer Bericht der 47. Sitzung. *Deutscher Bundestag*, 20. Wahlperiode (07.07.2022).
- Rahman, M.M., Hasanuzzaman, M., & Rahim, N.A. (2015). Effects of various parameters on PV-module power and efficiency. *Energy Conversion and Management*, 103, 348-358. DOI: 10.1016/j.enconman.2015.06.067.
- Rahmstorf, S., & Schellnhuber, H.J. (2018). Der Klimawandel - Diagnose, Prognose, Therapie. *Beck'sche Reihe, C.H.BECK*, 8, 9-131. ISBN: 9783406726736, DOI: 10.17104/9783406726736.
- Reges, J.P., Carvalho, P.C.M., De Araujo, J.C., & Carneiro, T.C. (2022). Sizing Methodology of Floating Photovoltaic Plants in Dams of Semi-Arid Areas. *Journal of Solar Energy Engineering*, 144(4). DOI: 10.1115/1.4052959.
- Rosa-Clot, M., & Tina, G.M. (2018). Chapter 4 - Submerged PV Systems. *Modelling, Design and Case Studies*. DOI: 10.1016/B978-0-12-812149-8.00004-1.
- Rosa-Clot, P. (2020). Chapter 9 - FPV and Environmental Compatibility. *Floating PV Plants 2020*, 101-118. DOI: 10.1016/B978-0-12-817061-8.00009-9.
- Sacramento, E.M., Carvalho, P.C.M., De Araujo, J. C., Riffel, D.B., Cruz Correa, R.M., & Neto, J.S.P. (2015). Scenarios for use of floating photovoltaic plants in Brazilian reservoirs. *IET Renewable Power Generation*, 9(8), 1019-1024. DOI: 10.1049/iet-rpg.2015.0120.
- Sahu, A., Yadav, N., & Sudhakar, K. (2016). Floating photovoltaic power plant: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 66, 815-824. DOI: 10.1016/j.rser.2016.08.051.
- Scherer, N.M., Gibbons, H.L., Stoops, K.B., & Muller M. (1995). Phosphorus Loading of an Urban Lake by Bird Droppings. *Lake and Reservoir Management*, 11:4, 317-327. DOI: 10.1080/07438149509354213.
- Schlegel, J. (2021). Auswirkungen von Freiflächen-Photovoltaikanlagen auf Biodiversität und Umwelt. *EnergieSchweiz*, Literaturstudie, 12.
- Schönborn, W., & Risse-Buhl, U. (2013). Lehrbuch der Limnologie. *Schweizerbart*, 2, 209-572. ISBN: 978-3-510-65275-4.
- Schwoerbel, J., & Brendelberger, H. (2013). Einführung in die Limnologie. *Springer Spektrum*, 10, 37-297. ISBN: 978-3-8274-2153-1.

