Diese Arbeit wurde vorgelegt am
Geographischen Institut
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

Bachelorarbeit

Blattflächenindex–Schätzung in einem Fichtenwald im Nationalpark Eifel anhand von Messungen der photosynthetisch aktiven Strahlung

Leaf area index estimation in a spruce forest
in the Eifel National Park based
on measurements of photosynthetically active radiation

von Tim Nießen

409905 Angewandte Geographie

Prüfer:
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Michael Leuchner
Dr. Alexander Graf
Dr. phil. Gunnar Ketzler

Aachen, den 24.09.2024

Inhalt

1 Einleitung 2
1.1 Begriffsdefinitionen 2
1.2 Gewählter Begriff Blattflächenindex 4
1.3 Bedeutung des Blattflächenindex 4
1.4 Methodiken zu Messung des Blattflächenindex 5
2 Standort 6
2.1 Klimatische Bedingungen 7
2.2 Vegetation 7
2.3 Geschichte des Standortes 8
3 Methodik 9
3.1 Gleichung 9
3.2 PAR-Messungen 10
3.3 Parameter TAU 13
3.4 Digitale Hemisphärische Fotografie 14
3.4.1 Wetterbedingungen für DHP 14
3.4.2 Messpunkte DHP 15
3.4.3 Material und Kameraeinstellungen 15
3.4.4 Auswertung DHP 17
3.5 Parameter Clumping Faktor 18
3.6 Parameter ALIA 19
3.7 Parameter Fbeam 20
3.8 Parameter Zenit 20
3.9 Parameter ABSORB 20
4 LAI-Schätzung 21
4.1 Vergleich LAI Werte aus Berechnung und DHP 21
4.2 Tagesgang LAI 25
4.3 Jahresgang LAI 30
5 Ausblick und Diskussion 33
5.1 Vorteile der PAR-Methodik 34
5.2 Verbesserungen der PAR-Methodik 34
5.3 Mögliche weiteren Anwendungen 35
6 Literaturverzeichnis 36
7 Anhang 39

1 Einleitung

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurde der Blattflächenindex (LAI) aus Messungen der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) berechnet. Die Berechnung des LAI erfolgt auf Ebene der Messpunkte (MP) unter Zuhilfenahme eines Modells für den Strahlungstransport durch Baumkronen, welches auf der Beer-Lambert-Gleichung basiert (ICOS 2020:11).

Der Blattflächenindex stellt eine entscheidende Strukturvariable der Vegetation dar und spielt eine wesentliche Rolle bei der Rückkopplung der Vegetation auf das Klimasystem (Fang et al. 2019:739). Der Wert des LAI wirkt sich auf die Licht-, Wärme- und Feuchtigkeitsbedingungen innerhalb und unterhalb des Kronendachs aus und beeinflusst somit den Kohlenstoff-, Wasser- und Energiehaushalt auf Bestands-, Landschafts- und globaler Ebene (Fassnacht et al. 1994:185).

Der Untersuchungsstandort ist Teil einer 80-jährigen Fichtenmonokultur (*Picea abies*) im Nationalpark Eifel. Zur Messung der photosynthetisch aktiven Strahlung wurden zehn fest installierte PAR-Sensoren eingesetzt, welche in einem Intervall von zehn Minuten Messwerte lieferten. Aus den einzelnen, gemessenen PAR-Werten wurden chronologische Datenreihen für den LAI berechnet. Diese Datenreihen wurden hinsichtlich ihres Tages- und Jahresverlaufs für das Jahr 2023 analysiert. Auf Basis der Tagesverläufe des LAI wurden Rückschlüsse hinsichtlich des Einflusses der Strahlungsbedingungen auf die mittels der PAR-Methodik berechneten LAI-Werte gewonnen. Des Weiteren wurden die Resultate der PAR-Methodik mit LAI-Werten, welche mit digitalen hemisphärischen Fotos (DHP) ermittelt wurden, verglichen, um Rückschlüsse hinsichtlich der Aussagekraft der mit PAR-Methodik berechneten LAI-Werte zu gewinnen.

1.1 Begriffsdefinitionen

In der wissenschaftlichen Diskussion über Pflanzenoberflächen gibt es mehrere engverwandte Begriffe mit leicht unterschiedlichen Definitionen, die häufig als Synonyme verwendet werden (Fang et. al 2019:740). Dazu gehören die Begriffe PAI (plant area index) für den Pflanzenflächenindex, GAI (green area index) für den Grünflächenindex sowie LAI (leaf area index) für den Blattflächenindex. Im Folgenden erfolgt eine Definition der drei Begriffe sowie eine Herausarbeitung ihrer Unterschiede.

Der PAI ist definiert als die gesamte Fläche aller Pflanzenelemente pro Einheit horizontaler Bodenfläche. Damit umfasst der Pflanzenflächenindex alle Bestandteile einer Pflanze, somit auch Stämme, Äste und reproduktive Elemente, unabhängig von ihrem photosynthetischen Potenzial (Baret et al., 2010:1394). Damit unterscheidet der PAI weder zwischen Blättern und anderen Pflanzenelementen noch zwischen grünen und nicht grünen Pflanzenelementen (Baret et al.,

2010:1394). Die Beschreibung der Pflanzenoberfläche kann auf unterschiedlichen Methoden basieren. Eine dieser Methoden ist die Bestimmung des Lückenanteil des Kronendaches. Dieser Lückenanteil ist sowohl von grünen als auch von nicht grünen Elementen des Vegetationskörpers abhängig, was Stämme und Äste miteinschließt. Bei Berechnungen der Pflanzenoberflächen aus dem Lückenanteil ist es sinnvoll vom Pflanzenflächenindex (PAI) zu sprechen, wenn keine Korrektur für nicht blättrige Elemente durchgeführt wird (Baret et al., 2010:1394).

