



GEORG-AUGUST-UNIVERSITÄT
GÖTTINGEN IN PUBLICA COMMODA
SEIT 1737

Bachelorarbeit im wissenschaftlichen Studiengang Agrarwissenschaften an der
Georg-August-Universität Göttingen, Fakultät für Agrarwissenschaften

Der Einfluss von Photovoltaikmodulen auf den Ertrag und die Futterqualität von Grünland. Eine wirtschaftliche Doppelnutzung?

Ergebnisse aus einem Solarpark auf Moor

Angefertigt im Departement für Graslandwissenschaften

1. Prüfer: Prof. Dr. Johannes Isselstein
2. Prüferin: Dr. Dina Hamidi

Verfasser: Pia Tegtmeyer
Matrikelnummer: 21969439
Studienrichtung: Wirtschafts- und Sozialwissenschaften des Landbaus
Abgabetermin: 13.11.2023

Zusammenfassung

Im Zuge des Klimawandels sind Anpassungen notwendig. Deutschland setzt viel auf den Ausbau der erneuerbaren Energien. Gleichzeitig bleibt das Flächenangebot begrenzt. Doch was passiert, wenn eine landwirtschaftliche Nutzfläche mit Solarpaneelen bebaut wird? Gibt es eine Perspektive auf eine wirtschaftliche Doppelnutzung? In dieser Arbeit wird untersucht, welchen Einfluss die Solarmodule auf das Grünland haben und wie sinnvolle Nutzungsmöglichkeiten aussehen können. Der Versuchstandort "Solarpark Lottorf" ist ein Freiflächen-Photovoltaikpark, der auf einer wiedervernässten Grünlandfläche im Moor erbaut wurde. In dieser Arbeit wird untersucht, welchen Einfluss die Solarmodule auf den Ertrag und die Inhaltsstoffe des Grünlands nehmen und ob damit eine Doppelnutzung für die Gewinnung von Futtermitteln aus wirtschaftlichen Aspekten sinnvoll sein könnte. Es geht ausschließlich um die Eignung als Futtermittel in Hinblick auf Qualität und Quantität des Grases. Dabei wird die Biomasse an mehreren Stellen in den Versuchstransekten unterhalb und zwischen den Modulen mit zwei Referenztransekten auf freier Fläche verglichen. Der Ertrag war innerhalb der Versuchsperiode von April 2023 bis Juli 2023 unter den Solarmodulen insgesamt am niedrigsten und zwischen den Modulreihen am höchsten. Bei sehr warmen und trockenen Wetterverhältnissen war der Ertrag unter den Solarpanels höher. Zudem waren unter den Modulen der Rohproteingehalt und der Fasergehalt höher als an anderen Standorten. Dafür wurde auf der Freifläche und zwischen den Modulen ein höherer Zuckergehalt festgestellt. In Hinblick auf die Inhaltsstoffe wäre das Grünland als Futter für Wiederkäuer geeignet, für Pferde nur bedingt. Die recht gute Futtereignung für Wiederkäuer macht eine Doppelnutzung aus wirtschaftlicher Sicht erwägenswert.

Abstract

Climate change requires adjustments. Germany focuses on the expansion of renewable energies. At the same time, the amount of available land remains limited. What happens if solar panels are built on agricultural land? Is there a prospect of economic dual use? This study examines the impact of solar panels on grassland and shows how utilization options might look like. The trial location "Solarpark Lottorf" is an open-space photovoltaic park built on peatland. It also examines the influence of solar modules on the yield and ingredients of grassland and whether dual use for production of animal feed could be economically viable. The thesis focuses on the suitability as animal feed in terms of the quality and quantity of the grass. Biomass is compared with two reference transects on open land with the experimental transects placed below and between the modules. During the trial period from April 2023 to July 2023, the yield was lowest overall under the solar modules and highest between the rows of modules. In very warm and dry weather conditions, the yield under the solar panels was higher. In addition, the protein and fiber content was higher under the modules than in other locations. Moreover, a higher sugar content was attested in the open area and between the modules. In terms of ingredients, the grassland would be suitable as forage for ruminants, but only to a limited extent for horses. The good suitability for ruminants makes an economic dual use worth considering.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	II
Abstract	III
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	VI
1 Einleitung	1
1.1 Einordnung in Kontext.....	1
1.2 Freiflächen PV Anlagen – Technik und Planung	2
1.3 Dauergrünland und wirtschaftliche Nutzungsmöglichkeiten in Deutschland	3
1.4 Wachstumsfaktoren für das Grünland und ihre Bedeutung für die Pflanze	5
1.5 Beeinflussung des Mikroklimas durch Agroforstsysteme und Solarparks	7
1.6 Grünland als wirtschaftlich essenzielles Futtermittel	9
1.7 Zielsetzung der Arbeit	14
2 Material und Methoden	16
2.1 Versuchsstandort Lottorf	16
2.2 Aufbau des Versuchs	18
2.3 Datenerhebung.....	19
2.4 Datenanalyse	20
3 Ergebnisse	21
3.1 Vergleich der Standorte von den Transekten auf die durchschnittliche Wuchshöhe, Trockenmasse und Trockensubstanz.....	21
3.2 Vergleich der Standorte von den Transekten auf die Qualitätsparameter	22
3.3 Vergleich der Qualitätsschnitte an den Sensoren der Transekte unter den Solarmodulen auf die Ertrags- und Qualitätsparameter	25
4 Diskussion	26
5 Fazit	32
Literaturverzeichnis	i
Anhang.....	v
Eidesstattliche Erklärung	vii

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Solarpark Lottorf.....	16
Abbildung 2: Monatliche Sonnenscheindauer in Stunden für Schleswig	18
Abbildung 3: Niederschlagshöhe in mm für Schleswig	18
Abbildung 4: Schemazeichnung Lage des ersten Triplets.	18
Abbildung 5: Boxplots der Ertrags- und Qualitätsparameter	24

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Messdaten Wetterstation Lottorf	18
Tabelle 2: CV-Tabelle	v
Tabelle 3: Durchschnittliche Messdaten pro Qualitäts- und Kalibrationschnitt.....	vi

Abkürzungsverzeichnis

ATP	Adenosintriphosphat
ADL	Acid Detergent Lignin
ADFom	Acid Detergent Fiber organic matter
BfN	Bundesamt für Naturschutz
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
BMELV	Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
BZL	Bundesinformationszentrum Landwirtschaft
CSH	compressed sward height
DeFAF	Deutscher Fachverband für Agroforstwirtschaft
DKK	Deutsches Klima Konsortium
DWD	Deutscher Wetterdienst
EE	Erneuerbare Energien
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
Fru	Fruktan
GWp	Gigawatt-Peak
Ha	Hektar
kg	Kilogramm
Lfl	Bayrische Landesanstalt für Landwirtschaft
LUFA	Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt
NfE	Stickstofffreie Extraktstoffe
ME	Metabolisierbare Energie
MJ	Megajoule
aNDFom	amylase Neutral Detergent Fiber organic matter
NIRS	Nahinfrarot-Spektroskopie
OS	Organische Substanz
PV	Photovoltaik
Rpm	Rotation per minute
TM	Trockenmasse
TS	Trockensubstanz
XA	Rohasche
XF	Rohfaser
XL	Rohfett
XP	Rohprotein
XZ	Rohzucker

1 Einleitung

1.1 Einordnung in Kontext

Klimawandel – ein globales Problem dessen Auswirkungen auch auf Bundesebene zu spüren sind (DKK 2020). Treibhauseffekte sollen in Deutschland langfristig gesenkt werden. Die Energiewende, als Anpassungsstrategie für den Klimawandel, erfordert einen erheblichen Ausbau an erneuerbaren Energien. Mit ihnen soll bis 2023 bereits 80 % des Strombedarfs in Deutschland gedeckt werden und bis 2045 soll die Klimaneutralität erreicht werden. Dabei wird vor allem auf Wind- und Solarenergie gesetzt. Im Jahr 2021 deckten die erneuerbaren Energien 41 % des Bruttostromverbrauchs. Im ersten Halbjahr 2023 waren es bereits 52 % (Die Bundesregierung, 2023). Davon deckt die Solarenergie an sonnigen Tagen bereits zwei Drittel unseres Bruttostrombedarfs. Zur Erreichung der Klimaziele muss der Ausbau von Freiflächenanlagen, auch auf landwirtschaftlich genutzten Flächen, beschleunigt werden. Rechnerisch sind laut Wirth, Fraunhofer ISE (2023) ca. 215 GWp Photovoltaik bis 2030 notwendig, um das 80 % Ziel sicher erreichen zu können. (Wirth, 2023; UBA, 2023)

Im Jahr 2021 wurden rund 32.000 Hektar mit Photovoltaik (PV) bebaut. Als bevorzugte Standorte für die Anlagen zählen dabei Konversionsflächen, die 2021 mit 36 % (11.460 ha) den Großteil der PV-Freiflächen ausmachten. Auch landwirtschaftlich genutzte Flächen zählen zu den präferierten Standorten. Auf Ackerflächen stehen 9.600 ha (30 % von 32.000 ha) und auf Grünland 1.060 ha (3 % von 32.000 ha) Freiflächen PV-Anlagen. (Günnewig et al., 2022)

Mit dem Bau von Photovoltaikanlagen auf landwirtschaftlichen Flächen, wurde der Boden meistens aus der landwirtschaftlichen Produktion genommen. Dabei könnte eine Doppelnutzung möglich oder vielleicht sogar sinnvoll sein. Diese muss nicht zwingend die landwirtschaftliche Nutzung im konventionellen Sinne sein, es können auch Ziele wie Förderung der Biodiversität und Klimaschutz in den Vordergrund rücken. Mit der Wiedervernässung von Grünland, woraus eine extensive Nutzung resultiert, kann beispielsweise CO₂ eingespart werden (NDR, 2021; NDR, 2023)

1.2 Freiflächen PV Anlagen – Technik und Planung

Der Strom aus Photovoltaik zählt inzwischen als günstig und vollkommen emissionsfrei (Wirth, 2023). Dabei wird Sonnenlicht in elektrische Energie umgewandelt, indem die Solarzellen der PV-Anlagen das Licht einfangen und die Photonen in elektrische Ströme umwandeln. Im Erneuerbaren Energien Gesetz (EEG) 2023 wurde bis 2030 der Ausbau auf 215 GWp und bis 2040 auf 400 GWp als Ziel festgeschrieben. Für den Vergleich: Dank eines Zubaus von 7,2 GWp im Jahr 2022 erreichten die PV-Anlagen in Deutschland eine installierte Leistung von 67,4 GWp. (Wirth, 2023)

Ein wichtiger Teil für die Genehmigung einer PV-Freiflächenanlage auf landwirtschaftlich genutzten Flächen ist die Umweltverträglichkeitsprüfung. Das gilt besonders, wenn der Standort sich in einem Landschafts- oder Naturschutzgebiet befindet. Dabei wird beurteilt, wie stark und in welcher Form durch Flächeninanspruchnahme und Nutzungsänderung Einfluss auf die Ökosysteme genommen wird. Die Einschätzung der Auswirkungen auf den Naturhaushalt und das Landschaftsbild sowie die erforderlichen Kompensationsmaßnahmen hängen von der naturschutzfachlichen Bewertung des bestehenden Zustands ab. Dabei wird die Verteilung der Anlage, ihre Höhe, Größe und Sichtbarkeit sowie die topografischen Gegebenheiten des Standortes und seiner Umgebung zusammenhängend beurteilt. (Günnewig et al., 2022)

Das soll nicht heißen, dass sich Naturschutz und Solarparks generell widersprechen. In bestimmten Projekten kann zum Beispiel die Förderung eines artenreichen Grünlandes mit geplant werden. In die Gestaltung können Maßnahmen für Ausgleichsflächen oder für den Naturschutz einfließen, damit die biologische Artenvielfalt unterstützt werden kann. Das können beispielsweise kleine Randstreifen mit Blühwiese aber auch eine Umnutzung von intensiver Agrarlandschaft zu einem extensiven Grünlandbiotops sein. Je vielfältiger die Projekte geplant werden, desto vorteilhaftere sind die Auswirkungen auf die Umweltprüfung zu erwarten. (Günnewig et al., 2022)

1.3 Dauergrünland und wirtschaftliche Nutzungsmöglichkeiten in Deutschland

In Deutschland wurden 2022 rund 4,73 Millionen Hektar (Mio. ha) Dauergrünland bewirtschaftet, dies entspricht insgesamt einem Anteil von 28,5 % an der landwirtschaftlich genutzten Fläche. (UBA, 2023).

Die Erscheinungsbilder von Grünland können sehr vielfältig sein. Auch die Erträge können in Bezug auf Qualität und Quantität erheblich schwanken. Die Unterschiede ergeben sich zum einen aus dem Standort (z.B. Alpenregion im Gegensatz zu Norddeutschen Tiefland) aber vor allem auch aus der Art sowie der Intensität der Bewirtschaftung. Besonders wertvoll für die Biodiversität ist dabei das extensive Grünland. Durch verminderten Einsatz von Pflanzenschutzmittel und Düngemittel sowie einer weniger intensiven Pflege und Nutzung entsteht eine sehr artenreiche Agrarlandschaft. Diese wirkt sich positiv auf Umwelt und Mensch aus (BZL, 2023). Die Verbesserung des Artenschutzes, Erosionsschutzes, Gewässerschutzes und der Speicherung von Kohlenstoffdioxid sowie einen Erholungswert durch ein attraktives Landschaftsbild können als sogenannte Ökosystemdienstleistungen bereitgestellt werden (Freese, 2013).

Vor allem der Artenschutz spielt dabei eine besonders große Rolle. Durch den Schutz des Artenreichtums wird die Biodiversität verbessert. Knapp 2.000 von 3.600 heimische Farn- und Blütenpflanzen sind im Grünland zu finden (Gerowitt et al., 2013). Davon wächst die Hälfte fast oder vollkommen ausschließlich nur auf Grünlandbiotopen. Auch Insekten, die später für die Bestäubung von Ackerkulturen notwendig sind, oder Nützlinge, die natürliche Gegenspieler von tierischen Schädlingen sind, finden dort einen Lebensraum. (Gerowitt et al., 2013)

Des Weiteren ist Grünland durch den permanenten Bewuchs und die gute Durchwurzelung des Bodens dazu geeignet, Bodenerosion deutlich zu vermindern (BMEL, 2020). Das bietet zusätzlichen Schutz in Hochwassergebieten. Zudem ist die Wasserinfiltration im Vergleich zu Ackerflächen effektiver. Nährstoffausträge in Grund- und Oberflächengewässer werden durch die Filtration und Pufferfunktion im Grünland verringert. (BfN, 2014)

Als Kohlenstoffdioxidsenke wird das Gas aus der Atmosphäre aufgenommen und in Grünland gespeichert. Zum einen nehmen die Pflanzen im Rahmen der Photosynthese das Kohlenstoffdioxid für ihr Wachstum auf. Des Weiteren wird die organische Masse durch

Akkumulation in Form von Humus im Boden gespeichert. Dabei wird Kohlenstoff aus dem abgestorbenen organischen Teil von Pflanzen und Tieren von Mikroorganismen abgebaut. Übrig bleibt das kohlenstoffreiche Humus, welches im Boden abgelagert wird. Der Effekt der Akkumulation verstärkt sich nochmal auf feuchten und moorigen Standorten. (Gerowitt et al., 2013)

Die meistverbreiteten landwirtschaftlichen Nutzungsformen sind die Beweidung, die Futterkonservierung und die Nutzung als Energiepflanzen in Biogasanlagen. Bei der Beweidung kann sich die Nutzungsintensität sehr durch Standort, betriebliche Kapazität sowie die Art des Betriebes unterscheiden. So eignen sich anspruchslose Rinderrassen gut für die Beweidung von extensivem Grünland, das für die Ernährung der Milchkühe nicht ausreichend wäre. Diese benötigen Futtermittel mit viel Energie. Durch begrenzte Pansenkapazität können Hochleistungsmilchkühe ihren Energiebedarf nicht ausschließlich durch extensives Grünland decken. In den meisten Betrieben ist eine Kombination aus Gras- oder Maissilagen sowie Kraftfutter üblich. Das führt zur Intensivierung vom Grünland und bis 2014 zum Umbruch zu Ackerland, damit dort Energiepflanzen angebaut werden können. Diese Maßnahmen sind zum Teil notwendig, um am Markt überhaupt bestehen zu können, da diese Form der Bewirtschaftung häufig rentabler ist und einige Betriebe auch auf höhere Erträge aufgrund begrenzter Flächenkapazitäten angewiesen sind. Dabei bestimmt die Häufigkeit der Schnitte oder auch Weideperioden den Grad der Intensivierung. Um die Schnitte lange haltbar zu machen, müssen diese konserviert werden. Bei Grassilage wird der Grünschnitt luftdicht verschlossen, dass die anaerobe Milchsäuregärung stattfinden kann. Für Heu sind mehrere Tage gutes Wetter nötig, damit das Schnittgut vollständig getrocknet und damit lagerfähig ist. (Gerowitt et al., 2013)

Bei der energetischen Nutzung hängt die Stromausbeute und damit der Gewinn vom Energiegehalt des Grünschnitts ab. Je mehr Energie im Grünland steckt, desto höher ist die Biogasproduktion je Masse. Damit rentieren sich hier ähnlich wie in der Milchviehhaltung nur die intensiven Bewirtschaftungsformen, die allerdings zu einer Verringerung der Artenvielfalt führen. (BfN 2014; Gerowitt et al., 2013)

1.4 Wachstumsfaktoren für das Grünland und ihre Bedeutung für die Pflanze

Das Licht ist eine der wichtigsten abiotischen Umweltfaktoren, da es als Energiequelle für die Photosynthese dient. Die Photonen der Lichtstrahlen werden im Chlorophyll absorbiert und in chemische Energie umgewandelt. Mithilfe dieser Energie kann die Pflanze Kohlenstoffdioxid und Wasser in Glukose und Sauerstoff umwandeln. Dieser energiereiche Zucker dient der Pflanze als Energielieferant für das Wachstum und als Speicher. Dabei ist die Photosyntheserate von Lichtintensität und -spektrum abhängig. Auch wenn jede Pflanzenart ihre spezifische Präferenzbereiche hat, lässt sich vereinfacht sagen, dass die Produktivität bis zum Sättigungspunkt mit zunehmender Lichtintensität ansteigt (excite, 2020; Pflanzenforschung.de, 2023).