- Semeskandeh, S., Hojjat, M., Abardeh M.H. (2022). Techno–economic–environmental comparison of floating photovoltaic plant with conventional solar photovoltaic plant in northern Iran. *Clean Energy*, 6(2), 353–361. DOI: 10.1093/ce/zkac019.
- Statistisches Landesamt Bremen (2021). Energie- und CO₂-Bilanzen des Landes Bremen 2019. *Referat 31 - Energie, Verkehr, Umwelt - Freie Hansestadt Bremen*.
- Stockhaus, H., Stein, U., Meinecke, L.F., Gerstetter, C., Bodle, R., Vidaurre, R., Holmes, A., Bueb, B., & Hundegger, S. (2021). Potenziale anderer Rechtsbereiche zum Erreichen der Ziele der Wasserrahmenrichtlinie - Abschlussbericht. *Umweltbundesamt UBA*. Forschungskennzahl: 371824 2100.
- Taboada, M.E., Caceres, L., Graber, T., Galleguillos, H., Cabeza, L.F., & Rojas, R. (2017). Solar water heating system and photovoltaic floating cover to reduce evaporation: Experimental results and modeling. *Renewable Energy*, 105, 601-615. DOI: 10.1016/j.renene.2016.12.094.
- Thackeray, S J., Jones, I.D., & Maberly, S.C. (2008). Long-term change in the phenology of spring phytoplankton: species-specific responses to nutrient enrichment and climatic change. *Journal of Ecology*, 96, 523–535. DOI: 10.1111/j.1365-2745.2008.01355.x.
- Theis, O. (2021). Nutzungseinschränkungen an Seen > 10 ha in Niedersachsen durch Interessengruppen und Behörden in Bezug auf die Angelfischerei. *Hochschule Bremen*, Bachelorarbeit.
- Trapani, K., & Santafé, M.R. (2014), A review of floating photovoltaic installations: 2007-2013. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 23(4), 524-532. DOI: 10.1002/pip.2466.
- Turney, D., & Fthenakis, V. (2011). Environmental impacts from the installation and operation of large-scale solar power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(6), 3261-3270. ISSN: 1364-0321, DOI: 10.1016/j.rser.2011.04.023.
- Vo, T.T.E., Ko, H., Huh, J., & Park, N. (2021). Overview of Possibilities of Solar Floating Photovoltaic Systems in the OffShore Industry. *Energies 2021*, 14(21). DOI: 10.3390/en14216988.
- Walston, L.J., Rollins, K.E., LaGory, K.E., Smith, K.P., & Meyers, S.M. (2016). A preliminary assessment of avian mortality at utility-scale solar energy facilities in the United States. *Renewable Energy*, 92, 405-414. DOI: 10.1016/j.renene.2016.02.041.

- Wang, T.-W., Chang, P.-H., Huang, Y.-S., Lin, T.-S., Yang, S.-D., Yeh, S.-L., Tung, C.-H., Kuo, S.-R., Lai, H.-T., & Chen, C.-C. (2021). Effects of floating photovoltaic systems on water quality of aquaculture ponds. *Aquaculture Research*, 53(4), 1304-1315. DOI: 10.1111/are.15665.
- Watz, J., Bergman, E., Calles, O., Enefalk, A., Gustafsson, S., & Hagelin, A. (2015). Ice cover alters the behavior and stress level of brown trout *Salmo trutta*. *Behavioral Ecology*, 26 (3), 820-827. DOI: 10.1093/beheco/arv019.
- Weselek, A., Bauerle, A., Hartung, J., Zikeli, S., Lewandowski, I., & Högy, P. (2021). Agri-voltaic system impacts on microclimate and yield of different crops within an organic crop rotation in a temperate cli-mate. *Agronomy for Sustainable Development*, 41(5), 1-15. DOI: 10.1007/s13593-021-00714-y.
- Wesselak, V., & Voswinckel, S. (2016): Photovoltaik - Wie Sonne zu Strom wird. *Springer Verlag*, 2, 12-94. ISBN: 978-3-662-48906-2, DOI: 10.1007/978-3-662-48906-2.
- Wesselak, V., Schabbach, T., Link, T., & Fischer, J. (2017). Handbuch Regenerative Ener-gietechnik. *Springer Verlag*, 3, 16-235. ISBN: 978-3-662-53073-3, DOI: 10.1007/978-3-662-53073-3.
- Wind, T., Schumann, M. & Brinker, A. (2022). Wie nachhaltig sind Forellen aus baden-würt-tembergischer Aquakultur. *Auf*, Aquakultur- Und Fischereiinformationen, 30-33, (02.2022).
- Wirth, H. (2022). Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. *Fraunhofer-Institut für So-lare Energiesysteme ISE* (01.05.2022).
- Witsch, K. (2022). Trends der Photovoltaik: Schwimmende Solarkraftwerke stehen vor dem Durchbruch. *Handelsblatt GmbH*, (29.07.2022).
- Wittig, R., & Niekisch, M. (2014). Biodiversität: Grundlagen, Gefährdung, Schutz. *Springer Spektrum*, 125-166. ISBN: 978-3-642-54694-5, DOI: 10.1007/978-3-642-54694-5.
- Won, C.-S., Lawrence, W., Kim, D., Kang, D., Kim, K., Lee, L. (2016): Floating PV power system evaluation over five years (2011–2016). *Proceedings of the EU PVSEC*, 1982 - 1984. DOI: 10.4229/EUPVSEC20162016-5BV.2.40.
- Woolway, R.I., & Merchant, C.J. (2019): Worldwide alteration of lake mixing regimes in re-sponse to climate change. *Nature Geoscience*, 12, 271-276. DOI: 10.1038/s41561-019-0322-x.