Im Gegensatz zum PAI berücksichtigt der GAI nur alle grünen Bestandteile einer Pflanze, aber unterscheidet dabei nicht zwischen Blättern, Stängeln und Fortpflanzungsorganen (Baret et al., 2010:1394). Da jedoch auch nicht grüne Blätter zur Photosynthese beitragen können, ist der GAI nicht automatisch mit der photosynthetisch aktiven Fläche einer Pflanze gleichzusetzen (Fang et. al 2019:740). Der GAI ist in Pflanzenmodellen der Photosynthese, der Kronenlichtabsorption und der Lichtnutzungseffizienz verbreitet, da er enger mit dem Anteil der absorbierten photosynthetisch aktiven Strahlung zusammenhängt (Baret et al., 2010:1394).

Der LAI beschränkt sich im Gegensatz zum PAI und GAI lediglich auf die Blattoberfläche eines Pflanzenbestandes. Der LAI ist bei nicht flachen Blättern als die Hälfte der gesamten Abfangfläche pro Bodenflächeneinheit definiert (Chen, Black 1992:421). Damit ist der LAI ein Maß für die Belaubungsdichte an einem Standort. Der LAI ist eine dimensionslose Zahl, je höher, desto größer ist die photosynthetisch aktive Oberfläche an einem Standort (Gallenmüller 1999). Der LAI ist eine wichtige Variable in Modellen, welche die Photosynthese, die Pflanzenatmung und die Interzeption von Niederschlägen abbilden sollen. Diese Parameter koppeln die Vegetation an das Klimasystem, den Kohlestoff- und den Wasserkreislauf. Aufgrund dessen ist der LAI eine Schlüsselvariable in vielen Modellen, welche die Wechselwirkung zwischen Vegetation und Atmosphäre beschreiben (GCOS, 2009:116-117). In der Tabelle 1 sind die Unterscheide der drei Begriffe noch einmal herausgearbeitet.

Tabelle 1: Unterscheide der drei Begriffe LAI, GAI und PAI

Abkürzung	Bedeutung	grüne Blätter	nicht grüne Blätter	grüne sonstige Oberflächen	Nicht grüne sonstige Oberflächen
LAI	Leaf area index	√	√		
GAI	Green area index	√		√	
PAI	Plant area index	√	√	√	√

Eigene Darstellung nach Fang et. al 2019:741

1.2 Gewählter Begriff Blattflächenindex

In dieser Arbeit wurde der Begriff Blattflächenindex (LAI) ausgewählt, da er der häufigste verwendete Parameter zur Beschreibung von Baumkronen in der wissenschaftlichen Debatte ist (Welles 1990:32). Des Weiteren wird in dieser Arbeit der LAI mit Hilfe von photosynthetisch aktiver Strahlung berechnet, sodass der Pflanzenflächenindex (PAI), der auch nicht photosynthetisch aktive Pflanzenbestandteile miteinbezieht, nicht geeignet ist. Der Grünflächenindex (GAI) wäre vermutlich der Begriff, der die Ergebnisse der Berechnung am genausten beschreibt. Allerdings ist seine deutsche Übersetzung missverständlich und erinnert an Begriffe aus der Raumplanung. Der Blattflächenindex hingegen ist eindeutiger und ermöglicht ein besseres Verständnis der in dieser Bachelorarbeit durchgeführten Maßnahmen. Aus den genannten Gründen wird überwiegend der Begriff "Blattflächenindex" verwendet, auch wenn keine der beschriebenen Bezeichnungen gänzlich zutreffend ist.

1.3 Bedeutung des Blattflächenindex

Der Blattflächenindex ist eine entscheidende Strukturvariable der Vegetation und spielt eine wesentliche Rolle bei der Rückkopplung der Vegetation auf das Klimasystem (Fang et. al 2019:739). Die Licht-, Wärme- und Feuchtigkeitsbedingungen innerhalb und unterhalb des Kronendachs werden durch den LAI definiert und beeinflussen somit den Kohlenstoff-, Wasser- und Energiehaushalt auf Bestands-, Landschafts- und globaler Ebene (Fassnacht et al. 1994:185). Daher sind zuverlässige, schnelle und objektive Schätzungen des Blattflächenindex für eine Vielzahl an Studien, die sich mit der Wechselwirkung zwischen Atmosphäre und Vegetation beschäftigen, unerlässlich (Jonckheere et al., 2004:19). Des Weiteren kann der LAI sowohl als Indikator für das Wachstum des Kronendaches als auch für die vorangegangene Entwicklung herangezogen werden, was die Einschätzung der Wirkung verschiedener möglicher Stressoren zulässt. Aus diesem Grund ist der LAI eine sehr gezielte Variable sowohl für das Verständnis als auch für die Modellierung der Funktion der Baumkrone (Baret et al., 2010:1393).

Baumkronen reagieren schneller und empfindlicher als andere Bestandsstrukturkomponenten auf abiotische und biotische Störungen und zeigen daher ein wirksames Potenzial für die Überwachung des Zustands von Waldökosystemen (Cutini 2002:62). Jede Veränderung des Blattflächenindex, sei es durch Trockenheit, Sturm, Frost, Entlaubung oder der Bewirtschaftungspraxis, geht mit Veränderung der Bestandsproduktivität einher (Breda 2003:2403). Die Menge an Laub in einem Wald hat einen direkten Einfluss auf das Wachstum der Bäume und die Wachstumsbedingungen für die Unterholzvegetation (Chen et al. 1997:29429).

1.4 Methodiken zu Messung des Blattflächenindex

Die Feldmessung des LAI wird anhand direkter oder indirekter Methodiken ermittelt (Jonckheere et al., 2004:20). Bei den direkten Methoden wird die Blattfläche an geernteten Blättern oder an der Blattstreu gemessen (Fang et. al 2019:742). Die indirekten Methoden basieren auf einer wechselwirkenden Beziehung zwischen der Blattfläche und anderen biophysikalischen Variablen des Kronendachs. Ein Beispiel hierfür ist die logarithmische Beziehung zwischen der Lichtdurchlässigkeit oder dem Lückenanteil der Baumkrone mit der Blattfläche (Fang et al. 2019:742)

Die Blattfläche kann bei der direkten Methodik mit Hilfe eines Blattflächenmessgerätes an den geernteten Blättern händisch gemessen werden (Fang et. al 2019:742). Bei der semi-direkten Methode wird der LAI aus der spezifischen Blattfläche (SLA) berechnet. Die SLA gibt die Blattfläche pro Blatttrockenmasse an. Es wird im Allgemeinen das trockene Blattgewicht verwendet, da Frischgewichte von Änderungen des Wassergehaltes der Blätter abhängig sind (Fang et. al 2019:742). Dabei wird die Blattfläche an einer Teilprobe von Blättern gemessen und mit der Trockenmasse in Beziehung gesetzt. Die dabei resultierende SLA wird anschließend mit der Gesamttrockenmasse der Blätter, die innerhalb einer bekannten Bodenfläche gesammelt wurden, multipliziert und damit in den LAI umgerechnet (Breda 2003:2404).