Auch Wärme ist eine Energieform, die die Photosyntheseaktivität bis zu einem spezifischen Sättigungspunkt beschleunigt, denn mit steigender Temperatur steigt auch der Wasserverlust der Pflanze an. Wenn nicht genug Wasser zur Verfügung steht, wird die Produktivität limitiert. Steigt die Temperatur über 45 Grad, kann die Pflanze sogar stark geschädigt werden, da wichtige Proteine zerstört werden. Ist die Temperatur wiederum zu niedrig, werden die biologischen Prozesse der Pflanzen ebenfalls gehemmt oder kommen gänzlich zum Erliegen. Dies geschieht spätestens bei 0 °C, wenn Wasser seinen Gefrierpunkt erreicht. (StudySmarter, 2023)

Wasser ist in dreierlei Hinsicht zwingend erforderlich für die Pflanze. Zum einen ist es ein Edukt für die Photosynthese. Des Weiteren ist es für die Ernährung der Pflanze obligatorisch. Im Wasser sind alle Nährstoffe, die für die Pflanze notwendig sind, gelöst und können sowohl in die als auch innerhalb der Pflanze transportiert werden. Zu guter Letzt ist Wasser die Voraussetzung für den Zellinnendruck. Durch die Aufnahme von Wasser entsteht ein hydrostatischer Druck. Dabei entsteht Druck im Zellsaft, der gegen die Zellwände drückt und damit die Pflanze aufrichtet. Auch der Prozess der Zellteilung und der Transport von Wasser mit den darin gelösten Nährstoffen wäre ohne diesen Turgordruck nicht möglich. Wassermangel und -überschuss wirken sich gleichermaßen negativ auf die Pflanze aus. Ein optimaler Feuchtegradient in der Umgebung sorgt für eine gute Photosyntheseaktivität (StudySmarter, 2023)

Für die Zellatmung ist Sauerstoff notwendig. Hierbei wird die in Form von Glukose gespeicherte Energie aus der Photosynthese mithilfe von Sauerstoff zu dem Energieträger Adenosintriphosphat (ATP) umgewandelt. Dieser macht die Energie für die Pflanze nutzbar und ist somit essenziell für sämtliche zelluläre Prozesse. (Braun et al., 2016)

Zudem benötigt die Pflanze auch noch einige Nährstoffe für unterschiedliche Prozesse. Während Stickstoff, Phosphor und Kalium für die Photosynthese notwendig sind, gehören ebenfalls Magnesium, Kalzium und Schwefel zu den wichtigsten Hauptnährstoffen. Für das Pflanzenwachstum sind auch noch weitere Mikronährstoffe wie unter anderem Eisen, Mangan, Zink, Chlor, Kupfer, Bor, Molybdän, Nickel und viele weitere Spurennährstoffe obligatorisch. (StudySmarter, 2023)

Mit zunehmender Düngung der Nährstoffe, besonders von Stickstoff, erhöht sich der Ertrag vom Grünland. Die Nährstoffe stehen dadurch ausreichend zur Verfügung und wirken sich bei guten Bedingungen positiv auf die Zunahme von Biomasse aus. Doch vor allem in Jahren, in denen es sehr trocken und heiß ist, zeigen sich in gedüngten Kulturen sehr starke Schwankungen im Ertrag. Trockenstress und hohe Temperaturen im Sommer lassen sich daher als stärkste limitierende Wachstumsfaktoren bezeichnen. In Grünland, das wenig oder gar nicht gedüngt ist, sind die Auswirkungen der mangelnden Wasserverfügbarkeit und der Hitze nicht ganz so stark erkennbar. Jedoch ist das Ertragsniveau insgesamt auch niedriger. (Macholdt et al., 2023)

Mithilfe der Glukose und dem aus der Zellatmung gewonnenen ATP lassen sich Verbindungen zu langen Ketten zusammenfügen aus denen unter anderem Zellulose oder Stärke gebildet werden kann. Für die Entstehung einer Zelluloseeinheit sind bis zu 8.000 Monosaccharid-Verbindungen notwendig. Sie geben der Pflanze Struktur und Stabilität. Stärke ist eine sehr wichtige Speicherform für Energie aus Kohlenhydraten und wird unter anderem im Samen gespeichert, um bei der Entwicklung neuer, junger Pflanzen als Energiequelle genutzt werden zu können. Insgesamt kommen Kohlenstoffverbindungen am häufigsten in der Pflanze vor. (Braun et al., 2016)

Auch die Synthese von Fetten und Proteinen bauen auf dem Endprodukt der Photosynthese auf, denn Glycerin und Aminosäuren werden ebenfalls aus Glukose gebildet. Pflanzliche Lipide sind die Fettsubstanzen, die aus verschiedenen Triglyceriden aufgebaut sind. Sie haben

einen sehr hohen Energiegehalt und werden zusätzlich als Energiespeicher genutzt. Die Samen der Gräser sind besonders reich an Lipiden. Proteine werden aus spezifischen Aminosäuren gebildet, die sich zu komplexen Polymeren verbinden. Die Proteine bilden die Grundlage der Enzyme, welche sämtlich biochemische Reaktion in der Pflanze steuern. Quantitativ betrachtet spielen sie in der gesamten Pflanze, bis auf bestimmte Teile wie Samen oder Blätter, eine nicht so große Rolle wie die Kohlenstoffverbindungen (Braun et al. 2016)

Auch Polyphenole, wie Lignin werden von der Pflanze selbst gebildet. Diese netzartigen Verbindungen befinden sich zwischen den Zellulosepartikeln und sorgen für zusätzliche Stabilität und Schutz der Pflanze. (Braun et al., 2016)

1.5 Beeinflussung des Mikroklimas durch Agroforstsysteme und Solarparks

Das Mikroklima und dessen Auswirkungen ist ein komplexes Thema, welches aktuell noch immer erforscht wird. Einige Untersuchungen der Veränderungen im Zusammenhang mit Agroforstsystemen zeigen positive Effekte für Nutzpflanzen (Kanzler et al., 2015 & 2017). Agroforstsysteme wurden in diesem Beispiel gewählt, da diese schon deutlich intensiver untersucht sind und ähnliche Auswirkungen wie Solarparks vermuten lassen. Statt der PV-Module stehen hier Bäume oder Sträucher in Reihen und beeinflussen dabei das Mikroklima durch Beschattung, Windfang und Schutz für die landwirtschaftlichen Nutzflächen. Silvoarable Agroforstsysteme bezeichnen die Doppelnutzung von Gehölzen und Acker oder Grünland. Die Nutzung der Gehölze kann dabei sehr vielfältig sein, von Windschutzhecken bis hin zu Wertholz-, Nuss- oder Obstbäumen. Im Folgenden werden die Ergebnisse aus sogenannten Alley-Cropping Systemen gezeigt, da diese parallele Anordnung der Baumreihen ähnlich zur Anordnung der Module in PV-Anlagen ist. (DeFAF, 2023)

Die Sonneneinstrahlung ist in den warmen Sommermonaten in Nähe der Gehölzstreifen aufgrund der Beschattung durch die Gehölze deutlich niedriger im Vergleich zu einer offenen Ackerfläche. Gleichzeitig wurde auch eine deutliche verminderte Windgeschwindigkeit sowie eine höhere relative Luftfeuchtigkeit in Nähe der Gehölzstreifen gemessen. Da der Ackerfruchttertrag in diesen Bereich höher als auf der offenen Ackerfläche war, lässt sich daraus schließen, dass die Pflanzen von den geringeren Tagestemperaturmaxima durch Beschattung und einer geringeren Evapotranspirationsrate profitieren. (Kanzler et al., 2015)

Bei weiteren Untersuchungen der gleichen Versuchsfläche wurde darüber hinaus herausgefunden, dass auch die Tagesminima der relativen Luftfeuchtigkeit durchschnittlich höher als auf der offenen Ackerfläche sind. Dabei hatte der Weizen im Agroforstsystem höhere Kornerträge. Auch hier bestätigt sich erneut die These, dass die Agroforstsysteme durch Schutz vor Wind und Wasserverdunstung die Evapotranspiration vermindern. Daraus könnte für die Nutzpflanzen eine bessere Anpassung an Trockenstress resultieren. (Kanzler et al., 2017)

In einem weiteren Versuch wurden mikroklimatischen Veränderungen durch Agroforstsysteme auf das Wachstum von Grünland untersucht. Dabei waren die Gehölzstreifen parallel zueinander angeordnet und Messstationen nord - östlich, mittig zwischen und süd - westlich der Gehölzstreifen errichtet. Es wurden die Mikroklima-Parameter Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit und die Lichtmenge gemessen. Um den Faktor Standort ließen sich signifikante Änderungen der Lufttemperaturen und der relativen Luftfeuchtigkeit feststellen. Auch im Vergleich der Wachstumsperioden ließen sich deutliche Unterschiede aufzeigen. Besonders große Änderungen waren in den warmen Sommermonaten zu beobachten. Unter heißem und trockenem Wetter war das Wachstum unter den Baumreihen besser. Im Frühjahr und Herbst waren die absoluten Änderungen der beiden Parameter mit durchschnittlich 0,5 °C Lufttemperaturunterschied und 2 % relative Luftfeuchtigkeit nicht sehr hoch. Die meiste Lichtmenge erhielten die Pflanzen im Bereich mittig zwischen den Gehölzstreifen, gefolgt von nord - östlich. Am wenigsten Licht fiel in den Bereich süd - westlich der Gehölze. Dabei variierten auch hier die Unterschiede neben dem Standort im Verlauf der Wachstumsperiode. Im Frühjahr wurden kaum Unterschiede gemessen, da die Bäume noch kein ausgeprägtes Blätterdach hatten. Später wurden im parabolischen Verlauf photosynthetische Strahlung auch die Auswirkungen der Beschattungen durch die Blätter sichtbar. Süd - westlich der Gehölzreihen waren Schatten ungefähr 4 Stunden nach Sonnenaufgang sichtbar und blieben bis zum Tagesende bestehen. In der Mitte waren die Auswirkungen besonders am frühen Morgen und am späten Nachmittag bemerkbar, wenn die Bäume ihre Schatten auf das Grünland geworfen haben. Im nord - östlichen Bereich der Gehölze, waren die Messpunkte besonders morgens beschattet, weshalb die gemessene photosynthetische Strahlung besonders in den ersten Stunden des Tages beeinflusst wurde. Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass das Mikroklima zwischen den

Standorten und auch den Wachstumsperioden unterschiedlich große Änderungen aufweist. Dabei wird das Wachstum bzw. die Photosyntheserate durch die Parameter beeinflusst, aber stärker durch die Lichtmenge als durch die Lufttemperatur und die relative Luftfeuchtigkeit. (Sutterlütli et al., 2023)

Auch bei den Auswirkungen der Solarmodule auf das Mikroklima wurden ähnliche Auswirkungen festgestellt. Unterschiede ergaben sich hier ebenfalls zwischen den Standorten, aber auch im Verlauf der Wachstumsperioden. Im Winter waren die Boden- und Lufttemperaturen unter den Modulen etwas höher. Zwischen Frühjahr und Herbst waren die Schwankungen der Tagestemperatur nicht so stark wie auf der Freifläche. Während die Lufttemperatur unter den PV-Modulen am Tag niedriger war, war diese in der Nacht höher. Die Sonneneinstrahlung unter den Solarmodulen war bis zu 92 % niedriger als auf der Freifläche. Dabei war die Regenmenge bis zu dreimal höher als bei den Kontrollbereichen, da das Wasser bei Niederschlag entlang des PV-Panel Trägers läuft und recht punktuell auf den Boden trifft. Die Windgeschwindigkeit unter den Modulen war ebenfalls niedriger. In den Zwischenräumen der Modulreihen war die Sonneneinstrahlung und der Niederschlag ähnlich wie bei der Freifläche, aber der Wind wurde reduziert. Unter den PV-Modulen wurde weniger Biomasse der Pflanzen gemessen. Auch die Anzahl der Arten war im Vergleich zur Freifläche geringer. In den Zwischenräumen und auf der Freifläche war das Wachstum der Biomasse bis zu viermal höher als unter den Modulen. (Armstrong et al., 2016)

1.6 Grünland als wirtschaftlich essenzielles Futtermittel

Grünland ist ein wertvolles Grundfutter in der Ernährung von diversen Tierarten. Im Folgenden werden besonders die Anforderungen an das Futter von Grünlandflächen für die Fütterung von Rindern und Pferden im Detail betrachtet. Es ist noch zu erwähnen, dass viele weitere Tierarten, insbesondere viele Wiederkäuerarten, auf die Aufnahme von Gräsern spezialisiert sind. So sind zum Beispiel auch Schafe sehr gut für die Beweidung von extensivem Grünland geeignet, da sie durch ihre selektive Futteraufnahme gut mit faserreichem und recht energiearmem Grünfutter auskommen. (Bureau et al., 2018; Lfl, 2021)

Als Nutzungsform in der Grünlandnutzung dominieren dabei die Fütterung von Frischgras (die direkte Beweidung) sowie konservierte Grünlandschnitte wie Heu, Heulage und Grassilage.