- Woolway, R.I., Meinson, P., Noges, P., Jones, I.D., Laas, A. (2017). Atmospheric stilling leads to prolonged thermal stratification in a large shallow polymictic lake. *Climatic Change*, 141, 759–773. DOI: 10.1007/s10584-017-1909-0.
- Woolway, R.I., Weyhenmeyer, G.A., Schmid, M., Dokulil, M.T., Eyto, E., Maberly, S.C., May, L., & Merchant, C.J. (2019). Substantial increase in minimum lake surface temperatures under climate change. *Climatic Change*, 155, 81-94. DOI: 10.1007/s10584-019-02465-y.
- Yang, P., Chua, L.H.C., Irvine, K.N., Nguyen, M.T., & Low, E.-W. (2022). Impacts of a floating photovoltaic system on temperature and water quality in a shallow tropical reservoir. *Limnology* 2022, 23, 441-454, Springer. DOI: 10.1007/s10201-022-00698-y.
- Yashas, V., Aman, B., & Dhanush, S. (2021). Feasibility study of floating solar panels over lakes in Bengaluru City, India. *Smart Infrastructure and Construction, Proceedings of the Institution of Civil Engineers ICE*, 174(1), 1-10. E-ISSN: 2397-8759, DOI: 10.1680/jsmic.21.00002a.
- Yousuf, H., Khokhar, M.Q., Zahid, M.A., Kim, J., Kim, Y., Cho, E.-C., Cho, Y.H., & Yi, J. (2020). A Review on Floating Photovoltaic Technology (FPVT). *Current Photovoltaic Research*, 8(3), 67-78. DOI: 10.21218/CPR.2020.8.3.067.
- Zhang, N., Jiang, T., Guo, G., Qiao, L., Yin, L., Yu, L., Murto, P., & Xu, X. (2020). High-performance semitransparent polymer solar cells floating on water: Rational analysis of power generation, water evaporation and algal growth. *Nano Energy*, 77, 105111. DOI: 10.1016/j.nanoen.2020.105111.
- Ziar, H., Prudon, B., Lin, F.-Y., Roeffen, B., Heijkoop, D., Stark, T., Teurlincx, S., De Senerpont, Domis, L., Goma, E.G., Extebarria, J.G., Alvaez, I.N., Tilborg, D., Laar, H., Santbergen, R., & Isabella, O. (2020). Innovative floating bifacial photovoltaic solutions for inlandwater areas. *Progress in Photovoltaics*, 29(7), 725-743. Special Issue: EU PVSEC, DOI: 10.1002/pip.3367.

Internetquellen

- BayWa r.e. AG (2021): Größte Floating-PV-Anlagen außerhalb Asiens in Betrieb. *BayWa r.e. Solar Projects GmbH* in Kooperation mit *GroenLeven* (19.07.2021). <https://www.baywa-re.com/de/news/details/groesste-floating-pv-anlagen-ausserhalb-asiens-in-betrieb> [07.11.2022]