Da sich die direkten Methoden ausschließlich auf das Laub beziehen, ermöglichen sie als Einzige einen echten Zugang zum Blattflächenindex. Sie ermöglichen eine getrennte Berechnung von Form, Größe und Anzahl der Blätter. Aufgrund dieser Tatsache dienen die direkten Methoden als Referenz für die Kalibrierung beziehungsweise Bewertung der indirekten Methoden. (Breda 2003:2404). Aufgrund ihres zerstörerischen Probenentnahme eignen sich die direkten Methodiken jedoch besser für kurzlebige Ökosysteme, wie landwirtschaftliche Kulturpflanzen, Grasland und Tundren (Fang et. al 2019:742). Die direkte Methodik erfordert intensive Messungen, um die räumliche Variabilität eines Standortes berücksichtigen zu können. Das macht die Methodik mühsam und beschränkt ihre Anwendung auf eine kleine Anzahl von Situationen (Baret et al., 2010:1993). Aufgrund ihres zeit- und arbeitsintensiven Charakters sind sie außerdem keine geeignete Methode für eine langfristige Überwachung der räumlichen und zeitlichen Dynamik der Blattflächenentwicklung. Die Notwendigkeit der Validierung der indirekten Methoden bleibt jedoch bestehen, so dass die direkte und semi-direkte Messung weiterhin als wichtige Kalibrierungsmethode angesehen werden kann (Jonckheere et al., 2004:20).

Indirekte Methoden leiten den Blattflächenindex aus Messungen der Strahlungsübertragung durch das Kronendach ab (Breda 2003:2405). Zu unterscheiden sind die Strahlungsmessung und das Lückenbruchverfahren (engl. gap fraction methods), die auf der Spaltfraktion basieren (Breda 2003:2405). Tatsächlich messen die indirekten Methoden den Blattflächenindex nicht, da alle Kronenelemente, welche die Strahlung abfangen, einbezogen werden. Daher sind die Terme des

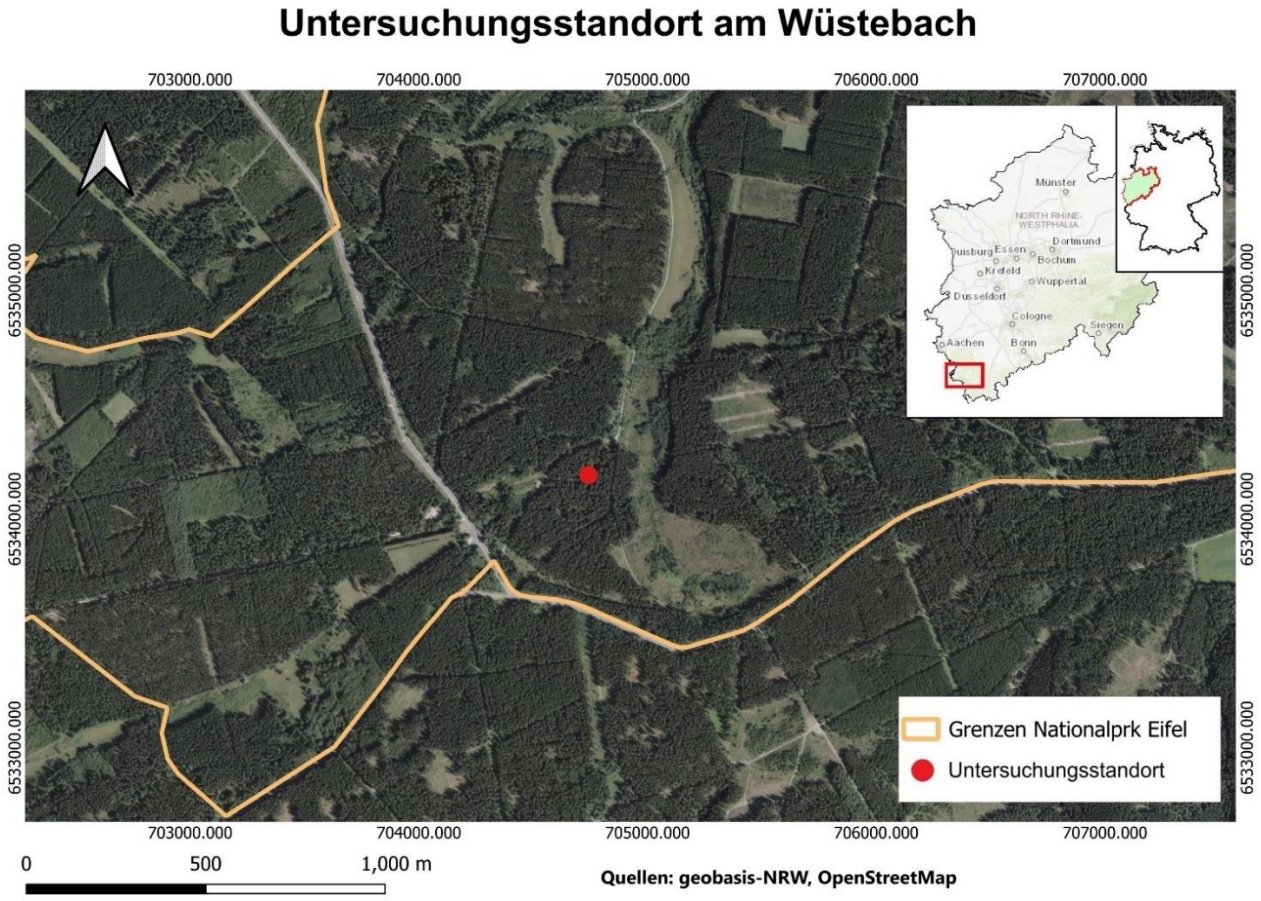
Pflanzenflächenindex (PAI) oder des Oberflächenindex (SAI) vorzuziehen, wenn keine Korrektur zu Entfernung von Ästen und Stängeln vorgenommen wird (Breda 2003:2405).