Dabei ist die Zusammensetzung der Inhaltsstoffe im Grundfutter sehr variabel. Je nach Futterart und Tierart werden unterschiedliche Zielwerte in den Futtermitteln angestrebt. Während einige Inhaltsstoffe durch Standort und Witterung geprägt werden, kann auch durch die Bewirtschaftung wie die Düngung und der Schnitzeitpunkt Einfluss genommen werden. Um eine spezifische und effiziente Fütterung der Tiere gewährleisten zu können, ist die Kenntnis über das Verhältnis der Inhaltsstoffe notwendig. Dabei hat sich die Nährstoffanalyse mithilfe der Nahinfrarotspektroskopie (NIRS) besonders durchgesetzt, da diese Methode schnelle Ergebnisse liefert. (Lfl, 2021; LUFA Nord-West 2023)

Als Fundament für die Analyse über die Inhaltsstoffe gilt die Weender Analyse. Dieses Verfahren wurde nach der Versuchstation Weende bei Göttingen benannt. Durch die Vereinheitlichung der Methode können Futtermittel gut miteinander verglichen werden. Schwachpunkt ist, dass es sich hierbei mehr um Schätzungen als um qualitativ genaue Gehalte handelt. Die umsetzbare Energie, auch metabolisierbare Energie (ME) genannt, entspringt ebenfalls einer Schätzformel. Diese Berechnung variiert nach Tier- und Futterart. (LUFA Nord-West, 2023)

Im ersten Schritt der Weender Analyse werden die Proben drei Stunden bei 105 °C getrocknet. Alle Stoffe, die sich dabei verflüchtigen, werden als Rohwasser bezeichnet. Übrig bleibt die Trockensubstanz (Weyrauch 2012). Die Trockensubstanz (TS) dient der Vergleichbarkeit, da sich die weiteren Messgrößen auf diesen Wert beziehen. Als Zielwerte für Frischgras werden 20 - 30 % angegeben, bei der Grassilage sind es 30 - 40 %, für Heulage 50 – 70 % und für Heu mindestens 85 %. Durch die Angabe der Trockensubstanz können die Messwerte relativ und außerhalb der jeweiligen Futtermittelgruppen verglichen werden. (LUFA Nord-West, 2023)

Im nächsten Schritt der Weender Analyse wird die Rohasche bestimmt. Durch das Erhitzen auf 550 °C bleiben nur noch die oxidierten Rückstände bestehend aus Mengen- und Spurenelementen sowie Sand und Ton über. Dieser Gehalt wird von der Trockensubstanz abgezogen und übrig bleibt die organische Masse bestehend aus Rohprotein, Rohfaser und Rohfett (Weyrauch 2012). In allen vier genannten Grünlandfuttermitteln sollte der Rohaschegehalt idealerweise nicht über 10 % liegen. Ist der relative Gehalt im Futtermittel höher, deutet dies auf eine Verschmutzung hin, welche sich nachteilig auf die Futterqualität auswirkt. Neben der Verschmutzung durch Ton und Sand selbst, können auch bodenbürtige

Bakterien ins Futter gelangen. Clostridien Bakterien können zum Beispiel in der Grassilage Buttersäure bilden, wobei wertvolle Eiweiße in der Silage abgebaut werden. (Lfl, 2021)

Alle stickstoffhaltigen Verbindungen werden unter den Begriff Rohprotein quantitativ erfasst. Neben Amid- und Reineiweißen gehören auch einfache Peptide, N-haltige Glykoside und freie Aminosäuren dazu. Dieser Gehalt lässt sich stark durch die Düngung, Witterung und Schnittzeitpunkt beeinflussen. Je früher das Gras geerntet oder abgeweidet wird, desto höher ist der Rohproteingehalt. Bei Grassilagen in der Milchviehhaltung und in der Rindermast wird ein Proteingehalt bis zu 17 % der TS angestrebt. Im Frischgras darf dieser auch bis zu 19 % der TS betragen, während in Heu und Heulage für Pferde der Gehalt nicht über 12 % der TS steigen sollte. Wiederkäuer benötigen bestimmte Rohproteine zur Bildung von Mikrobenprotein im Vormagen und laktierenden Kühen auch zur Bildung von Milcheiweiß. Allerdings kann ein Überschuss auch zu gesundheitlichen Belastungen wie einer Pansenazidose führen (LUFA Nord-West, 2023). Pferde sind ebenfalls auf die Aufnahme von Eiweißen, besonders den essenziellen Aminosäuren, über das Futter angewiesen. Dabei haben Pferde im Wachstum oder im Sport aufgrund von Muskelaufbau einen erhöhten Bedarf. Allerdings kann auch hier ein Überschuss an Proteinen zu Stoffwechselerkrankungen führen. (Weyrauch, 2012)

Der bestimmte Fettgehalt eines Futtermittels wird bei der Weender Analyse als Rohfett bezeichnet. Dazu zählen neben dem reinen Fett auch Inhaltsstoffe wie Carotine, Wachse und Sterine. Der Grund dafür ist, dass bei der Weender Analyse mit dem Lösungsmittel Ether gearbeitet wird, welches neben dem reinen Fett auch die genannten Inhaltsstoffe löst. Dabei ist der Gehalt an Rohfett eine reine quantitative Angabe, weil hier zudem auch nicht zwischen Fetten von hochwertig bis schwerverdaulich unterschieden wird. Deshalb kann für den Parameter Rohfett keine exakte Aussage über die Futterqualität gemacht werden (Weyrauch 2012). Dennoch ist dieser Wert notwendig, um die metabolisierbare Energie zu berechnen (Spiekers et al., 2013).

Mit dem Parameter Rohfaser wird der Fasergehalt im Futtermittel angegeben. Dieser Gehalt wird bei der Weender Analyse durch das Kochen in Laugen und Säuren bestimmt. Da sich leichtlösliche Kohlenhydrate wie Hemicellulose, Zucker, Stärke bereits in Lösung gebracht haben, werden mit dem Rohfasergehalt nur die unlöslichen Stoffe wie Cellulose, Lignin, Pentosane, etc. bezeichnet. Die leichtlöslichen Kohlenhydrate werden als stickstofffreie Extraktstoffe (NfE) bezeichnet und lassen sich aus der Differenz der Futtermittelprobe

abzüglich Wasser, Rohasche, Rohprotein, Rohfett und Rohfaser bestimmen. (LUFA Nord-West, 2023)

Besseren Aufschluss über den Fasergehalt geben heute die Analyseparameter ADL, ADFom und aNDFom. Je nach Gehalt, wird ein Futtermittel unterschiedlich schnell verdaut und in organische Masse umgewandelt. Haben Gräser einen hohen ADL-Gehalt, ist die Abbaugeschwindigkeit langsam. Im Gegensatz dazu, werden Futtermittel mit höherem Gehalt von Hemicullosen deutlich schneller abgebaut. Die Abbaugeschwindigkeit hat eine hohe Relevanz für eine effiziente Bildung von Milcheiweiß. Dafür muss das relative und zeitliche Verhältnis von Protein und Energie im Pansen stimmen, was maßgeblich durch die Abbaugeschwindigkeit beeinflusst wird. (Eurofins Agraranalytik, 2023)

Zur Berechnung der unverdaulichen Faseranteile wird die Futtermittelprobe in sauren Detergenzien gelöst. Was übrig bleibt ist das Lignin, welches als „Acid Detergent Lignin“ (ADL) bezeichnet wird. (Eurofins Agraranalytik, 2023)

Bei der „Acid Detergent Fibre organic matter“ (ADFom) wird der aschefreie Rückstand nach der Behandlung mit säurehaltigen Lösungsmitteln bezeichnet. Die darin vollständig enthaltenen Faserbestandteile sind das unverdauliche Lignin und die schwer verdauliche Cellulose. Im Alterungsprozess der Gräser erhöht sich der Gehalt der ADFom. Je höher der Fasergehalt ist, desto niedriger wird der Energiegehalt. Damit gibt der ADFom Wert auch Aufschluss über den richtigen Schnitzeitpunkt (Lfl 2021). So wird bei Grassilagen in der Rinderfütterung von Milchkühen und in der Mast ein Gehalt von 25 – 30 % der TS angestrebt, da so ein gutes Verhältnis zwischen dem für die Verdauung notwendigen Faseranteil und Energiegehalt herrscht (LUFA Nord-West 2023). Wäre der Gehalt an ADFom zu hoch, hätte das auch negative Auswirkungen auf den Silierprozess von Gräsern. Je geringer der ADF-Gehalt, desto mehr leicht abbaubare Hemizellulose sind im Material vorhanden. Dies ermöglicht eine schnelle Aufspaltung der Zellwände, was wiederum die Freisetzung von Zucker erleichtert und somit die Silokonservierung verbessert (Eurofins Agraranalytik, 2023).

In der „amylase Neutral Detergent Fibre organic matter“ (aNDFom), also in dem aschefreien Rückstand nach Behandlung mit neutralen Lösungsmitteln, ist zusätzlich noch die leichtverdauliche Hemicullose enthalten. Da die Hemicullosen zusammen mit Cellulosen und Lignin Bestandteile der Pansenschwimmschicht sind, ist dieser Parameter zur Bewertung

einer Wiederkäuer-Ration notwendig (Lfl, 2021). Die LUFA Nord-West (2023) empfiehlt in Grassilagen für die Rindermast und Milchviehhaltung einen Gehalt von 40 – 48 % der TS.

Zucker und Stärke sind Nichtfaser-Kohlenhydrate und bringen in Futtermitteln schnell verwertbare Energie mit sich. Im Rahmen der Weender Analyse sind sie Bestandteil der NfE. Der Zuckergehalt wird durch die Summenmethode nach Luff-Schoorl bestimmt und fasst mehrere Mono- und Disaccharide zusammen. Darunter zählen unter anderem Glucose, Fructose, Saccharose etc. Das Polysaccharid Stärke wird durch eine polarimetrische Messung bestimmt (LUFA Nord-West 2023). Wie bereits erwähnt, wirkt sich Zucker positiv auf den Konservierungsprozess und damit auf die Qualität von Grassilagen aus (Eurofins Agraranalytik 2023). Ansonsten hat dieser Parameter in der Wiederkäuerfütterung einen nicht so hohen Stellwert. In der Pferdefütterung hingegen wird dem Zuckergehalt, insbesondere der Gehalt an Fruktan, eine hohe Beachtung gewidmet. Ein hoher Fruktangehalt wird mit Stoffwechselkrankheiten wie beispielsweise Hufrehe in Verbindung gebracht (LUFA Nord-West, 2023). Deshalb setzt die LUFA Nord-West (2022) einen Zielwert von maximal 5 % der TS für Pferde Grünfutter an.

Die Gasbildung in ml pro 200 mg pro TS ist ein spezifischer Futterqualitätsparameter für Wiederkäuer. Ein hoher Wert zeigt eine hohe Verdaulichkeit des Futtermittels an. Getestet wird die Gasbildung im Hohenheimer Futterwerttest durch Zugabe von Pansensaft. Einfluss auf den Verdaulichkeitsparameter nehmen die Gehalte der ADFom, also der Cellulose und des Lignins sowie der Zuckergehalt. Auch hier gilt, dass hohe Fasergehalte generell die Verdaulichkeit eines Futtermittels senken und zu verringerter Gasbildung führen (Lfl 2021). Als Zielwert für die Gasbildung in ml/200 mg gibt die LUFA Nord-West (2023) ein Gehalt von mindestens 47 % der TS im Frischgras an.

Zu guter Letzt ist noch ein weiterer wichtiger Parameter für die Beurteilung von Futtermitteln zu erwähnen. Dies ist der Energiegehalt in einem Futtermittel bzw. die sogenannte umsetzbare Energie oder auch metabolisierbare Energie (ME). Der Energiegehalt wird mittels der untenstehenden Gleichung geschätzt. Je nach Tier- und Futterart ist eine andere Gleichung anzuwenden. Bei der Berechnung der umsetzbaren Energie für Rinder sind die Gehalte der Parameter Gasbildung, Rohasche, Rohprotein, Rohfett und ADFom notwendig. Dabei wirken sich Gasbildung, Rohprotein und Rohfett positiv auf die Energieberechnung aus, wohingegen sich Rohasche und ADFom negativ auf den Energiegehalt auswirken. (Lfl, 2021)

Für die Berechnung der ME bei Rindern aus Grasprodukten wie Heu, Grassilage und Frischgras wird folgende Gleichung empfohlen (Spiekers et al., 2013):

ME Rind (MJ/kg TM) =

$$7,81 + 0,07599 \text{ Gasbildung (ml/200 mg/TM)} - 0,00384 \text{ Rohasche (g/kg TM)} + 0,00565 \text{ Rohprotein (g/kg TM)} + 0,01899 \text{ Rohfett (g/kg TM)} - 0,00831 \text{ ADFom (g/kg TM)}$$

Für die Berechnung der ME von Pferden für Grundfuttermittel aus Gras ist eine andere Schätzungsgleichung erforderlich. Der errechnete Energiegehalt liegt dann meistens unter der ME Rind. Für die Berechnung von ME Pferd sind die Gehalte des Rohproteins, der Rohfaser, des Rohfetts, der stickstofffreien Extraktstoffe und der Rohasche notwendig. Auch hier wirkt sich der Fasergehalt negativ auf den Energiegehalt eines Futtermittels aus. Der Parameter Rohfettgehalt wird zwar nicht für die Berechnung der ME benötigt, aber zur Bestimmung des Gehaltes der NfE. Diese werden wie folgt berechnet: NfE= TM - (XP+ XL + XF + XA). Am Ende lässt sich der Energiegehalt für Pferde in Grasprodukten durch folgende Schätzungsgleichung berechnen (Opti-Ration, 2020):

ME Pferd (MJ/kg TM) =

$$-3,54 + 0,0129 \text{ Rohprotein (g/kg TM)} + 0,0420 \text{ Rohfett (g/kg TM)} - 0,0019 \text{ Rohfaser (g/kg TM)} + 0,0185 \text{ N-freie Extraktstoffe (g/kg TM)}.$$

1.7 Zielsetzung der Arbeit

Aufgrund der Erkenntnisse aus der aufgearbeiteten Literatur, ergeben sich folgende Hypothesen zur Beeinflussung der Solarmodule auf Masse und Qualität des Grünlandaufwuchs. Im Vergleich der Standort der Transekte unter den Modulen, zwischen den Modulreihen und den Referenzflächen, wird unter den Modulen und den Zwischenräumen ein günstigeres Mikroklima erwartet. Durch den Schutz der Module ist die Temperatur konstanter und die Beschattung verringert in den warmen Sommermonaten den Wasserverlust (Kanzler et al., 2017). Das könnte zu einer höheren relativen Luftfeuchtigkeit führen und sich damit positiv auf den Feuchtegradient auswirken. Zur Temperatur lässt sich ergänzen, dass die Lufttemperatur unter den Modulen in den kühlen Monaten etwas höher und bei heißem Wetter niedriger ist. Damit variiert der Temperaturverlauf im

Jahresdurchschnitt nicht so stark. Zudem wird durch die Drehung der Solarmodule über den Tag hinweg die Sonneneinstrahlung und Beregnung im Vergleich zu starren Modulen maximiert (Wattmanufactur, 2021).

Aufgrund der Beschattung durch die Module wird vor allem beim ersten Schnitt ein großer Unterschied der Biomasse im Bereich unter und zwischen den Modulreihen sowie der Freifläche erwartet. Da weniger Licht zur Verfügung steht, läuft die Photosynthese wahrscheinlich nicht so effizient ab, was zu weniger Masse unter den Modulen führen könnte (Armstrong et al., 2016L; Sutterlütli et al., 2023). Da Glukose das primäre Photosynthese Produkt ist und direkt auf die Sonnenstrahlung reagiert (Pflanzenforschung.de, 2023), wird in dem Gras unter den Modulen einen geringeren Zuckergehalt und weniger Lignin vermutet. Damit wäre das Gras verdaulicher und hätte einen verhältnismäßig höheren Energiegehalt (Lfl, 2021). Gleichzeitig wird ein höherer Gehalt an Rohprotein erwartet. Die Hypothesen werden auf zweifaktorieller Ebene untersucht. Einmal auf der Vergleichsebene der gesamten Transekte und dann auf der Ebene der acht Sensoren innerhalb der beiden Transekte unter den Modulen.

Weiterführend soll untersucht werden, ob eine Doppelnutzung für die Gewinnung von Futtermitteln in Hinblick der Auswirkungen der Solarmodule auf Ertrag und Inhaltsstoffe unter wirtschaftlichen Aspekten sinnvoll sein könnte. Dabei soll vor allem die Eignung als Futtermittel für Wiederkäuer und Pferde untersucht werden. Im Sinne der inhaltlichen Beschränkung dieser Untersuchung wird der technische Aufwand sowie der Anspruch an die Technik für die Futterkonservierung außer Acht gelassen.

2 Material und Methoden

2.1 Versuchsstandort Lottorf

Der Solarpark Lottorf befindet sich im Kreis Schleswig-Flensburg in Schleswig-Holstein. Auf knapp 19 Hektar stehen in zwei Bauabschnitten 39.270 Solarmodule. Der erste Bauabschnitt wurde von Februar 2021 bis April 2021 gebaut. Der zweite Abschnitt wurde im März 2022 in Betrieb genommen. (Wattmanufactur, 2021)

Die Grundlandfläche, auf der der Solarparks Lottorf erbaut wurde, ist ein Moor. Vor Jahren wurde es drainiert und trockengelegt, um es intensiv für die Landwirtschaft nutzen zu können. Mit dem Bau des Solarparks, wurde dieses Grünland wieder vernässt, was jährlich viel Kohlenstoffdioxid einsparen könnte.