- Ciel et Terre International (2022): Prducts Hydrelío air range. *Ciel et Terre International SAS*. SIREN: 792 004 525. <https://ciel-et-terre.net/solutions/products/> [15.11.2022]
- Diermann, R., & Enkhardt, S. (2022): BayWa re baut erste förderfreie schwimmende Photovoltaik-Anlage in Deutschland. *PV Magazine*. <https://www.pv-magazine.de/2022/02/07/baywa-re-baut-erste-foerderfreie-schwimmende-photovoltaik-anlage-in-deutschland/> [10.11.2022]
- EDP S.A. (2022): Inauguration of the Floating Solar Power Plant in Alqueva. *EDP Energias de Portugal*, Alqueva floating solar park (15.07.2022). <https://portugal.edp.com/en/innovation/floating-solar-panels> [10.11.2022]
- EnBW Energie Baden-Württemberg AG (2021). Schwimmende Solaranlagen bringen´s. *Eco*Journal* (08.02.2021). <https://www.enbw.com/unternehmen/eco-journal/schwimmende-photovoltaikanlage.html> [11.11.2022]
- Erdgas Südwest GmbH (2020). 1 Jahr Schwimmende Photo-voltaik-anlage Renchen – eine Erfolgs-bilanz. *natürlichZukunft* (04.12.2020). <https://www.erdgas-suedwest.de/natuerlichzukunft/schwimmende-photovoltaik-renchen-bilanz/> [11.11.2022]
- EU-Kommission, Generaldirektion ENV (2022). Biodiversity: Commission guidance on new protected areas to help put Europe’s nature on path to recovery by 2030. *Directorate-General for Environment*, News article (28.01.2022). <https://environment.ec.europa.eu/news/protecting-biodiversity-commission-advises-how-designate-additional-protected-areas-2022> [05.11.2022]
- GroenLeven (2020): Drijvend zonnepark Bomhofspas - “Schwimmender Solarpark Bomhofspas”. *GroenLeven B.V.* KvK: 54505801. <https://groenleven.nl/projecten/drijvend-zonnepark-bomhofspas/> [08.11.2022]
- Kempf, R. (2021). Schwimmende Photovoltaikanlagen- Floating-PV-System der BayWa r.e. *BayWa r.e. renewable energy GmbH*, Projektentwicklung Deutschland. <https://docplayer.org/223465267-Schwimmende-photovoltaikanlagen-floating-pv-system-der-baywa-r-e-raphael-kempf-projektentwicklung-deutschland-muenchen.html> [06.11.2022]
- McKinsey & Company (2022). Global Energy Perspective 2022. *McKinsey Energy Insights*. https://www.mckinsey.com/~/_/media/McKinsey/Industries/Oil%20and%20Gas/Our%20Insights/Global%20Energy%20Perspective%202022/Global-Energy-Perspective-2022-Executive-Summary.pdf [08.11.2022]

- Quarzwerke GmbH (2022 a): Wir bauen Deutschlands größte schwimmende PV-Anlage. *Quarzwerke Gruppe Blog*, Haltern (01.04.2022). <https://blog.quarzwerke.de/wir-bauen-deutschlands-groesste-schwimmende-pv-anlage/> [12.11.2022]
- Quarzwerke GmbH (2022 b): 25. Mai 2022 | Offizieller Startschuss für Deutschlands größte schwimmende Photovoltaikanlage. *Quarzwerke Gruppe*, Presse Aktuelles (25.05.2022). <https://www.quarzwerke.com/footer/news-detail/offizieller-startschuss-fuer-deutschlands-groesste-schwimmende-photovoltaikanlage> [12.11.2022]
- Statistisches Bundesamt (2021). Bodenfläche insgesamt nach Nutzungsarten in Deutschland (2021). *Statistisches Bundesamt (Destatis)* am 31.12.2021. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Flaechennutzung/Tabellen/bodenflaeche-insgesamt.html> [15.12.2022]
- World Bank Group, ESMAP & SERIS (2019): Where Sun Meets Water: Floating Solar Market Report. *Energy Sector Management Assistance Program*. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/579941540407455831/pdf/Floating-Solar-Market-Report-Executive-Summary.pdf> [05.11.2022]
- Wortelboer, R., Loos, S., & Boderie, P. (2018): Analysetool Zon op Water 11 Juli 2018. *Renewable energy and impacts on aquatic ecology*. (07.2018). https://www.researchgate.net/publication/342475849_Analysetool_Zon_op_Water_11_Juli_2018 [09.12.2022]