Die beiden indirekten Methoden die aktuell an ICOS Wald Messstandorten für die Messung des LAI angewendet werden sind die lineare Ceptrometrie und digitale hemisphärische Fotos (DHP) (ICOS 2021:6). Die Funktionsweise von Ceptometern basiert auf der Messung der einfallenden und transmittierten photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) (Ariza-Carricondo et al. 2019:69). Damit beruhen Ceptometer auf den gleichen physikalischen Eigenschaften wie die in dieser Arbeit angewendete Methodik. Eine detaillierte Erläuterung erfolgt in Abschnitt 3.2 „PAR-Messung“. Somit lässt sich das Ceptometer den strahlungsmessenden indirekten Methoden zuordnen. Die DHP hingegen erlauben die Schätzungen des LAI anhand der Messungen des Lückenanteils innerhalb des Kronendaches (Cescatti 2007:2). Eine detaillierte beschriebene der Methodik findet sich in Abschnitt 3.3.4 „Auswertung DHP“ Obwohl die Genauigkeit der indirekten Methoden auf Stichprobenbasis geringer ist als die direkten Messungen, werden diese häufig angewendet, da sie schneller sind und eine größere Stichprobengröße ermöglichen. Dies resultiert in einer höheren räumlichen Repräsentativität (Ariza-Carricondo et al. 2019:68).

2 Standort

Der Untersuchungsstandort befindet sich im Süden des Nordrein-Westfälischen Nationalparks Eifel (50°30′16″N, 6°19′50″E) im Wüstebach Wald, nahe der Deutsch-Belgischen Grenze und ist Teil des Netzwerks „TERrestial ENvironmental Observatories“ (TERENO) (Bogena et al., 2018:7). Das Waldstück befindet sich im Mittelgebirge Eifel und liegt auf einer Höhe von 600-620 m ü.d.M. Die nähere Umgebung ist in der Abbildung 1 zu sehen. Es ist zu erkennen, dass ein Großteil der Umgebung, sowie der Untersuchungsstandort selbst, von gepflanzten Fichtenmonokulturen geprägt ist. Die vorherrschenden Bodentypen am Untersuchungsstandort sind an den Berghängen und Kuppen Cambisole und in der Nähe des Wüstebachs haben sich Gleysole und Planosole entwickelt (Lehmkuhl et al. 2010:521).

Abb. 1: Karte der näheren Umgebung des Untersuchungsstandort aus DOP



Eigene Darstellung, Karte in der rechten Ecke stammt aus Schmidt 2020:2

2.1 Klimatische Bedingungen

Das Klima am Wüstebach ist durch ozeanische Einflüsse geprägt und ist dementsprechend mild und feucht. Dabei wird es durch die Westwindzone stark beeinflusst. Die mittlere jährliche Lufttemperatur beträgt weniger als 7°C und der mittlere Jahresniederschlag beträgt etwa 1200 mm (Havlik, 2002 in Lehmkuhl et al. 2010:521).

2.2 Vegetation

Die vorherrschende Vegetation ist eine 1946 gepflanzte Fichtenmonokultur (Gemeine Fichte, *Picea abies L.*) mit einer durchschnittlichen Baumhöhe von über 25m. Die Gesamtbaumdichte des Waldstückes liegt bei 370 Bäumen/ha (Etmann, 2009 in Reitz et al. 2023:2) Der Unterwuchs besteht hauptsächlich aus jungen Buchenpflanzungen (*Fagus sylvatica*), Farnen und verschiedenen Moosen (Reitz et al. 2023:2). Siehe Abbildung 2.

Abb. 2: Vegetation am Untersuchungsstandort

Eigene Aufnahme der Vegetation

2.3 Geschichte des Standortes

Bis Mitte des 19. Jahrhunderts war der nördliche Teil der Eifel und ihr Vorland eines der ersten Zentren der Eisenverhüttung und anderer Schwerindustrien, die große Mengen an Holzkohle verbrauchten. Aus diesem Grund wurden die Buchenwälder der Eifel abgeholzt und in Köhlereien zu Holzkohle verarbeitet. Dies führte zur weitgehenden Entwaldung der Eifel (Lehmkuhl et al. 2010:522,523). Unter preußischer Herrschaft wurden seit 1815 Fichtenmonokulturen gepflanzt, um das gerade und schnell wachsende Holz im Bergbau und Bauwesen zu nutzen (Lehmkuhl et al. 2010:522,523). In der Endphase des Zweiten Weltkrieges kam es in der Region im Zuge der Adennenoffensive (16.12. – 27.12.1944) zu schweren Gefechten, dessen Spuren noch heute an dem Untersuchungstandort zu finden sind. Nach dem Krieg wurden die wenigen verbliebenden Bäume abgeholzt. Anschließend wurde 1946 wieder eine Fichtenmonokultur gepflanzt, um die lokale Forstwirtschaft zu unterstützen (Lehmkuhl et al. 2010:522,523). Dieser Baumbestand ist heute am Wüstebachstandort zu finden.