(NDR, 2023)

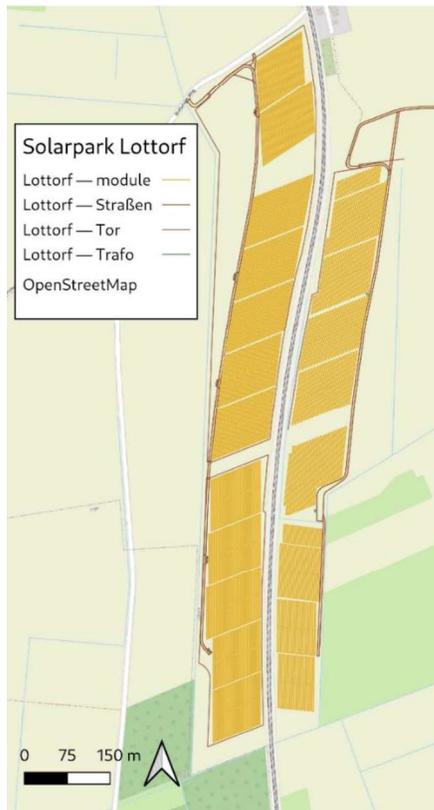


Abbildung 1: Solarpark Lottorf
Karte mit QGIS erstellt

Die Module sind auf einem einachsigen Nachführgestell montiert und tracken die Sonne. Durch die Drehung mit dem Sonnenstand von Ost nach West über den Tag hinweg, wird die Sonneneinstrahlung immer im perfekten Winkel aufgenommen. Zudem wird durch die Drehung mehr Fläche beschattet und der Niederschlag gelangt auf die vollständige Grünlandfläche unter den Modulen. Durch eine bifaziale Konstruktion der Module, kann auch indirekt einfallendes Licht von unten genutzt werden. Somit können jährlich rund 20 Gigawatt Strom erzeugt werden. (Wattmanufactur, 2021)

Neben der Erzeugung von Strom aus regenerativer Quelle steht bei dem Solarpark Lottorf auch eine ökologisch nachhaltige Flächennutzung und Moorschutz im Vordergrund. Wildkorridore, untergrabsichere Zäune zum Schutz der heimischen bodenbrütenden Vogelarten und Blühstreifen, sollen Naturschutz und Biodiversität fördern. Der Moorboden unter den Modulen wurde früher intensiv landwirtschaftlich genutzt. Durch Moorschutz Maßnahmen und angepasste Bewirtschaftung wurde das Grünland wieder vernässt. Nun werden die Flächen durch Beweidung und Mahd extensiv bewirtschaftet. (Wattmanufactur, 2021)

Die Gemeinde Lottorf liegt im Landkreis Schleswig und verzeichnet laut der nächsten Wetterstation durchschnittlich eine Jahressumme von 883,1 mm Niederschlag bei jährlich 1.614,9 Sonnenstunden. Das Jahresmittel der Lufttemperatur liegt in diesem Landkreis durchschnittlich bei 8.6 °C. Im Durchschnitt ist jährlich mit 14,7 Sommertagen (über 25 °C) und 69 Tage Frost zu rechnen. (DWD, 2023)

Laut der Messtation Lottorf (Tabelle 1) fiel 2023 in den Monaten Februar mit einer Summe von 43 mm (Tabelle 1) statt 60 mm (Abbildung 1) und vor allem im Juni mit knapp 39 mm (Tabelle 1) statt sonst ca. 75 mm (Abbildung 1) weniger Niederschlag als das durchschnittliche Monatsmittel der Jahre 1981 -2010. Dafür gab es mit ca. 150 mm und 166 mm (Tabelle 1) fast die doppelte Menge an Niederschlag in den Monaten Januar und Juli (Abbildung 1). Im März war die Summe mit 65 mm (Tabelle 1) ca. 10 mm und im April mit knapp 78 mm (Tabelle 1) ca. 40 mm über dem jeweiligen Monatsmittel (Abbildung 1). Im Monat Mai war die Niederschlagssumme von 42 mm (Tabelle 1) ebenfalls unter dem Mittel bei ca. 55 mm (Abbildung 1). Damit hat es in den Monaten Januar – Juli 2023 im Vergleich zum Mittel der Jahre 1981 - 2010 (Abbildung 1) insgesamt 142 mm mehr Niederschläge gegeben. (DWD, 2023)

Auswertung Januar -Juli 2023	Mittelwert Taupunkt in °C	Summe Nieder- schlag in mm	Mittelwert Temperatur mittel in °C	Mittelwert Temperatur max. in °C	Mittelwert Temperatur min. in °C
Jan	2,90	150,95	4,33	6,36	2,04
Feb	1,80	42,98	3,72	6,57	0,73
März	2,25	65,46	4,94	8,50	1,08
April	2,81	77,78	7,22	11,75	2,00
Mai	6,66	42,05	11,80	16,88	6,05
Juni	11,33	38,66	16,85	22,86	9,07
Juli	12,90	166,45	16,50	20,73	11,55
Jan-Juli	5,81	584,33	9,34	13,38	4,65

Tabelle 1: Messdaten Wetterstation Lottorf

Auch die Sonnenstunden der Monate Januar – Juli waren überdurchschnittlich. Im Vergleich pro Monat der Jahre 1981 - 2010 ergibt sich eine Summe von plus 165 Sonnenstunden (Abbildung 2). Dabei war besonders der Juni mit 110 Stunde über den Mittel von durchschnittlich 215 Stunden erwähnenswert. Auch die Monate Februar, mit 5 Stunden über dem Mittel, April mit 225 Stunden statt 175 Sonnenstunden und der Mai mit 270 Stunden statt 230 Sonnenstunden lagen über dem Durchschnitt. Nur die Monate Januar (35 Stunden),

März (95 Stunden) und Juli (210 Stunden) lagen jeweils mit unter 10-15 Sonnenstunden unter dem Durchschnitt. (Abbildung 2, DWD 2023)

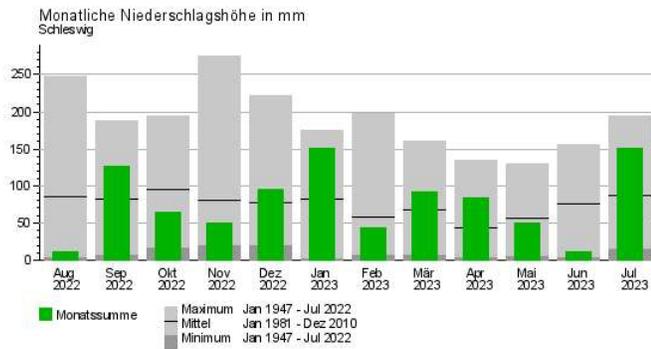


Abbildung 3: Niederschlagshöhe in mm für Schleswig
Quelle DWD (2023)

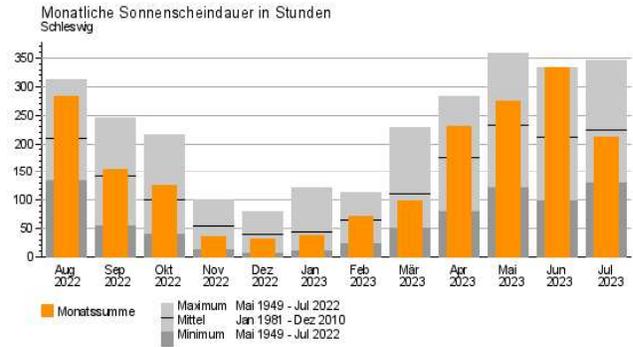


Abbildung 2: Monatliche Sonnenscheindauer in Stunden für Schleswig
Quelle: DWD (2023)

2.2 Aufbau des Versuchs

Der Versuchsaufbau besteht aus zwei Triplets mit jeweils drei Transekten. An insgesamt vier Terminen, einmal im Monat April, Mai, Juni und Juli, wurden die Transekten auf den drei unterschiedlichen Standorten unter den Modulen, zwischen den Modulen und auf der Referenzfläche untersucht. Jedes Transekt ist mit acht Sensoren ausgestattet, die in diesem Versuch als Mess- und Schnittpunkte dienen. Insgesamt gibt es 48 Sensoren, welche wie folgt von West nach Ost durchnummeriert sind: Sensor 1-8 im ersten Triplet und Sensor 25-32 im zweiten Triplet befinden sich jeweils in den Transekten unter den Solarmodulen, Sensor 9-16 im ersten Triplet sowie Sensor 33-40 im zweiten Triplet befinden sich jeweils in den Transekten auf der freien Referenzfläche und die Sensoren 17-24 im ersten Triplet sowie 41-48 im zweiten Triplet befinden sich jeweils in den Transekten zwischen den Solar-Modul Reihen (Abbildung 3). In den Transekten unter den Modulen befinden sich

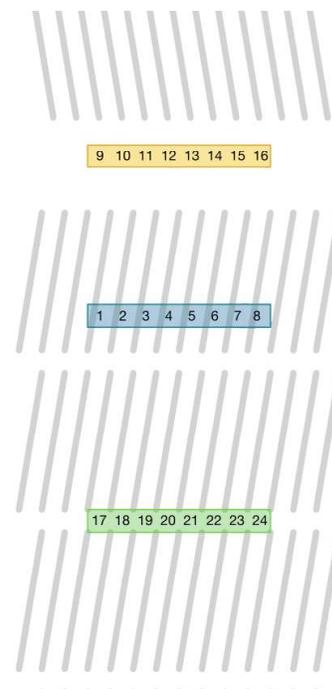


Abbildung 4: Schemazeichnung Lage des ersten Triplets. Die Transekten unter den Modulen (in blau), zwischen den Modulen (in grün) und auf der Freifläche (in gelb). Solar-Module in grau eingezeichnet.

jeweils die zweiten und sechsten Sensoren direkt unter den Modulen positioniert. Die vierten und achten Sensoren je Transekt sind neben den Modulen. Die restlichen Sensoren befinden sich zwischen den freistehenden Sensoren und den Sensoren unter den Modulen. Die Solarmodule sind hauptsächlich Nord-Süd ausgerichtet, haben aber je nach Standort eine leicht östliche oder westliche Drehung der Nord-Süd Ausrichtung.

2.3 Datenerhebung

Für die Datenerhebung wurde ab April alle vier Wochen, an den Terminen 19.04.2023, 24.05.2023, 20.06.2023 und 26.07.2023, die Höhe des Bewuchses gemessen. An allen vier Terminen wurden auch die Kalibrierungsschnitte im Versuchsrahmen 30 cm x 60 cm vorgenommen. Zusätzlich wurden in den Monaten Mai und Juli noch Qualitätsschnitte im o. g. Versuchsrahmen entnommen. Die Termine am 24.05. und am 26.07. sollten das Schnittsystem der in der Landwirtschaft üblichen Mahd imitieren.

Für die Bestimmung der Höhe des Grünlandes wurde die sogenannte CSH – Messung durchgeführt. Bei der compressed sward height Messung wurde mit einem rising plate meter die Höhe des Bewuchses geschätzt. Zusammen mit dem Gewicht der Proben lassen sich so Rückschlüsse auf die Masse ziehen. Die CSH-Messungen wurden unmittelbar um jeden Sensor viermal im Uhrzeigersinn (Richtung Süd – West – Nord – Osten) durchgeführt und in einer Tabelle notiert, um anschließend einen Mittelwert zu bestimmen. Für signifikante Ergebnisse sollten die Messpunkte für den ganzen Bestand repräsentativ sein (LUFA Nord-West 2023).

Für die vierwöchigen Kalibrierungsschnitte wurden pro Transekt drei Proben genommen. Eine mittig auf nördlicher Seite (Probenbezeichnung nach Transektnummer Mitte), die anderen beiden auf südlicher Seite Ecke West (Probenbezeichnung nach Transektnummer West) und Ecke Ost (Probenbezeichnung nach Transektnummer Ost). Dafür wurden wieder die 30 x 60 cm Rahmen genutzt. Vor und nach dem bodennahen Schnitt mit der Hand-Akkuschere wurden jeweils zwei CSH-Messungen innerhalb des Messrahmen durchgeführt. Die Biomasse-Proben wurden in einem Plastikbeutel eingetütet, mit der Frischmasse gewogen und bis zur Trocknung gekühlt.

Die Qualitätsschnitte am 24. Mai und am 26. Juli wurden an allen acht Sensoren genommen. Dabei wurde der 30 x 60 cm Rahmen in östlicher Ausrichtung direkt am Sensor platziert. Für

aussagekräftige Ergebnisse ist bei Datenerhebungen über mehrere Perioden hinweg wichtig, dass diese immer am gleichen Standort genommen werden (LUFA Nord-West 2023). Vor sowie nach jedem Schnitt wurden jeweils zwei CSH-Messungen innerhalb der 0,18 m² durchgeführt und notiert. Da die Qualitätsschnitte die Mahd aus der Landwirtschaft imitieren sollten, wurde mit der Hand-Akkuschere eine Schnitthöhe von ca. 7 cm als Richtwert angesteuert. Die Abweichungen der residualen Höhe wurden durch die CSH-Messungen dokumentiert. Auch hier wurden die acht Biomasseproben pro Sensor in Plastikbeutel verstaut, eingewogen und bis zur Trocknung gekühlt. Nachdem alle Proben genommen wurden, wurden die Versuchsplots komplett auf 7 cm gemäht.

2.4 Datenanalyse

Nach der Datenerhebung auf der Versuchsfläche wurde die Biomasseproben 48 Stunden im Trockenschrank bei 60 °C getrocknet und noch einmal eingewogen. In Vorbereitung für die Auswertung der Qualitätsparameter mit der Nahinfrarot-Spektroskopie, wurden die Proben anschließend in zwei Schritten gemahlen. Zuerst wurde die ganze Probe zur Zerkleinerung und Homogenisierung bei 1500 rpm grob gemahlen. Dafür stand eine Schlagmühle der Firma Retsch Modell SM 3000 zur Verfügung. Von der gesamten Probe wurden ca. vier Esslöffel in der Zentrifugalmühle von Retsch, Modell ZM 200, weiterverarbeitet. Dabei wurden die Proben durch ein 1 mm Sieb fein gemahlen. Beide Mühlen wurden nach jeder einzelnen Probe mit Druckluft gereinigt, um eine Verunreinigung oder Vermischung untereinander zu vermeiden.

Am 08. Juni und am 17. August wurden die Proben zur Bestimmung der Inhaltsstoffe mit der Nahinfrarot-Spektroskopie untersucht. Von jeder Probe wurde ein Teelöffel in Ethanol gereinigte Küvetten gefüllt. Auf der Unterseite der Küvetten befand sich eine Glasscheibe. Zum Abschließen wurde ein Deckel aus Pappe mit weißer Wand auf der Seite der Biomasse verwendet, um die Absorption des nahinfraroten Lichts zu messen. Durch die spezifischen Eigenschaften der Inhaltsstoffe, wird das nahinfrarote Licht im Spektrum von 800 nm bis 2500 nm adsorbiert, reflektiert oder transmittiert. Aus den Messungen der Lichtstrahlen auf der Ober- und Unterseite der Probe wird der Gehalt der einzelnen Inhaltsstoffe geschätzt. Für möglichst exakte Schätzungen muss das Verfahren zuvor durch Kalibrierungen angelernt

werden (Lichti et al., 2018). Pro Probe wurden zwei Küvetten befüllt und ausgewertet. Die Messreihen jeder Küvette, also jeweils zwei Messreihen pro Probe, wurden zur LUFA Nord-West geschickt. Dort wurden die aus den Messungen ermittelten Inhaltsstoffe als tabellarische Auswertung zurückgesandt. Aus den Werten wurde eigenständig eine Excel Tabelle erstellt, die den Durchschnitt jeder Probe zeigt (Tabelle 2, Anhang). Mit den gegebenen Werten konnte anschließend die ME nach der Formel aus Kapitel 1.6. (Spiekers et al., 2013) errechnet werden. Mit dem Statistikprogramm „R“ (Package ggplot2) wurden die Boxplots zur besseren Übersicht der ausgewerteten Ergebnisse erstellt.