Anhang

Anhang zu den Methoden - Suchparameter

Für diese Bachelorarbeit ist eine Internetrecherche über Google Scholar in Verbindung mit einer VPN "Virtual Private Network" über das Netzwerk der Hochschule Bremen durchgeführt worden. Dieser Schritt ist nötig, um Zugang zu wissenschaftlichen Artikeln, Büchern und meist kostenpflichtigen Journalen zu erlangen. Es wurde in die Studienregister der identifizierten Studien geschaut und um die Suchparameter um weitere Begriffe zu erweitern. Die Suche fand größtenteils in Deutsch und Englisch statt, aber auch im niederländischen, französischen und portugiesischen Sprachraum wurde zu FPV recherchiert.

Die Suchbegriffe ("Search Keys/Keywords") wurden einzeln oder miteinander verbunden verwendet:

"Floating Photovoltaics/Solar-System oder Plants/Modules/Farms (FPV)" in Kombination mit "Potential", "Effects on Water Quality oder Ecosystem", "Electricity Generation", "System Efficiency; Energy Yield", "Water Saving", "Ecosystem Impacts", "Evaporation".

Weitere Begriffe: "Mixed depth", "Avian mortality", "Ice Cover", "Bird Mortality at Photovoltaic Facilities", "Phytoplankton Diversity and Biomass", "Pier Shading", "Zooplankton influenced by Water Temperature", "Aboveground Biomass", "Ecosystem Services", "Anoxia", "Dissolved Oxygen", "Concentration", "Disturbance", "Environmental Stress", "Armouring and Overwater Structures", "Survival of Fishes", "Comparing FPV Technologie", "Effects of Climate Change in Lakes", "Impact of Solar Farms on Birds, Bats or General Ecology", "Infrastructure", "Modules", "Components of FPV or FPV Design Factors", "Bifacial PV", "Ecology", "Modeling", "Monitoring", "Onshore", "Partial Water Soaking", "Photovoltaic (PV) Module", "Retractable", "Sun Tracker", "Thermal Stratification in a Lake", "Warming", "Limnology", "Terrestrial Photovoltaic", "Mixing Regimes", "Response to Climate Change", "Eutrophication", "Algae Reduction", "Shading Light", "Illumination Intensity", "Algae", "Water and Ecology Management", "Thin Film Solar Cell", "Types of Solar PV Installation", "Clean Energy", "Floating urbanization", "Heat Loss Factor", "Cooling Effect", "PV passive Water Cooling", "Water Evaporation Reduction", "Climate Adaptation/Mitigation", "Water Temperature", "Microencapsulated Phase Change Material", "Adaptation to Climate Change", "Floating Houses", "Offshore and Land-based Photovoltaic", "Water Conservation", "Sustainability", "Environmental", "Pilot project", "Field survey", "Renewable Energy", "Aquaculture", "Aquavoltaics", "Floatovoltaics", "Solar Cell Technology", "Submerged Photovoltaics (SPV)", "PV/FPV Generation Efficiency". "Schwimmende Photovoltaik/Solar-Anlagen", "Photovoltaik", "Limnologie", "Aquatische Systeme", "Anthropogene Temperaturveränderungen", "Hydrologie", "Sauerstoffgehalt in stehenden Gewässern", "Auswirkungen von Photovoltaikanlagen auf Biodiversität und Umwelt", "Biodiversität", "Vogelsterblichkeit", "Regenerative Energietechnik", "Durchmischung", "Thermische Schichtung".