Seit 2004 ist das Gebiet Teil des Nationalpark Eifel. Im Zuge des Waldumbaus hin zur einem Buchenwald (*Fagus sylvatica*) wurde unter dem bestehenden Fichtenbestand eine Unterpflanzung mit jungen Buchen an dem Untersuchung Standort vorgenommen. Im Rahmen dieser Maßnahmen werden auch vereinzelt Fichten entnommen. Durch diesen Umbau soll der Wandel hin zur potenziell natürlichen Vegetation beschleunigt werden. (Lennartz, Röös 2006:6-11,13,14)

3 Methodik

In dieser Arbeit wird der Blattflächenindex anhand von Messungen der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) berechnet. Dabei erfolgt die Berechnung des LAI aus den momentanen PAR-Messungen mittels eines Modells für den Strahlungstransport durch Baumkronen, welches auf der Beer-Lambert-Gleichung basiert (ICOS 2020:11). Die Beer-Lambert-Gleichung beschreibt die Abschwächung der Strahlung in einem homogenen trüben Medium. In einem solchen Medium wird der Strahlungsfluss proportional zum optischen Abstand absorbiert unter der Annahme einer zufälligen Verteilung der Blätter innerhalb des Kronendaches (Ariza-Carricondo et al. 2019:79). Die zur Berechnung des LAI herangezogene Gleichung erfordert neben den PAR-Werten die Berücksichtigung weiterer Parameter. Aus diesem Grund wurden zusätzlich digitale hemisphärische Fotografien angefertigt, aus denen weitere Parameter bestimmt werden konnten, die zum Lösen der Gleichung erforderlich waren. Die angewendete Methodik weist gegenüber anderen Methoden zur Berechnung des LAI eine Besonderheit auf, die in der Verwendung von fest installierten PAR-Sensoren besteht. Dies erlaubt die Generierung von Zeitreihen mit hoher Auflösung.

3.1 Gleichung

In dieser Gleichung wird der Blattflächenindex aus TAU (τ) unter Zuhilfenahme einer interaktiven Lösung berechnet. Dabei gibt der Transmissionskoeffizient TAU den Anteil der eingehenden photosynthetisch aktiven Strahlung an, der durch das Blätterdach übertragen wird. Die Gleichung zur Berechnung des LAI aus PAR ist in ICOS 2020:11:12 zu finden. Die einzelnen Parameter, die zum Lösen der Gleichungen zur Berechnung des LAI erforderlich sind, werden in nachfolgenden Abschnitten genauer behandelt. Die Gleichung zur Berechnung des LAI aus PAR lautet wie Folgt:

$$\tau = f_b\, exp[-K[1 - g_{dir}(1-a)]GAI] \ldots \quad \textit{direct} \quad (G.1)$$

$$+(1-f_b)\left(exp(-GAI_a) + A\, GAI_a^3 exp(-B\, GAI_a^C)\right) \quad \textit{diffuse}$$

where $GAI_a = GAI\left(1 - g_{dif}(1-a)\right)$ (G.2)

$$g_{dir} = exp(-1.5X)(-0.2 + 0.7\theta^2) + 0.2\theta^5 + 0.3 \quad (G.3)$$

$$g_{dif} = 0.5 \quad (G.4)$$

$$A = \frac{1}{0.15X^{1.38}+0.007} \quad (G.5)$$

$$B = 4.32 + 2.60exp(-2.75X) \quad (G.6)$$

$$C = 0.57 - 0.23exp(-1.40X) \quad (G.6)$$

Fbeam (f_b) gibt den Strahlanteil der einfallenden PAR an.

K ist der Extinktionskoeffizient

Das Blattabsorptionsvermögen für PAR wird mit dem Buchstaben a angegeben und stellt eineKonstante mit einem Wert von 0,85 dar.

Der Zenitwinkel der Sonne zum gemessenen Zeitpunkt wird mit dem Buchstaben Θ bezeichnet.

X ist ein Parameter für die Verteilung der Blattwinkel (ICOS 2020:11:12)

3.2 PAR-Messungen

Für die Messung der einfallenden photosynthetisch aktiven Strahlung wurden fest installierte PAR-Sensoren verwendet, die in Rahmen einer Forschungsarbeit im Jahr 2021 aufgestellt wurden. Insgesamt wurden 10 PAR-Sensoren auf dem Waldboden verteilt. Ein weitere PAR- Sensor wurde oberhalb der Baumkronen auf einem Turm in 38 m Höhe installiert (Reitz et al. 2023:4-5). Die PAR-Sensoren unter- und oberhalb der Baumkrone sind in Abbildung 3 zu sehen.

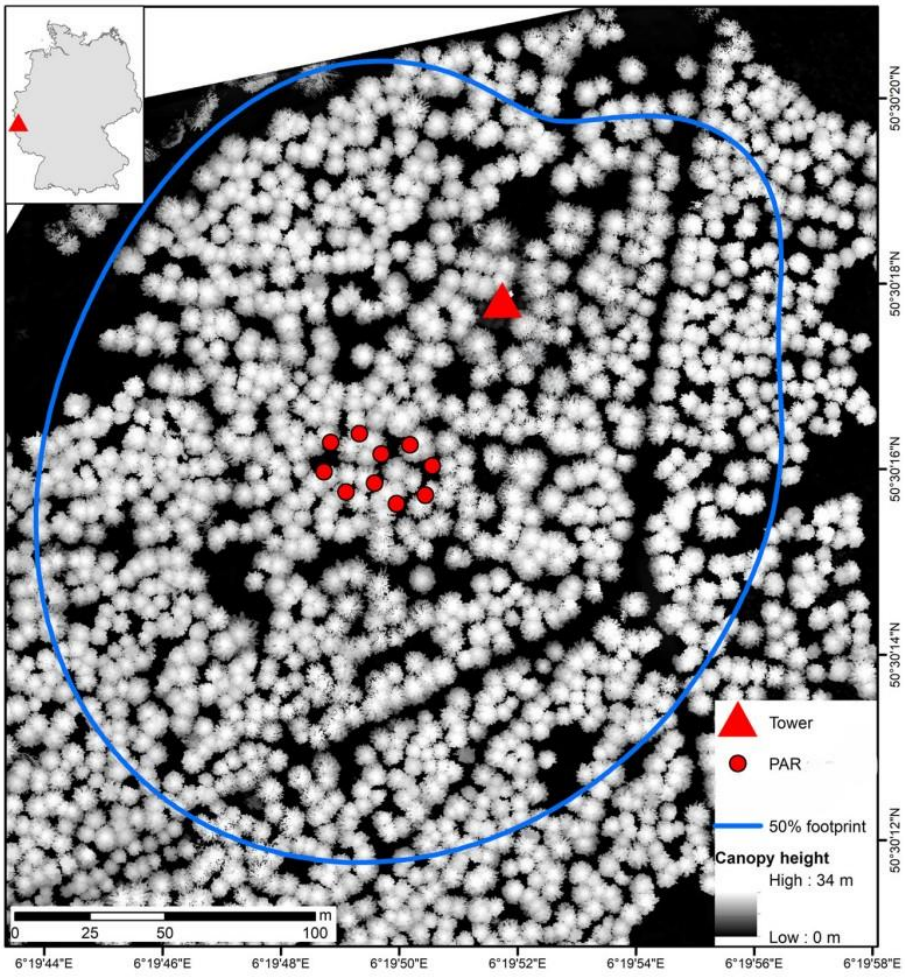
Abb.3: PAR-Sensoren unterhalb und oberhalb der Baumkrone