3 Ergebnisse

3.1 Vergleich der Standorte von den Transekten auf die durchschnittliche Wuchshöhe, Trockenmasse und Trockensubstanz

Aus ertraglicher Sicht dominierte vor allem das Gras in den Transekten zwischen den Modulen. Bei fast allen vier Terminen war die Trockenmasse und Wuchshöhe im Durchschnitt am höchsten. Auch die relative Trockenmasse war im Vergleich mit den anderen Standorten höher.

Bei dem Zwischentermin in April lag der Mittelwert der CSH-Messungen für die Freifläche ca. 2 cm über den Mittel der Transekte unter den Modulen und auf der Freifläche (Abbildung 5). Dabei hatte die Wuchshöhe zwischen den Modulen die höchste Variation (Tabelle 2, Anhang). Die relative Trockensubstanz war auf der Freifläche am niedrigsten (24 %), unter den Modulen höher (32,9 %) und zwischen den Modulen am höchsten (36 %) (Abbildung 5). Pro Quadratmeter war die Trockenmasse wieder zwischen den Modulen am höchsten (94,6 g). Auf der Freifläche war die Masse rund 13 % (82,1 g/m²) und unter den Modulen sogar über zwei Drittel (61,9 g/m²) geringer (Abbildung 5).

Auch beim Schnitttermin am 24. Mai war die Trockenmasse zwischen den Modulen mit 251,2 g/m² am höchsten. Diesmal lagen aber alle Werte dicht beieinander. Auf der Freifläche wurden im Durchschnitt 246,29 g/m² und unter den Modulen 235,8 g/m² ermittelt (Abbildung 5). Dabei waren unter den Modulen die höchsten Abweichungen innerhalb der Masse zu verzeichnen (Tabelle 2). Die durchschnittliche Wuchshöhe wurde in absteigender Reihenfolge

zwischen den Modulen (19,8 cm), unter den Modulen (17,8 cm) und auf der Freifläche (16 cm) gemessen (Abbildung 5). Die relative Trockensubstanz war zwischen den Modulen wieder am höchsten (25 %), dicht gefolgt von der Freifläche (23,4 %) und schlussendlich von dem Bereich unter den Modulen (20,6 %) (Abbildung 5). Wobei unter den Modulen die höchste Variation gemessen wurde (Tabelle 2).

Bei dem Zwischentermin am 20. Juni wurde in allen drei Bereichen eine ähnliche durchschnittliche Wuchshöhe im Bereich 9,1 – 9,9 cm festgestellt (Abbildung 5). Die Trockenmasse der Standorte unter (104,7 g/m²) und zwischen den Modulen (103,5 g/m²) war ähnlich hoch und deutlich über dem Durchschnitt der Freifläche (86,8 g/m²) (Abbildung 5). Sowohl bei der Wuchshöhe (0,38), als auch bei der Trockenmasse (0,58) war die Variation der Standardabweichungen unter den Modulen verhältnismäßig hoch (Tabelle 2). Der durchschnittliche Mittelwert für die Trockensubstanz lag im Bereich 25,8 % (Freifläche) und 33 % (Unter den Modulen). Die Trockensubstanz zwischen den Modulen lag mit 29,9% dazwischen (Abbildung 5).

Beim zweiten Schnitttermin am 26. Juli, war die Masse unter den Modulen mit 189,5 g/m² deutlich unter den ähnlichen Mitteln der Standorte Freifläche (224,7 g/m²) und zwischen den Modulen (225,9 g/m²) (Abbildung 5). Auch die Wuchshöhe war unter den Modulen mit 12,8 cm niedriger im Vergleich zum Durchschnitt auf der Freifläche mit 14,5 cm und zwischen den Modulreihen mit 16,6 cm (Abbildung 5). Die Trockensubstanz lag bei allen drei Standorten um 24,5 % - 24,9 % (Abbildung 5).

3.2 Vergleich der Standorte von den Transekten auf die Qualitätsparameter

Bei den Inhaltsstoffen lassen sich ebenfalls Unterschiede im Vergleich der Standorte und Schnitttermine erkennen. Der Rohaschegehalt unter den Modulen ist bei beiden Terminen jeweils ca. 0,7 % höher. Dabei variieren die Werte im Bereich von 5,95 % (Zwischen den Modulen am 26.07) und 6,89 % (Unter den Modulen am 26.07) (Abbildung 5). Der Rohproteingehalt ist ebenfalls an beiden Terminen mit rund 17 % unter den Modulen am höchsten. Mit 15,4 % am 24.05. und 15,8 % am 26.07. liegt der Rohproteingehalt auf der Freifläche in der Mitte. Zwischen den Modulen ist dieser Wert im Mai bei 14,5 % und im Juli sogar noch ein Prozent da drunter (Abbildung 5).

Der Ligningehalt (ADL) lag beim ersten Schnitttermin unter und beim zweiten Schnitttermin über 3 %. Dabei war dieser beim Aufwuchs auf der Freifläche am kleinsten (2,56 % bzw. 3,09 %), unter den Modulen höher (2,71 % bzw. 3,11%) und zwischen den Modulen am höchsten (2,78 % bzw. 3,22 %) (Abbildung 5). Auch beim ADFom Gehalt (Werte zwischen 30,3 % - 33,3 %) und aNDFom Gehalt (Werte zwischen 53,7 % - 55,6 %) ähnelten sich die Proben der drei Standorte. Bei beiden Terminen war der Mittelwert für die Freifläche etwas unter den Mittelwerten der anderen beiden Standorte. Dabei waren die mittleren Gehalte beim Juli Termin etwas höher als beim Mai Termin (Abbildung 5).

Größere Unterschiede zwischen den Standorten waren beim Rohzuckergehalt und dem Fruktangehalt festzustellen. Hier hatten die Standorte zwischen den Modulen und auf der Freifläche deutlich höhere Mittelwerte als der Standort unter den Solarmodulen (Abbildung 5). Im Mai lag der mittlere Rohzuckergehalt für die Freifläche bei 11 % und zwischen den Modulen bei 10,4 %, während der Mittelwert unter den Modulen bei 7,8 % lag. Im Juli lag dieser zwischen den Modulen bei 8,7% und auf der Freifläche bei 8,5 %. Unter den Modulen wurden 6,5 % ermittelt (Tabelle 2). Von der Abfolge ist der Fruktangehalt an beiden Terminen mit dem Rohzuckergehalt gleich, allerdings ist dieser immer etwas niedriger. Im Mai lag der Fruktangehalt zwischen den Modulen bei 7 %, auf der Freifläche bei 6,5 % und unter den Modulen bei nur 3,62 %. Dabei ist aber mit 0,73 eine hohe Variation der Standardabweichungen zu erwähnen (Tabelle 2). Im Juli wurde unter den Modulen ebenfalls der höchste Variationskoeffizient (0,39) im Vergleich aller Standorte bestimmt. Dabei lag der Fruktangehalt bei 4 %. Dieser ist in den Transekten zwischen den Modulen bei 6,2 % und auf der Freifläche bei 5,5 % (Abbildung 5).

Abschließend lässt sich zur metabolisierbare Energie pro Trockenmasse für Rinder feststellen, dass die Energiegehalte im Vergleich der Standorte sehr nah beieinander liegen und eine sehr geringe Standardabweichung aufweisen (Tabelle 2). Dabei ist der Energiegehalt im Mai insgesamt höher und die Freifläche hat bei beiden Terminen den höchsten Gehalt (11,3 MJ/kg TM im Mai und 10,9 MJ/kg TM im Juli). Im Mai ist der Gehalt unter den Modulen (11,2 MJ/kg TM) am zweithöchsten und im zwischen den Modulen (11,1 MJ/kg TM) etwas kleiner. Im Juli liegen die beiden Mittelwerte bei 10,8 MJ/kg TM (Abbildung 5).

Boxplots für die Ertrags- und Qualitätsparameter der untersuchten Proben für die Schnitttermine 4. Mai und 26. Juli

*Die Parameter CSH, TS und TM wurden auch für die Zwischentermine 19. April und 20. Juni dargestellt

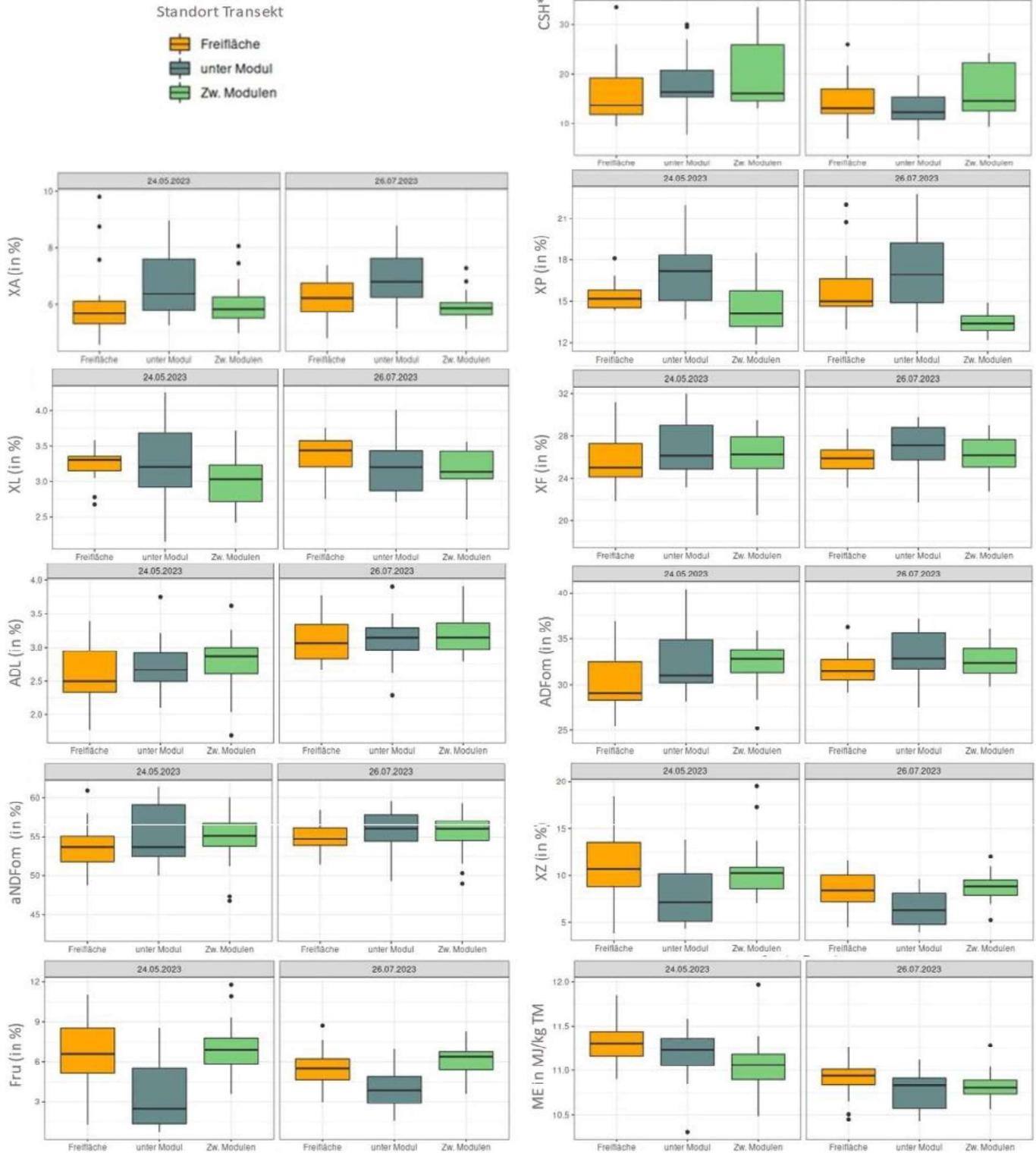


Abbildung 5: Boxplots der Ertrags- und Qualitätsparameter für die Schnitttermine und Standorte

3.3 Vergleich der Qualitätsschnitte an den Sensoren der Transekte unter den Solarmodulen auf die Ertrags- und Qualitätsparameter

Bei den Gehalten von Fruktan, Rohzucker, Rohfaser und Rohprotein wurden unter den Solarmodulen die höchste Variation der Standardabweichungen ermittelt (Tabelle 2). Dabei war der Gehalt von Zucker und Fruktan unter den Modulen im Vergleich zu den anderen beiden Standorten immer am kleinsten und der Gehalt von Rohfaser und Rohprotein immer am größten (Abbildung 5).

Am ersten Schnitttermin im Mai schwankte die Wuchshöhe im ersten Triplet zwischen 10,5 cm und 19,75 cm. Im zweiten Triplet zwischen von 7,75 cm und 21,75 cm (Tabelle 3). Am zweiten Schnitttermin wurde die Wuchshöhe im ersten Triplet zwischen 8,25 cm – 15,5 cm und im zweiten Triplet zwischen 11,25 cm – 16,0 cm gemessen (Tabelle 3). Dabei wurde um die beiden Sensoren direkt unter den Modulen jeweils die geringste Wuchshöhe bestimmt. Die Trockensubstanz war meistens in den Proben um die Sensoren direkt unter den Modulen am höchsten. Im Mai variierten die Werte im ersten Triplet von 12,5 % bis 16,3 % und im zweiten Triplet zwischen 19,1 % - 31 % (Tabelle 3). Im Juli war TS-Gehalt im ersten Triplet (19,7 %- 35,2 %) höher als im zweiten Triplet (19,9 % -26,5 %) (Tabelle3). Bei der Trockenmasse wurde im Mai beim ersten Triplet eine Trockenmasse von 119,4 g/m² (Sensor neben dem Modul) bis zu 168,3 g/m² (ebenfalls beim Sensor neben einem Modul) gemessen. Im zweiten Triplet variierte die TM zwischen 120 g/m² (Sensor unter Modul) und 301,7 g/m² (Sensor neben Modul) (Tabelle 3). Im Juli war die TM im ersten Triplet insgesamt weniger im Vergleich zu dem Schnitttermin im Mai. Im ersten Triplet wurden Werte zwischen 83,1 g/m² (unter dem Modul) und 167,1 g/m² (neben dem Modul) ermittelt. Im zweiten Triplet wurde die niedrigste Masse bei beiden Sensoren unter dem Modul bestimmt (120,8 g/m² und 131,4 g/m²) und die höchste TM bei allen vier Sensoren neben den Modulen (154,9 g/m², 210,3 g/m², 220,5 g/m² und 227,9 g/m²) (Tabelle 3).

In Hinblick auf die Qualitätsparameter gibt es ebenfalls Unterschiede. Die Standardabweichungen variierten innerhalb des Transektes unterschiedlich stark. Der durchschnittliche Variationskoeffizient beider Termine von Rohaschen, Rohfett, Rohfaser, ADL, ADFom, aNDFom und ME-Rind lag unter 15 % (Tabelle 2). Der Rohproteingehalt variierte im Mai um 0,14 und im Juli um 0,16 (Tabelle 2). Dabei war der Rohproteingehalt im ersten Triplet (im Mai 17,9 % - 22 % und im Juli 19,2 % - 22,4 %) insgesamt höher als im zweiten

Triplett (im Mai 13,8 % - 18,5 % und im Juli 14,6 % - 18 %) (Tabelle 3). Beim ersten Termin wurden die höchsten Gehalte meist bei den Sensoren unter und zwischen den Modulen ermittelt. Im zweiten Termin erreichte auch der Bereich um den freien Sensor die Höchstwerte an Rohprotein.