Eigene Aufnahmen der PAR-Sensoren

Im Rahmen der Suche nach einem adäquaten Standort für die PAR-Messungen wurden drei Kriterien definiert, welche als Grundlage für die Evaluierung der in Frage kommenden Standorte dienten. Es wurde festgelegt, dass der Standort innerhalb des Haupteinflussbereichs des CO_2-Flusses liegen sollte, welcher an der Turmspitze nach dem Eddy-Kovarianz-Verfahren gemessen wird. Als Kriterium wurde der 50-%-"Footprint" nach dem Modell von Meixner (2001) herangezogen. Außerdem war sicherzustellen, dass der Standort mindestens 80 Meter vom Waldrand entfernt war, um den Einfluss der seitlichen Strahlungsflüsse zu minimieren. Zudem musste der Standort hinsichtlich der Baumkronendichte repräsentativ für den allgemeinen Waldbestand sein (Reitz et al. 2023:4).

Auf der Grundlage dieser Kriterien wurde ein Messfeld 70 m südwestlich des Turmes als Standort für die PAR-Messungen ausgewählt (Reitz et al. 2023:4). Auf dem ausgewählten Messfeld wurden 10 PAR-Sensoren auf Stativen in 1,3 m Höhe angebracht und im Abstand von 10 m in zwei Sechsecken, die zusammen eine Acht ergeben angeordnet. Diese Anordnung wurde gewählt, um die Messfläche zu maximieren (Reitz et al. 2023:5). Siehe Abbildung4.

Abb.4: Visualisierung der Anordnung der PAR-Sensoren zum Messturm am Untersuchungsstandort Wüstebach. Die Baumkrone von Light Detection And Ranging (LiDAR) abgeleitete und nur zur Visualisierung verwendet (Reitz et al. 2023:3).

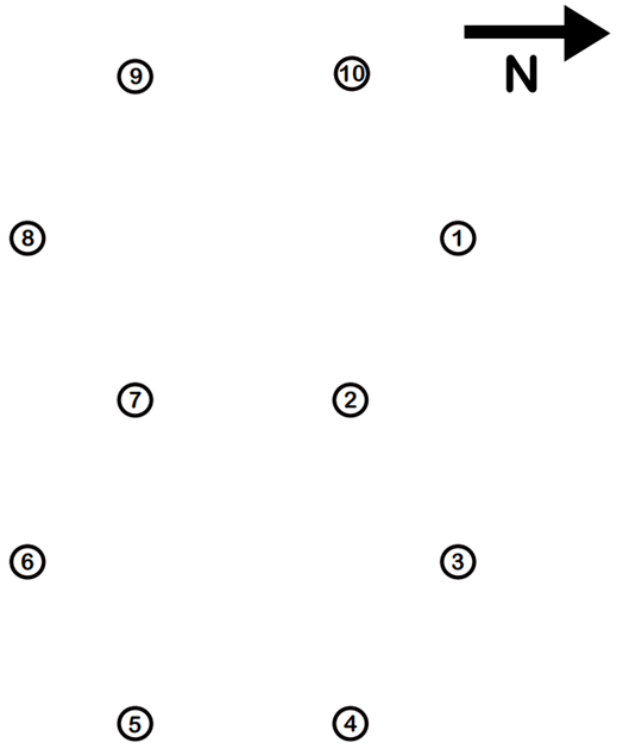


Die PAR-Messungen wurden im Abstand von 10 Minuten an allen 11 Messpunkten mit Vollspektrum-Quantensensoren (SQ-521-SS, Apogee Instruments, Logan, Utah, USA) aufgezeichnet, die den Photonenfluss im Spektralbereich von 389 bis 692 ± 5 nm messen (Reitz et al. 2023:4). Dabei ist es erforderlich, dass die Sensoren den PAR als Photosynthetic Photon Flux Density (PPFD; µmol m^{-2} s^{-1}) ausgeben, um sie für die Gleichung zur Berechnung des LAI zu verwenden zu können (ICOS 2020:4). Die kontinuierliche Messung der PAR ermöglichte die Erstellung hoch aufgelöster Zeitreihen am Untersuchungsstandort Wüstebach. Die erstellten Zeitreihen wurden zur Berechnung des LAI auf Ebene der Messpunkte herangezogen.

Es sei jedoch darauf verwiesen, dass die PAR-Sensoren der einzelnen Messpunkte Messfehler aufweisen. An den Messpunkten MP1 bis MP4 sowie MP6, MP8 und MP10 manifestierten sich in der Nacht leicht negative Werte, welche in der Regel über -0,5 µmol m^{-2} s^{-1} lagen. Die Messpunkte MP5, MP7 und MP9 hingegen wiesen unterschiedlich hohe positive Werte in der Nacht

auf, die in der Regel <(2,6 µmol m^{-2} s^{-1}, 55 µmol m^{-2} s^{-1} und 1,9 µmol m^{-2} s^{-1}) zu quantifizieren waren. Eine Korrektur der Messfehler war erforderlich, bevor die PAR-Werte weiterverarbeitet werden konnten. Das exakte Vorgehen ist in Abschnitt 4 „LAI-Berechnung" dargelegt. Die Nummerierung der PAR-Sensoren kann der nachfolgenden Abbildung 5 entnommen werden.