Eine große Variabilität wurden für die Parameter Rohzucker (0,36 und 0,27) und Fruktan (0,73 und 0,39) festgestellt (Tabelle 2). Im Mai lagen die Gehalte im ersten Triplett zwischen 4,7 % und 8,4 % für Rohzucker und für Fruktan zwischen 0,7 % und 4,4 % (Tabelle 3). Dabei wurden jeweils die höchsten Werte an den beiden freien Sensoren und die niedrigsten Werte an den beiden Sensoren direkt unter den Modulen gemessen (Tabelle 3). Im zweiten Triplett hatten der vierte (direkt unter dem Modul) und der fünfte Sensor (westlich neben dem Modul) die höchsten Rohzucker- (91,1 % und 9,8%) und Fruktangehalte (4,3 % und 4,9 %). Die anderen Sensorenstandorte hatten einen ähnlichen Gehalt für Rohzucker (4,4 % - 5,9 %) und Fruktan (1 % - 3,7 % (wobei 3,7 % eher ein Ausreißer ist, der Durchschnitt der restlichen sechs Proben liegt bei unter 2%)) (Tabelle 3). Bei einem relativen Vergleich der beiden Schnitttermine war im Juli der Rohzuckergehalt (im ersten Triplett 4,3 % - 7,3 % und im zweiten Triplett 4,0 % - 9,2 %) niedriger und der Fruktangehalt (im ersten Triplett 1,6 % - 4,1 % und im zweiten Triplett 1,9 % - 5,9 %) höher als beim Termin im Mai. Dabei waren sowohl Rohzucker als auch Fruktan in den Proben an den Sensoren neben den Modulen am höchsten. Direkt unter den Modulen und an den freien Sensoren variierte der Rohzuckergehalt um die 4 % - 5,7 %. Bei Betrachtung des Fruktangehaltes trat im ersten Triplett kein Standort besonders hervor. Im zweiten Triplett wurden die höchsten Fruktangehalte bei den Sensoren westlich neben den Modulen und die niedrigsten östlich neben den Modulen gemessen.

4 Diskussion

Im Ergebnisteil stach vor allem aus Ertragsicht der Transektstandort zwischen den Modulreihen heraus. In fast allen Terminen dominierte dieser Standort mit Wuchshöhe und Trockenmasse. An zweiter Stelle folgten dann meistens die Transekte auf der Freifläche. Der Zwischentermin am 20. Juni stellte einen Ausreißer dar. Hier war die Trockenmasse unter den Modulen (104,7 g/m²) leicht höher als zwischen den Modulen (103,5 g/m²). Die durchschnittliche Trockenmasse auf der Freifläche (86,8 g/m²) lag sogar weiter unter dem

Durchschnitt der anderen beiden Standorte. Bei einem Blick auf die Wetterdaten fällt auf, dass es in diesen Monat unterdurchschnittlich viel geregnet hat (Abbildung 2) und es dabei überdurchschnittlich sonnig war (Abbildung 3). Insgesamt gab es im Juni nur 38 - 66 mm Niederschlag (Tabelle 1). Der vorherige Monat Mai war mit 42,05 mm Niederschlag ebenfalls nicht sonderlich regenreich (Tabelle 1). Zudem war der Juni im untersuchten Zeitraum der wärmste Monat, sowohl in Hinblick auf die mittlere Tagestemperatur als auch auf die durchschnittliche maximale Tagestemperatur (Tabelle 1). Da sich wie bei Macholdt et al. (2023) Trockenstress und hohe Temperaturen im warmen Sommer als stärkste limitierende Wachstumsfaktoren bezeichnen lassen, scheint das Grünlandwachstum in den trockenen Monaten unter den Solarpanel im Vergleich zu den anderen Standorten begünstigt zu werden (vgl. Kanzler et al., 2017; Sutterlütli et al., 2023). Dagegen scheint das Wachstum bei mäßigen klimatischen Bedingungen eher vom Licht abhängig zu sein, wie es auch die Versuchsergebnisse von Sutterlütli et al., (2023) zeigten. In den restlichen Monaten mit durchschnittlichen oder überdurchschnittlichen Niederschlagsmengen (Abbildung 2) und einer Sonnenscheindauer nahe der jährlichen Monatsmittel (Abbildung 3), ist der Ertrag auf der Freifläche und zwischen den Modulen deutlich höher. Im Fall günstiger Witterungen scheint also eher die Lichtmenge der ertragsentscheidende Wachstumsfaktor zu sein (Sutterlütli et al., 2023). Die Solarpanel bieten zwar ein etwas günstigeres Mikroklima, dafür fällt aber deutlich weniger Licht auf die Pflanzen unter den Solarpanels, weshalb der Ertrag dort, genau wie im Versuch von Armstrong et al. (2016), schwächer ausfällt.

Insgesamt sind die mikroklimatischen Bedingungen des Standortes zwischen den Modulreihen eher der Freifläche als der Fläche unter den Modulen ähnlich (Armstrong et al., 2016). Trotzdem scheinen die Solarmodule durch Schutz vor Wind, leichte Beschattung sowie geringere Temperaturschwankungen (Armstrong et al., 2016; Kanzler et al., 2015 & 2017; Sutterlütli et al., 2023), die Wachstumsbedingungen des ertragsstärksten Standortes (zwischen den Modulen) im Vergleich zur Freifläche positiv zu beeinflussen, was sich an der höheren Trockenmasse und Wuchshöhe zeigt (Abbildung 5).

Außerdem ist zu sehen, dass der Ertrag in Hinblick auf die Parameter Wuchshöhe, Trockenmasse und Trockensubstanz auf den Freiflächen am stärksten schwankt. Während der vier Termine ist besonders eine Korrelation mit der Niederschlagsmenge (Abbildung 2) zu sehen. Je näher der Niederschlag am monatlichen Mittel ist, desto besser ist der Ertrag. Diese

Schwankungen sind bei den Standorten zwischen und unter den Modulen nicht so stark. Dadurch, dass die mikroklimatischen Bedingungen unterhalb der Solarmodule konstanter mit weniger Extremwerten sind (vgl. Armstrong et al., 2016; Kanzler et al., 2015 & 2017; Sutterlütli et al., 2023), lässt sich die Vermutung aufstellen, dass die Beeinflussung der PV-Panele auf das Mikroklima unter den Modulen zwar insgesamt zu durchschnittlich niedrigeren Erträgen führt, aber dafür gerade bei extremen Witterungsbedingungen, wie lange Hitzeperioden, einen konstanteren Ertrag liefert. Diese Ergebnisse sind vergleichbar mit den Ergebnissen aus den Untersuchungen in den Alley Cropping Systemen (Kanzler et al., 2017). So könnten die Solarmodule auch mögliche Anpassungen an den Klimawandel für die Pflanzenproduktion mit sich bringen. Um diese Hypothese mit eigenen Ergebnissen belegen oder widerlegen zu können, müsste der Versuch jedoch über einen längeren Zeitraum durchgeführt werden.

Wesentliche Unterschiede der Standorte in Hinblick auf die Qualitätsparameter wurden vor allem beim Fruktan-, Rohzucker sowie Rohproteingehalt gefunden (Tabelle 2). Unter den Modulen war der Gehalt des Rohprotein relativ am höchsten, während Gehalt von Zucker und Fruktan unter den Modulen am geringsten war (Abbildung 5). Damit bestätigt sich die Versuchshypothese, dass der Zuckergehalt aufgrund direkter Abhängigkeit vom Licht während der Photosynthese (Pflanzenforschung.de, 2023) im beschatteten Bereich unter den Modulen niedriger ist. Interessant ist dabei, dass der Fruktangehalt zwischen den Modulen immer und beim Rohzucker nur im Juli höher als auf der Freifläche war (Abbildung 5).

Entgegen der Vermutung war der Ligningehalt nicht unter den Modulen am niedrigsten, sondern auf der Freifläche. Das Gleiche gilt für ADFom und aNDFom. Die Gehalte der drei Parameter zum Faseranteil waren meist zwischen den Modulen am höchsten, wo auch die größte Masse bestimmt wurde (Abbildung 5). Dabei wichen die Fasergehalte alle nicht stark voneinander ab und variierten auch innerhalb des Transektstandorten nur leicht (Tabelle 2).

Im Vergleich der Qualitätsschnitte um die Sensoren der Transekte unter den Modulen wurden ähnliche Beobachtungen auf kleinerer Fläche gemacht. Bei den Proben an den Sensoren direkt unter den Modulen wurde die niedrigsten Fruktan- und Zuckergehalte beobachtet, während Rohfaser und Rohprotein dort durchschnittlich am höchsten war (Tabelle 3). Da hier über alle Sensoren hinweg ein sehr ähnliches Mikroklima aufgrund der engen räumlichen Verbundenheit zu vermuten ist, scheint auch hier das Licht, wie in den vergleichbaren Alley

Cropping Systemen (Sutterlütli et al., 2023), den maßgeblichen Einfluss auf Ertrag und Qualität zu haben (Pflanzenforschung.de, 2023). Dabei blieben die Rohzuckeranteile an den Sensoren unter den Modulen recht stabil um die 5 %, während an den Sensoren neben den Modulen und an den freien Sensoren die Werte häufig sehr stark, meistens aber oberhalb der 5 %, schwankten (Tabelle 3). Dies wiederum würde auch für Licht als entscheidenden Faktor sprechen, da an den Sensoren direkt unter den Modulen die Inhaltsstoffe über den Zeitraum hinweg nicht großartig schwanken. An den Bereichen, die stärker dem Tageslicht ausgesetzt sind, variieren die Werte deutlich mehr, da das Wetter auch nicht konstant ist. Um diesen Zusammenhang tatsächlich zu überprüfen, müsste der Versuch über einen längeren Zeitraum begleitet werden, damit zwischen der Sonnenscheindauer und den Inhaltsstoffen, insbesondere den Zucker- und Fruktangehalt, eine repräsentative Korrelation festgestellt oder ausgeschlossen werden könnte.

In Hinblick auf die Futtereignung für Pferde ist der Rohproteingehalt über dem Zielwert. Dieser ist im ertragreichen Standort zwischen den Modulen am niedrigsten (am 24.05. bei 14,5 % und am 26.07. bei 13,5 %) und unter den Modulen sogar bis zu 17,2 % im Durchschnitt (Abbildung 5). Damit liegt dieser Wert über dem empfohlenen Maximalwert von 12 % (LUFA Nord-West 2022). Wenn die Pferde nicht gerade wachstumsbedingt oder im sportlichen Einsatz einen höheren Bedarf zu decken haben, kann ein Überschuss an Protein zu Stoffwechselkrankheiten führen (Weyrauch, 2012). Dafür werden die Zielwerte in Hinblick auf Rohfaser und Rohasche auf allen drei Standorten zu beiden Terminen erreicht (LUFA Nord-West 2022; Abbildung 5). Der ideale Gesamtzuckeranteil (< 10 %, LUFA Nord-West 2022) wird nur im zweiten Termin auf allen drei Standorten erzielt. Lediglich bei der Messung im Mai ist dieser unterhalb der Module unter 10 % (7,8 %, Abbildung 5). Der Fruktangehalt, der in der Pferdefütterung in Verbindung mit Stoffwechselkrankheiten wie Hufrehe gebracht wird (LUFA Nord-West, 2023), sollte nicht über 5 % liegen (LUFA Nord-West 2022). Dies ist bei beiden Terminen nur unter den Modulen gegeben (Abbildung 5). Da im Falle einer Beweidung und Futterkonservierung nicht ausschließlich die Abschnitte unter Modulen zur Verfügung stehen (wo aber der Rohproteingehalt auch etwas über dem empfohlenen Wert liegt), sondern die gesamte Fläche, wäre es für Pferde nur bedingt geeignet.

Rinder haben einen anderen Anspruch an ihr Futter. Der Zielwert für Rohprotein in der Rinderfütterung liegt bei maximal 19 % (LUFA Nord-West 2022). Damit wären alle Standorte

in Hinblick auf den Rohproteingehalt für die Fütterung geeignet. Die Rinder benötigen die Proteine zur Bildung von Mikrobenprotein im Vormagen. Zudem haben laktierende Kühe ein erhöhten Proteinbedarf zur Bildung vom Milcheiweiß. Wären die Rohproteingehalte allerdings über 19 %, laufen sie in Gefahr für gesundheitliche Belastungen wie einer Pansenazidose (LUFA Nord-West, 2023).

Die Rohfasergehalte liegen leicht (0,6 -1,9 %) über dem empfohlenen Zielwert von 20 – 25 %. Der Gehalt der schwerverdaulichen Faserbestandteile Lignin und Cellulosen liegen bis zu 5 % über dem Optimum (25 % - 28 %, LUFA Nord-West 2022). Dabei ist der Gehalt unter den Modulen am höchsten (durchschnittlich im Mai 32,3 % und im Juli 33,3 %). Auf der Freifläche ist der tatsächliche durchschnittliche Gehalt an beiden Terminen nur knapp (0,2 % und 2,6 %) drüber. Bei dem aNDFom-Gehalt sieht es ähnlich aus. Auch hier wurden Zielwerte mit bis zu knapp 10 % überschritten. Dabei sind unter den Modulen (an beiden Terminen bei 55 %) und auf der Freifläche (im Mai 53,5 und im Juli 54,8 %) die gemessenen Werte am nächsten am Optimum (Abbildung 5). Die Zielwerte (LUFA Nord-West 2022) liegen hier bei 35 % - 46 %. Durch die höheren Fasergehalte wird die Abbaugeschwindigkeit zur Energieumsetzung erhöht. Diese ist wichtig für die Bildung von Milcheiweiß. Nur wenn zur gleichen Zeit ein richtiges Verhältnis von Energie und Protein im Pansen vorhanden ist, läuft diese effizient ab (Eurofins Agraranalytik, 2023).

Trotz des recht hohen Gehaltes von ADFom, der sich negativ auf den Energiegehalt auswirkt (Lfl, 2021), erreichen die Berechnungen der umsatzbaren Energie für Rinder für alle Standorte und Termine den empfohlenen Mindestwert von 10,5 MJ/kg TM (LUFA Nord-West 2022). In Mai sind diese insgesamt höher (11,1 MJ/kg TM - 11,3 MJ/kg TM) als im Juli (10,8 MJ/kg TM - 10,9 MJ/kg TM) (Abbildung 5).

Da bis auf die Faseranteile alle Mittelwerte der Standorte im Bereich der Zielwerte liegen, insbesondere auch der Energiegehalt, ist aus Aspekten der Futterqualität eine Beweidung durch - oder Futternutzung für - Rinder gut möglich. Die Auswirkungen der Module auf die Futterqualität erhöht den Rohproteingehalt, lässt aber auch gleichzeitig den Faseranteil steigen (Abbildung 5). Deshalb sollte bei laktierenden Kühen überprüft werden, ob die erhöhte Abbaugeschwindigkeit aufgrund des hohen Fasergehaltes im Grünfutter keine negativen Auswirkungen auf die Bildung des Milcheiweißes hat. Außerdem müsste bei einer geplanten Beweidung durch Kühe die Modulhöhe beachtet werden. Damit die Kühe die

Fläche unterhalb der Solarmodule beweiden können, ist eine Mindesthöhe von 1,50 m sinnvoll (Weber, 2020). Investitionskosten für den höheren Aufbau der Module sollten bei einer wirtschaftlichen Berechnung mit einbezogen werden.

Für die Ernährung vieler Wiederkäuer ist Grünland als Futter obligatorisch (Lfl, 2021). So auch für Schafe. Sie kommen gut mit faserreichen und energiearmen Gräsern zurecht. Dennoch wird mit höherer Futterqualität auch der Nährstoffbedarf besser gedeckt. Das steigert die Zuwachsleistung der Schafe und spart Kraftfutter (Burau et al., 2018). Damit könnte auch das untersuchte Grünland für die Beweidung mit Schafen interessant sein. Sie kommen gut mit den faserreichen Gräsern zurecht und gleichzeitig hat das Futter einen guten Energiegehalt. In Untersuchungen zur Beweidung von Grünflächen unter Solarmodulen, wurde bereits auch einige Synergien entdeckt. So wird der Schatten durch die Module in den warmen Monaten von den Tieren sehr gerne angenommen und aufgrund der Beweidung sind keine oder nur noch reduzierte Mäharbeiten zur Grünlandpflege notwendig (Pott, 2023). Wirtschaftlich interessant wird es zudem zusätzlich, wenn finanzielle Vergütungen ausgezahlt werden. Diese können bis zu 1.000 € pro ha sein (Pott, 2023). Außerdem ist für sie eine Modulhöhe ab 80 cm bereits ausreichend (Schalow, 2013).

Neben der recht kurzen Versuchsperiode für diese Arbeit, lässt sich auch noch die unterschiedliche Beschaffenheit der Böden innerhalb der gesamten Versuchsfläche als Kritikpunkt aufführen. Das südliche Triplet ist deutlich feuchter als das nördliche Triplet. Somit gibt bodenspezifische Unterschiede jeweils zwischen den beiden Freiflächen, den beiden Flächen unter und zwischen den Solarmodulen. Durch homogenere Bodeneigenschaften und einen längeren Zeitraum wären die Ergebnisse dieser Arbeit noch repräsentativer.