Abb.5: Nummerierung der Messpunkte



3.3 Parameter TAU

Der Parameter TAU, der für die Gleichung zur Berechnung des LAI benötigt wird, gibt den Anteil der eingehenden PAR an, die durch das Blätterdach übertragen wird (ICOS 2020:11). Die Berechnung von TAU erfolgt auf Basis der Messung von PAR, welche sowohl oberhalb als auch unterhalb der Baumkrone durchgeführt wurde.

Die Gleichung für TAU lautet wie folgt:

$$\tau = \frac{\mathrm{PAR_BC_IN}}{\mathrm{PAR_IN}}$$

Die Abkürzung "PAR_BC_IN" steht für die einfallende PAR, welche unterhalb der Baumkrone gemessen wurde. Der PAR_BC_IN wird durch den PAR_IN, welcher die einfallende PAR

oberhalb der Baumkrone angibt, geteilt. Es muss darauf geachtet werden, dass für die beiden Variablen "PAR_BC_IN" und "PAR_IN" jeweils Werte verwendet werden, die zum selben Zeitpunkt gemessen wurden.

3.4 Digitale Hemisphärische Fotografie

Digitale Hemisphärische Fotos (DHP), die auch als Fischaugenbilder bezeichnet werden, sind ein effektives und kostengünstiges Werkzeug, um die Architektur und das Strahlungsregime von Baumkronen quantitativ zu beschreiben (Cescatti 2007:1). DHP ermöglichen Schätzungen der Baumkroneneigenschaften anhand der Messungen des Lückenanteils innerhalb des Konen Daches (Cescatti 2007:2). Der Lückenanteil wird definiert als die Wahrscheinlichkeit, dass ein Lichtstrahl das Kronendach durchdringt, ohne dabei auf ein Pflanzenelement zu treffen (Weiss et al. 2004:38). Die DHP-Aufnahmen eignen sich zur Ermittlung der Blattwinkelverteilung des Kronendaches (Zhang et al. 2005:167). Des Weiteren erlaubt die Analyse der DHP-Aufnahmen die Bestimmung des Clumping Faktor der Baumkrone (Leblanc et al. 2005:205). Der Clumping Faktor gibt die räumliche Verteilung des Laubs innerhalb der Baumkrone an (Fang 2021:1). Die beiden Parameter Blattwinkelverteilung und Clumping Faktor werden für die Gleichung zur Berechnung des LAI aus der photosynthetisch aktiven Strahlung benötigt. Aus diesem Grund wurden im Rahmen dieser Arbeit die DHP-Aufnahmen angefertigt. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, DHP-Aufnahmen zur Bestimmung des LAI heranzuziehen. Dies ist möglich, sofern der maximale saisonale LAI einen Wert von unter 6 aufweist (ICOS 2021:13).