Außerdem wurde für die Eignung als Futtermittel nur die Qualitätsparameter betrachtet. Für die Gewinnung von konserviertem Futter müssen auch noch weitere Punkte beachtet werden. Die Module müssten hoch genug sein, um die Fläche bewirtschaften zu können. Hinzu kommt der Abstand. Für eine wirtschaftliche Analyse hierfür müssten auch der erhöhte Zeitaufwand, der höheren Anspruch an die Maschinen (Pott, 2023) und die vermutlich höheren Investitionskosten für die Solarmodule untersucht werden. Falls eine intensivere landwirtschaftliche Nutzung in Betracht gezogen werden soll, müsste dies wahrscheinlich auch in die Planung von Abstand und Höhe der Solarmodule mit einbezogen werden.

5 Fazit

Wie bereits vermutet, scheint das Grünland zwischen den Modulreihen von den positiven Effekten der Solarmodule zu profitieren, da der Ertrag höher als auf der Referenzfläche ist. Aber entgegen der Vermutung hatte nicht der Bereich direkt unter den Solarmodulen den höchsten Ertrag, sondern die Bereiche zwischen den Modulen. Im Vergleich zum Aufwuchs unter den Modulen sind die Erträge sogar deutlich höher. Auch die Vermutung, dass der Lignin- bzw. generell der Fasergehalt unter den Modulen am geringsten ist, wurde mithilfe der Versuchsergebnisse widerlegt. Dafür war, wie erwartet, der Proteingehalt unter den Modulen am größten und der Zuckergehalt in den Bereichen Freifläche und zwischen den Modulen am höchsten. Der Ertrag lässt sich mit dem Licht in eine positive Korrelation bringen, denn dort wo mehr Licht zur Verfügung steht, läuft die Photosynthese effizienter ab, was sich in der Masse und den Zuckergehalten zeigt.

Bei Trockenstress und Hitze profitieren die Bereiche unter den Modulen. Wenn man an den Klimawandel mit vermehrten Wetterextremen als Begleiterscheinungen denkt (DKK, 2023), könnten Solarmodule mehr Ertragssicherheit mit sich bringen.

Insgesamt ist das Grünland unter der Freiflächenphotovoltaik für die Rinderfütterung geeignet. Zwar ist das Grünfutter durch die leicht erhöhten Fasergehalte etwas schwerer verdaulich, dafür liegen aber alle anderen Werte inklusive der umsetzbaren Energie im optimalen Bereich. Dabei ist aber die Mindesthöhe der Modulunterkanten zu beachten. Bei der Beweidung mit Schafen genügen bereits 80 cm (Schalow, 2013), während Rinder mindestens 1,5 m benötigen (Weber, 2020). Das sollte bei den Investitionskosten berücksichtigt werden.

Eine Beweidung wäre aus mehreren wirtschaftlichen Aspekten sinnvoll. Zum einen ist eine Beweidung deutlich einfach umsetzbar als die Futterkonservierung, wo Maschineneinsatz notwendig ist. Aufgrund der Wiedervernässung von moorigen Standorten für den Natur- und Klimaschutz, wäre eine Befahrbarkeit wahrscheinlich auch nicht immer möglich. Hinzu kommt, dass das Tierwohl in den warmen Sommermonaten ebenfalls durch die Beschattung steigt (Maia et al., 2020). Bei der Bewirtschaftung mit Maschinen muss um die Module herumgearbeitet werden, weshalb der zusätzliche Zeitaufwand nicht außer Acht gelassen werden darf.

Das Klima profitiert gleich doppelt. Das feuchte, moorige Grünland verringert den Ausstoß von CO₂ (Gerowitt et al., 2013) und die Solarmodule erzeugen klimafreundlichen und emissionsarmen Strom (Wirth, 2023).

Aus wirtschaftlicher Sicht bieten die Solarmodule eine sichere Einnahmequelle für die Landwirte, da diese stark gefördert werden (Wirth, 2023). Auch der Punkt der Ertragssicherheit ist hier nochmal hervorzuheben. Zeitgleich kann eine Doppelnutzung, also die Erzeugung von Energie und Futter, den wirtschaftlichen Aspekt verstärken. Die Fläche bleibt damit auch der landwirtschaftlichen Produktion als Quelle für Futtermittel erhalten.

Insgesamt ließen sich durch die Ergebnisse aus der Versuchsperiode April 2023 bis Juli 2023 viele neue Erkenntnisse gewinnen und die meisten Hypothesen bestätigen. Allerdings sollten die Versuche über einen längeren Zeitraum stattfinden, um langfristig repräsentative Ergebnisse zu erzielen.

Literaturverzeichnis

- Armstrong, A., Ostle, N. J., & Whitaker, J. (2016). *Solar park microclimate and vegetation management effects on grassland carbon cycling*. Retrieved from Environmental Research Letters, Volume 11, Number 7: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/7/074016>
- Bayrische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL). (2021). *Futteranalysen verstehen*. Retrieved from <https://lfl.bayern.de/ite/futterwirtschaft/298565/index.php>. Letzter Abruf: 26.10.2023
- Braun, H., Thurow, U., & Volkmann, N. (2016). *Akkumulation organischer Substanz - Die Kohlenwasserstoffmuttergesteine*.
- Bundesamt für Naturschutz (BfN). (2014). *BfN Grünland-Report: Alles im Grünen Bereich?* Retrieved from Bundesamt für Naturschutz (BfN) (2014). BfN https://www.bfn.de/sites/default/files/2021-04/PK_Gruenlandpapier_30.06.2014_final_layout_barrierefrei_0.pdf
- Bundesinformationszentrum Landwirtschaft (BZL) . (2023). *Maßnahmen auf Grünland. Biodiversität auf landwirtschaftlichen Flächen fördern*. Retrieved from <https://www.praxis-agrar.de/umwelt/biologische-vielfalt/biodiversitaet-foerdern/massnahmen-auf-gruenland>. Letzter Abruf: 04.10.2023
- Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). (2020). *Nachhaltiger Schutz vor Wassererosion*. Retrieved from <https://www.bmel.de/DE/themen/landwirtschaft/pflanzenbau/bodenschutz/bodenerosion-durch-wasser.html>. Letzter Abruf: 10.10.2023
- Bundesregierung, D. (2023). *Fragen und Antworten zur Energiewende. Anteil der Erneuerbaren Energien steigt weiter*. Retrieved from <https://www.bundesregierung.de/breg-de/schwerpunkte/klimaschutz/faq-energiewende-2067498>. Letzter Abruf: 25.10.2023
- Bureau, C., & Kivelitz, H. (2018). *Grünlandmanagement mit Schafen - Empfehlungen der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen*. Retrieved from https://www.landwirtschaftskammer.de/riswick/pdf/gruenlandmanagement_schafe.pdf
- Deutscher Fachverband für Agroforstwirtschaft (DeFAF). (2023). *Bäume und Acker (Silvoarable Systeme)*. Retrieved from <https://agroforst-info.de/arten/baeume-und-acker>. Letzter Abruf: 24.10.2023
- Deutscher Wetterdienst (DWD) . (2023). *Wetter und Klima Schleswig*. Retrieved from https://www.dwd.de/DE/wetter/wetterundklima_vorort/schleswig-holstein_hamburg/schleswig/_node.html

- Deutsches Klima-Konsortium (DKK), Deutsche Meteorologische Gesellschaft (MG), Deutscher Wetterdienst (DWD), Extremwetterkongress Hamburg, Helmholtz-Klima-Initiative, klimafakten.de. (2023). *Was wir heute übers Klima wissen. Basisfakten zum Klimawandel, die in der Wissenschaft unumstritten sind.*
- Dr. Susanne Weyrauch-Wiegand. (2011). *Protein in der Pferdefütterung.* Retrieved from <https://www.dr-susanne-weyrauch.de/gesundheit/naehrstoffe/protein-in-der-pferdeernaehrung>. Letzter Abruf: 16.10.2023
- Dr. Susanne Weyrauch-Wiegand. (2012). *Die Weender Analyse.* Retrieved from <https://www.dr-susanne-weyrauch.de/gesundheit/die-weender-analyse>. Letzter Abruf am 16.10.2023
- Eurofins Agraranalytik . (2023). *Zellwände (NDF, ADF, ADL).* Retrieved from <https://www.eurofins.de/agraranalytik/agropedia/z/zellwaende-ndf-adf-adl/>. Letzter Abruf: 18.10.2023
- Excite LED grow lights. (2020). *Photosynthese - Das photosynthetische Wirkspektrum.* Retrieved from <https://www.exciteled.de/de/spektrum-photosynthese>. Letzter Abruf: 12.10.2023
- Freese, J. (2013). *Extensive Grünlandnutzung. Die Rolle der EU-Agrarförderung und eines kooperativen Managements.*
- Gerowitt, B., Schröder, S., Dempfle, L., Engels, J., Feindt, P., Graner, A., . . . Wolters, V. (2013). *Biodiversität im Grünland - Unverzichtbar für Landwirtschaft und Gesellschaft. Stellungnahme des wissenschaftlicher Beirats für Biodiversität und Genetische Ressourcen beim Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, 20 S.* Wissenschaftlicher Beirat für Biodiversität und Genetische Ressourcen beim BMELV.
- Kanzler , M., Böhm, C., Mirck, J., Schmitt, D., & Veste, M. (2015). *Variabilität des Mikroklimas im Einflussbereich der Gehölzstreigen eines Agroforstsystems. .*
- Kanzler, M., Böhm, C., Mirck, J., Schmitt, D., & Veste, M. (2017). *Einfluss agroforstlicher Nutzung auf das Mikroklima, den Ackerfruchtertrag und die potentielle Evaporation. .*
- Lichti, F., Thurner, S., Henkelmann, G., Döring, G., Alkofer, C., Berndl, M., . . . Dercks, S. (2018). *Was kann NIRS in frt Landwirtschaft leisten? .* Biogas Forum Bayern Nr. II - 32/2018. ALB Bayern e.V.:
- LUFA Nord-West . (2023). *Probennahme Grundfutter.* Retrieved from <https://www.lufa-nord-west.de/index.cfm/nav/9/article/2252.html>. Letzter Abruf 19.10.2023
- LUFA Nord-West . (2023). *Informationen zu Futtermittelanaysen. Institut für Futtermittel.* Retrieved from <https://www.lufa-nord-west.de/index.cfm/article/2196.html>. Letzter Abruf: 16.10.2023

- LUFÄ Nord-West. (2023). *Basiswissen Tierernährung und Futtermittelanalyti*. Retrieved from <https://www.lufa-nord-west.de/index.cfm/action/downloadcenter?file=0DEFC2D5>.
Letzter Abruf: 16.10.2023
- Macholdt, J., Hadasch, S., Macdonald, A., Perryman, S., Piepho, H.-P., Scott, T., & Steycken, M. (2023). *Long-term trends in yield variance of temperate managed grassland*.
- Maia, A., Culhari, E., Fonsêca, V., Milan, H., & Gebremdhin, K. (2020). *Photovoltaic panels as shading resources for livestock*. *Journal of Cleaner Produktion* 258: 120551.
- NDR. (2021). *Landwirtschaft im Moor: Vom CO2-Problem zur Lösung*. Retrieved from <https://www.ndr.de/fernsehen/sendungen/panorama3/Landwirtschaft-im-Moor-Vom-CO2-Problem-zur-Loesung,moor476.html>. Letzter Abruf 25.08.2023
- NDR. (2023). *Lottorf: Unter dem Solarpark erholt sich das Moor*. Retrieved from <https://www.ndr.de/nachrichten/schleswig-holstein/Lottorf-Unter-dem-Solarpark-erholt-sich-das-Moor,solarpark244.html>. Letzter Abruf: 25.08.2023
- Nord-West, L. (2022). *Untersuchung von Futtermitteln für Pferde bei der LUFÄ Nord-West*. Retrieved from <https://www.lufa-nord-west.de/index.cfm/action/downloadcenter?file=0DECCBDA>. Letzter Abruf: 18.10.2023
- Opti-Ration. (2020). *Ermittlung ME Grassilage*. Retrieved from <https://opti-ration.de/wp-content/uploads/2021/05/GrassilageLUFÄ20m.Erlaeuterungen.pdf#>. Letzter Abruf 18.10.2023
- Pflanzenforschung.de. (2023). *Photosynthese*. Retrieved from <https://www.pflanzenforschung.de/de/pflanzenwissen/lexikon-a-z/photosynthese-285>. Letzter Abruf: 07.08.2023
- Pott, T. W. (2023). *Synergien von Freiflächen Photovoltaik und Weidetierhaltung*.
- Schalow, L. (2013). *Schafbeweidung in Solarparks*.
- Spiekers, H., Pohl, C., & Staudacher, W. (2013). *Leitfaden zur Berechnung des Energiegehaltes bei Einzel und Mischschfuttermitteln für die Schweine- und Rinderfütterung. Stellungnahme des ALG- Arbeitskreises Futter oder Fütterung*.
- StudySmarter. (2023). *Pflanzenwachstum*. Retrieved from <https://www.studysmarter.de/schule/biologie/oekologie/wachstumsfaktor-biologie/>. Letzter Ahruf: 12.10.2023
- Umweltbundesamt (UBA). (2023). *Indikator: Grünlandfläche*. Retrieved from <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltindikatoren/indikator-gruenlandflaeche#welche-bedeutung-hat-der-indikator>. Letzter Abruf: 02.10.2023
- Umweltbundesamt (UBA). Günnewig, D., Johannwerner, E., Kamm, J., Kelm, T., Metzger, J., Moog, C., & Wegener, N. (2022). *Abschlussbericht: Umweltverträgliche Standortsteuerung von Solar-Freiflächenanlagen. EVUPLAN des Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz*.

Wattmanufactur GmbH & Co. KG. (2021). Solarpark Lottorf.

Weber, C. (2020). Hermeskeiler Landwirt plant Energie-Alm. Wenn Rinder im Solarpark grasen. *volksfreund*.

Wirth, H. (2023). *Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Fassung vom 27.09.2023.* .
Frauenhofer ISE.

Anhang

Berechnung der Mittelwerte, Standardabweichung und Variationskoeffizienten nach Transekten pro Schnitttermin						Berechnung der Mittelwerte, Standardabweichung und Variationskoeffizienten nach Transekten pro Schnitttermin					
Termin	Parameter	Standort	Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient	Termin	Parameter	Standort	Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient
19.04.2023*	CSH (in cm)	Freifläche	9,25	0,25	0,03	20.06.2023	CSH (in cm)	Freifläche	9,13	1,21	0,13
		Unter Modulen	7,00	1,00	0,14			Unter Modu	9,29	3,52	0,38
		Zw. Modulen	7,25	2,25	0,31			Zw. Moduler	9,92	2,46	0,25
	TS (in %)	Freifläche	24,00	1,92	0,08		TS (in %)	Freifläche	25,80	4,80	0,19
		Unter Modulen	32,87	8,64	0,26			Unter Modu	33,01	2,27	0,07
		Zw. Modulen	36,01	0,10	0,00			Zw. Moduler	29,94	1,61	0,05
	TM (in g/m ²)	Freifläche	82,08	35,31	0,43		TM (in g/m ²)	Freifläche	86,80	40,80	0,47
		Unter Modulen	61,94	18,22	0,29			Unter Modu	104,74	60,68	0,58
		Zw. Modulen	94,58	3,85	0,04			Zw. Moduler	103,53	41,78	0,40
24.05.2023	CSH (in cm)	Freifläche	15,95	5,91	0,37	26.07.2023	CSH (in cm)	Freifläche	14,51	4,55	0,31
		Unter Modulen	17,85	5,58	0,31			Unter Modu	12,81	3,25	0,25
		Zw. Modulen	19,83	6,68	0,34			Zw. Moduler	16,59	5,20	0,31
	TS (in %)	Freifläche	23,37	3,41	0,15		TS (in %)	Freifläche	24,51	5,93	0,24
		Unter Modulen	20,60	5,44	0,26			Unter Modu	24,57	4,31	0,18
		Zw. Modulen	24,95	3,84	0,15			Zw. Moduler	24,97	2,47	0,10
	TM (in g/m ²)	Freifläche	246,29	132,44	0,54		TM (in g/m ²)	Freifläche	224,68	112,87	0,50
		Unter Modulen	235,78	139,38	0,59			Unter Modu	189,54	86,73	0,46
		Zw. Modulen	251,21	106,28	0,42			Zw. Moduler	225,91	94,86	0,42
	XA (in %)	Freifläche	5,97	1,22	0,20		XA (in %)	Freifläche	6,20	0,72	0,12
		Unter Modulen	6,74	1,10	0,16			Unter Modu	6,89	0,89	0,13
		Zw. Modulen	5,98	0,72	0,12			Zw. Moduler	5,95	0,47	0,08
	XP (in %)	Freifläche	15,38	0,92	0,06		XP (in %)	Freifläche	15,79	2,20	0,14
		Unter Modulen	16,99	2,36	0,14			Unter Modu	17,23	2,87	0,17
		Zw. Modulen	14,48	1,70	0,12			Zw. Moduler	13,49	0,72	0,05
	XL (in %)	Freifläche	3,25	0,21	0,07		XL (in %)	Freifläche	3,37	0,26	0,08
		Unter Modulen	3,25	0,53	0,16			Unter Modu	3,20	0,36	0,11
		Zw. Modulen	3,00	0,33	0,11			Zw. Moduler	3,17	0,28	0,09
	XF (in %)	Freifläche	25,58	2,43	0,10		XF (in %)	Freifläche	25,82	1,39	0,05
		Unter Modulen	26,83	2,68	0,10			Unter Modu	26,93	2,11	0,08
		Zw. Modulen	25,98	2,23	0,09			Zw. Moduler	26,22	1,77	0,07
	ADL (in %)	Freifläche	2,56	0,42	0,17		ADL (in %)	Freifläche	3,09	0,31	0,10
		Unter Modulen	2,71	0,36	0,13			Unter Modu	3,11	0,34	0,11
		Zw. Modulen	2,78	0,40	0,15			Zw. Moduler	3,22	0,32	0,10
	ADFom (in %)	Freifläche	30,25	3,19	0,11		ADFom (in %)	Freifläche	31,62	1,73	0,05
		Unter Modulen	32,29	3,01	0,09			Unter Modu	33,30	2,38	0,07
		Zw. Modulen	32,34	2,52	0,08			Zw. Moduler	32,71	1,77	0,05
	aNDFom (in %)	Freifläche	53,67	2,83	0,05		aNDFom (in %)	Freifläche	54,81	1,76	0,03
		Unter Modulen	55,24	3,67	0,07			Unter Modu	55,63	2,74	0,05
		Zw. Modulen	54,82	3,32	0,06			Zw. Moduler	55,48	2,57	0,05
	XZ (in %)	Freifläche	11,02	3,44	0,31		XZ (in %)	Freifläche	8,47	1,80	0,21
		Unter Modulen	7,77	2,82	0,36			Unter Modu	6,45	1,77	0,27
		Zw. Modulen	10,44	2,99	0,29			Zw. Moduler	8,74	1,45	0,17
	Fru (in %)	Freifläche	6,49	2,47	0,38		Fru (in %)	Freifläche	5,48	1,36	0,25
		Unter Modulen	3,62	2,66	0,73			Unter Modu	4,00	1,56	0,39
		Zw. Modulen	7,02	1,96	0,28			Zw. Moduler	6,21	1,07	0,17
	ME Rind (in MJ/kg TM)	Freifläche	11,31	0,26	0,02		ME Rind (in MJ/kg TM)	Freifläche	10,91	0,19	0,02
		Unter Modulen	11,18	0,27	0,02			Unter Modu	10,79	0,22	0,02
		Zw. Modulen	11,08	0,27	0,02			Zw. Moduler	10,82	0,16	0,01

Tabelle 2: CV-Tabelle

Datum	Code	Standort	Sensor/ Bereich im Transect	Wuchshöhe (CSH in cm)	Residualhöhe he nach Schneit aus		TM (in g/m ²)	XA (in %)	XP (in %)	XL (in %)	XF (in %)	AD (in %)	aND (in %)	ME Rind (in M/ha TM)				
					Zs	TS												
24.05.2023	1_Med_1_U	124001	unter/Modul	1,00	13,63	7,00	15,95	119,44	6,35	20,34	3,77	26,17	2,93	30,78	53,64	5,66	1,27	13,33
24.05.2023	1_Med_2_LR	124002	unter/Modul	2,00	12,25	7,00	14,36	131,11	6,35	21,97	4,26	24,20	2,70	30,02	50,01	4,95	0,73	13,35
24.05.2023	1_Med_3_LR	124003	unter/Modul	3,00	10,88	7,00	13,07	131,11	5,77	19,95	4,00	23,86	2,53	30,10	51,08	6,89	1,26	11,37
24.05.2023	1_Med_4_LR	124004	unter/Modul	4,00	9,50	7,00	11,71	131,11	5,39	17,91	3,43	22,69	2,29	27,45	48,73	6,26	4,41	11,37
24.05.2023	1_Med_5_RL	124005	unter/Modul	5,00	8,18	7,00	10,49	137,22	6,28	17,26	2,60	23,14	2,64	30,10	52,05	6,44	0,80	11,40
24.05.2023	1_Med_6_RL	124006	unter/Modul	6,00	7,00	7,00	9,25	161,11	6,53	20,35	3,00	28,70	3,09	35,11	61,32	6,86	2,29	10,92
24.05.2023	1_Med_7_RF	124007	unter/Modul	7,00	6,00	7,00	8,00	163,33	5,99	18,27	2,45	27,44	2,45	32,37	54,26	7,17	3,37	11,46
24.05.2023	1_Med_8_RF	124008	unter/Modul	8,00	5,00	7,00	7,00	151,67	5,92	16,83	1,93	26,01	2,73	30,63	51,21	7,89	2,20	11,36
24.05.2023	1_Ref_1	124009	Freifläche	9,00	3,38	7,00	27,55	83,89	4,87	15,20	3,12	22,73	2,45	28,22	51,71	13,69	8,95	11,42
24.05.2023	1_Ref_2	124010	Freifläche	10,00	3,75	7,00	22,72	140,00	5,36	14,36	3,34	24,06	2,37	29,35	53,63	12,84	8,72	11,28
24.05.2023	1_Ref_3	124011	Freifläche	11,00	4,13	7,00	18,82	126,12	5,87	13,81	3,43	24,07	2,39	27,45	54,63	14,63	9,41	11,36
24.05.2023	1_Ref_4	124012	Freifläche	12,00	4,50	7,00	22,53	117,78	5,86	11,61	3,86	24,17	2,72	30,40	52,26	10,84	6,80	11,27
24.05.2023	1_Ref_5	124013	Freifläche	13,00	4,88	7,00	27,05	87,78	4,90	15,07	3,32	24,72	2,12	27,44	50,46	12,79	7,22	11,46
24.05.2023	1_Ref_6	124014	Freifläche	14,00	5,25	7,00	23,00	72,22	5,32	14,00	3,80	25,02	2,39	27,45	54,56	11,32	6,48	11,35
24.05.2023	1_Ref_7	124015	Freifläche	15,00	5,63	7,00	25,33	64,44	5,49	16,01	3,50	25,13	2,38	28,89	54,25	10,50	6,30	11,32
24.05.2023	1_Ref_8	124016	Freifläche	16,00	6,00	7,00	26,57	59,67	5,73	15,63	3,17	24,97	2,52	28,52	53,70	10,36	5,46	11,29
24.05.2023	1_Gap_1	124017	Zw. Modulen	17,00	6,38	7,00	24,44	140,00	6,66	16,22	3,72	25,52	2,34	28,86	49,78	9,32	6,80	11,16
24.05.2023	1_Gap_2	124018	Zw. Modulen	18,00	6,75	7,00	18,18	201,67	6,32	15,12	3,17	26,43	2,87	31,87	54,97	10,25	6,19	11,05
24.05.2023	1_Gap_3	124019	Zw. Modulen	19,00	7,13	7,00	20,14	256,56	5,88	16,53	3,44	25,37	3,14	33,85	55,09	7,22	4,68	10,89
24.05.2023	1_Gap_4	124020	Zw. Modulen	20,00	7,50	7,00	22,22	157,78	5,87	15,77	3,42	24,70	2,80	33,02	53,69	9,17	5,73	10,97
24.05.2023	1_Gap_5	124021	Zw. Modulen	21,00	7,88	7,00	27,48	109,44	5,56	15,75	3,15	23,48	2,61	30,12	51,19	11,67	8,41	11,23
24.05.2023	1_Gap_6	124022	Zw. Modulen	22,00	8,25	7,00	23,31	176,67	5,40	16,24	2,93	28,05	2,86	34,05	56,72	7,29	3,92	10,98
24.05.2023	1_Gap_7	124023	Zw. Modulen	23,00	8,63	7,00	28,60	173,67	5,85	16,30	3,16	24,95	3,16	32,58	54,42	9,15	7,57	10,87
24.05.2023	1_Gap_8	124024	Zw. Modulen	24,00	9,00	7,00	29,32	140,00	5,93	15,73	3,41	25,92	2,86	31,63	52,69	11,32	7,41	11,24
24.05.2023	2_Med_1_U	124025	unter/Modul	25,00	16,75	6,50	19,33	250,00	8,21	17,20	4,01	20,11	2,69	34,33	59,55	5,04	1,44	11,05
24.05.2023	2_Med_2_LR	124026	unter/Modul	26,00	15,38	6,50	15,67	120,00	8,21	18,52	3,10	29,81	2,87	35,07	58,93	5,02	1,02	11,01
24.05.2023	2_Med_3_LR	124027	unter/Modul	27,00	14,00	6,50	12,89	303,61	7,75	19,19	2,60	31,99	2,60	31,09	46,40	4,12	1,32	11,02
24.05.2023	2_Med_4_LR	124028	unter/Modul	28,00	12,63	7,00	21,93	165,56	8,09	17,54	2,40	26,72	2,34	31,64	52,75	5,00	4,26	11,27
24.05.2023	2_Med_5_RL	124029	unter/Modul	29,00	11,25	8,00	24,09	126,00	7,08	17,72	2,91	25,71	2,23	30,48	52,51	9,04	4,94	11,22
24.05.2023	2_Med_6_RL	124030	unter/Modul	30,00	10,00	8,00	21,00	202,67	6,15	18,15	2,15	30,31	2,15	30,48	52,51	9,04	4,94	11,22
24.05.2023	2_Med_7_RF	124031	unter/Modul	31,00	27,00	6,50	19,07	227,22	8,95	16,57	2,85	31,30	3,11	35,83	59,04	4,36	1,33	10,88
24.05.2023	2_Med_8_RF	124032	unter/Modul	32,00	26,25	8,50	24,43	191,11	8,55	13,84	2,45	29,73	2,93	36,36	60,60	5,85	2,63	10,86
24.05.2023	2_Ref_1	124033	Freifläche	33,00	25,00	9,00	25,00	182,22	8,33	13,81	2,15	30,31	2,15	37,83	60,60	5,85	2,63	10,86
24.05.2023	2_Ref_2	124034	Freifläche	34,00	23,75	7,50	23,73	308,33	4,58	14,53	3,05	22,39	1,77	25,64	49,85	18,64	11,02	11,85
24.05.2023	2_Ref_3	124035	Freifläche	35,00	22,50	7,50	22,66	400,56	5,62	16,83	3,37	25,47	2,51	29,76	54,22	9,66	5,15	11,20
24.05.2023	2_Ref_4	124036	Freifläche	36,00	21,25	7,50	21,25	300,00	6,30	15,20	3,10	27,13	2,30	31,63	52,69	11,32	7,13	11,16
24.05.2023	2_Ref_5	124037	Freifläche	37,00	20,00	7,50	23,54	232,22	5,89	14,88	3,41	21,82	1,78	25,48	51,11	16,44	9,75	11,81
24.05.2023	2_Ref_6	124038	Freifläche	38,00	18,75	7,50	26,00	275,56	5,08	14,50	3,40	24,93	2,49	28,89	52,88	13,89	8,73	11,44
24.05.2023	2_Ref_7	124039	Freifläche	39,00	17,50	8,00	26,65	331,67	5,42	14,46	3,08	27,32	2,73	32,69	57,98	9,96	6,43	11,15
24.05.2023	2_Ref_8	124040	Freifläche	40,00	16,25	8,00	25,15	292,78	5,15	14,78	3,19	24,19	2,49	31,63	52,69	11,32	7,13	11,16
24.05.2023	2_Gap_1	124041	Zw. Modulen	41,00	15,00	6,50	27,35	207,22	5,64	13,84	2,77	27,51	2,61	32,48	55,21	10,25	6,88	11,17
24.05.2023	2_Gap_2	124042	Zw. Modulen	42,00	13,75	7,00	25,00	213,33	6,88	16,26	3,13	24,91	2,65	31,05	55,38	8,10	4,94	11,18
24.05.2023	2_Gap_3	124043	Zw. Modulen	43,00	12,50	7,00	23,00	278,00	6,15	14,63	2,82	27,16	2,61	31,63	52,69	11,32	7,13	11,16
24.05.2023	2_Gap_4	124044	Zw. Modulen	44,00	11,25	8,00	29,29	238,33	5,34	12,14	2,42	24,90	2,93	35,80	60,04	8,73	6,76	10,89
24.05.2023	2_Gap_5	124045	Zw. Modulen	45,00	10,00	7,00	27,75	297,22	6,05	13,76	2,71	28,18	2,95	35,14	59,79	7,73	5,34	10,93
24.05.2023	2_Gap_6	124046	Zw. Modulen	46,00	8,75	7,00	26,25	292,22	5,22	13,25	2,52	26,22	2,52	31,63	52,69	11,32	7,13	11,16
24.05.2023	2_Gap_7	124047	Zw. Modulen	47,00	7,50	7,50	26,79	331,11	5,37	12,11	2,62	27,42	2,58	31,87	55,16	13,66	9,34	11,29
24.05.2023	2_Gap_8	124048	Zw. Modulen	48,00	6,25	5,50	23,82	113,67	5,77	13,97	3,14	22,11	1,69	25,19	47,32	19,48	11,78	11,97
2. Qualitätskriterien (auf ca. 7 cm)																		
26.07.2023	1_Med_3_LR	124049	unter/Modul	1,00	10,00	6,50	21,99	123,61	6,83	21,14	3,55	24,21	2,98	31,51	52,96	4,30	3,18	10,87
26.07.2023	1_Med_4_LR	124050	unter/Modul	2,00	8,25	5,00	33,46	110,78	7,11	20,10	3,27	24,97	3,15	32,68	54,97	4,69	4,11	10,76
26.07.2023	1_Med_5_RL	124051	unter/Modul	3,00	6,75	4,00	24,84	189,50	6,76	17,70	4,47	25,70	3,21	31,60	52,49	6,18	4,11	10,89
26.07.2023	1_Med_6_RL	124052	unter/Modul	4,00	5,00	5,75	18,34	165,28	6,46	15,62	3,63	25,65	3,63	31,63	52,69	11,32	7,13	11,16
26.07.2023	1_Med_7_RF	124053	unter/Modul	5,00	4,00	7,50	21,57	87,83	7,21	22,78	4,01	21,69	2,29	27,50	49,26	7,33	3,02	11,11
26.07.2023	1_Med_8_RF	124054	unter/Modul	6,00	3,00	7,50	15,18	83,06	6,21	22,48	4,13	21,91	2,29	35,06	59,60	5,44	2,87	10,50
26.07.2023	1_Med_9_RF	124055	unter/Modul	7,00	2,00	7,50	10,25	202,67	6,25	17,02	3,49	26,04	2,60	31,63	52,69	11,32	7,13	11,16
26.07.2023	1_Med_10_RF	124056	unter/Modul	8,00	1,50	7,25	19,68	124,33	8,07	22,43	3,82	23,68	2,69	29,92	50,53	4,34		

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle wörtlichen und sinngemäß aus veröffentlichten und nicht veröffentlichten Schriften und sonstigen Quellen entnommen Stellen sind als solche kenntlich gemacht. Weiterhin erkläre ich, dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen hat.

Göttingen, den 13.11.2023

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'P. Seigmeyer', written over a horizontal line.

(Unterschrift)