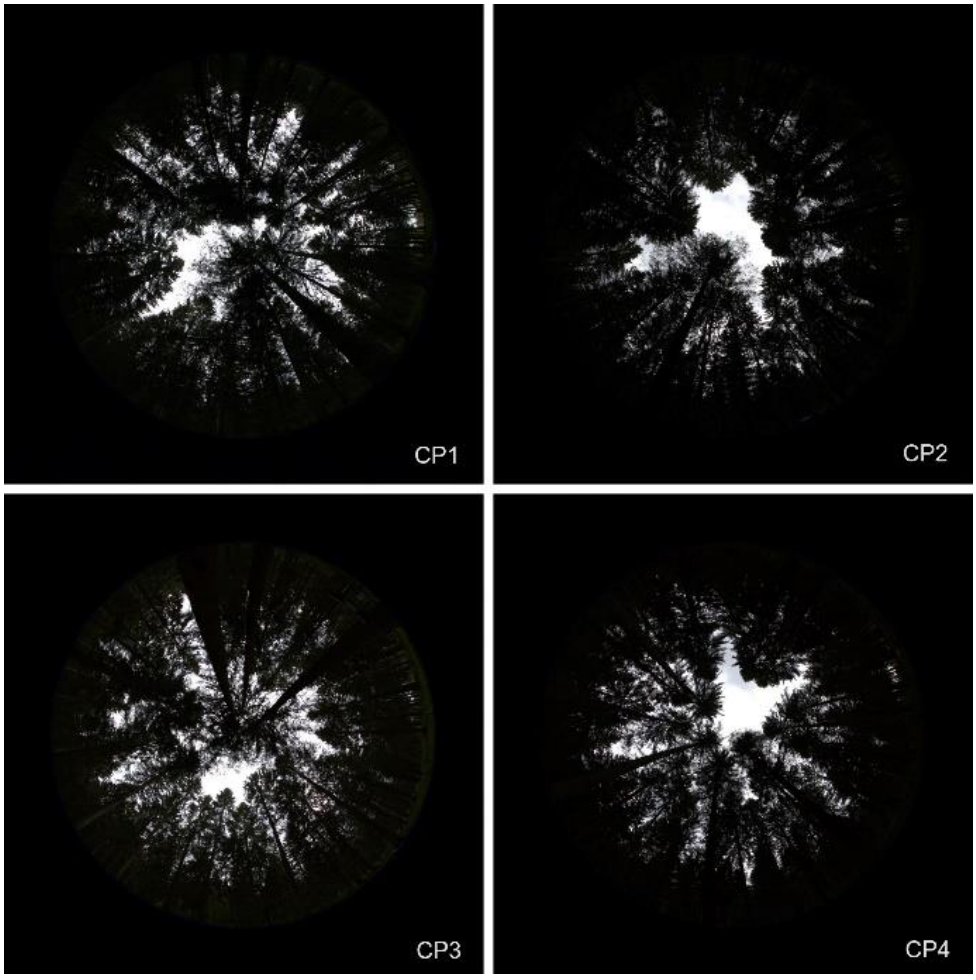
3.4.1 Wetterbedingungen für DHP

DHP können nur unter bestimmten Wetterbedingungen erstellt werden, denn direktes Sonnenlicht würde bei der Auswertung der Bilder die Ergebnisse verfälschen. Das liegt daran, dass die Sonnenstrahlen auf den DHP als helle Pixel erscheinen und bei der Auswertung fälschlicherweise als Himmel klassifiziert werden (ICOS 2021:13). Für die Aufnahme qualitativ hochwertiger DHP ist daher diffuses Licht ideal (ICOS 2021:13). Die optimalen diffusen Lichtbedingungen für die DHP herrschen bei vollständig Wolken bedecktem Himmel (ICOS 2021:13). Regenwetter sollte vermieden werden, denn Regentropfen, die auf die Linse fallen, können zu unscharfen Bildern führen (ICOS 2021:16). Ebenso ist darauf zu achten, dass kein starker Wind auftritt, da Bewegungen in der Baumkrone ebenfalls zu unscharfen Bildern führen können (ICOS 2021:16).

3.4.2 Messpunkte DHP

Aufgrund dessen, dass das Ziel der DHP-Aufnahmen die Gewinnung der beiden Parameter Blattwinkelverteilung und Clumping Faktor für die Berechnung des LAI aus der photosythetischen aktiven Strahlung war, wurden die DHP-Aufnahmen an den 10 Messpunkten aufgenommen, an denen bereits die fest installierten PAR-Sensoren stehen. So liefern die DHP-Aufnahmen die Daten zur Blattwinkelverteilung und zum Clumping Faktor, welche die LAI-Werte an dem dazugehörigen Messpunkt beeinflussen. In der vorliegenden Abbildung 6 sind die aufgenommenen DHP der Messpunkte 1-4 zu sehen

Abb.6: DHP-Aufnahmen der Messpunkte 1 bis 4



Die Aufnahmen für die Messpunkte 5 bis 10 sind im Anhang der Abbildung 7 zu entnehmen.

3.4.3 Material und Kameraeinstellungen

Die DHP wurden mit einer Spiegelreflexkamera des Typs Nikon D7100 aufgenommen. Als Objektiv kam das Sigma 4,5 mm Circular Fisheye zum Einsatz, das Aufnahmen mit einem Blickwinkel von 180° ermöglicht. Die Kameraeinstellungen wurden ICOS 2021:18-19 entnommen. Die

Kamera wurde auf das RAW-Format sowie den Modus Landschaftsbilder eingestellt. Des Weiteren wurde der Autofokus aktiviert und die Blende auf F8 fixiert. Um Verwacklungen der Bilder beim Auslösen zu vermeiden, wurde die Funktion „time delay“ verwendet. Diese Funktion ermöglicht eine zeitverzögerte Auslösung, wodurch die Stabilität der Kamera während der Aufnahme erhöht wird. Um eine adäquate Belichtung der Bilder zu erreichen wurden ISO-Wert zwischen 200 und 1000 verwendet in Kombination mit einer Verschlusszeit der Blende von 1/30 Sekunde und kürzer gewählt. Zudem wurde die Option "Highlights" aktiviert, um eine eventuelle Überbelichtung der im Gelände aufgenommenen DHP bereits vor Ort visuell erfassbar zu machen. Überbelichtete Pixel werden auf dem Bildschirm der Kamera blinkend dargestellt (ICOS 2021:18).

Für jeden Messpunkt wurden mehrere DHP aufgenommen und zu einem späteren Zeitpunkt anhand ihrer Belichtung ausgewählt. Die Einstellungen der Kamera hinsichtlich der Belichtung beeinflussen die Schätzung der Lichtdurchlässigkeit sowie des LAI und stellen nachweislich eine der Hauptursachen für Messfehler dar. Daher ist die flexible Einstellung einer geeigneten fotografischen Belichtung von entscheidender Bedeutung, um den Blattflächenindex und den Lückenanteil anhand digitaler hemisphärischer Fotografien korrekt bestimmen zu können (Zhang et al. 2005:167).

Die Kamera wurde an den 10 vorhandenen Messpunkten der PAR-Sensoren in einer Höhe von 1,3 Metern auf einem Stativ montiert und in Richtung Himmel ausgerichtet. Des Weiteren ist die Kamera mit Hilfe eines Kompasses so ausgerichtet worden, dass ihre Oberseite in Richtung des magnetischen Nordens zeigt. Um eine exakte horizontale Ausrichtung zu gewährleisten, wurde eine 3D-Wasserwaage an der Kamera befestigt. Dadurch konnte sichergestellt werden, dass das Objektiv senkrecht nach oben wies. Das Gefälle des Standortes wurde nachträglich in den aufgenommenen Bildern korrigiert. Hierfür wurde die Neigung des Geländes mit Hilfe eines Inclinometers ermittelt. Der Aufbau und die Materialien der DHP-Aufnahmen sind in Abbildung 8 zu sehen

Abb.8: Aufbau und Materialien der DHP-Aufnahmen

Eigene Aufnahmen des DHP-Messaufbaus

3.4.4 Auswertung DHP

Die an den zehn Messpunkten aufgenommenen und ausgewählten DHP wurden gemäß den Richtlinien von ICOS 2021:33 benannt und an ICOS übermittelt. Die übermittelten Daten wurden mit der HemiTool-Software analysiert, welche als Standardverarbeitungsprogramm für digitale hemisphärische Fotos an sämtlichen Ökosystemstationen der ICOS-Forschungsgruppe eingesetzt wird (Ariza-Carricondo et al. 2019:70).

Mit Hilfe des invertierten Poisson-Modell, welchen in der HemiTool-Software implementiert ist, kann der LAI aus der Menge und der Verteilung der Vegetationspixel aus den DHP abgeleitet werden (Ariza-Carricondo et al. 2019:70). Dafür werden die DHP in der HemiTool-Software zunächst mit Hilfe des Ridler-Calvard-Schwellenwertalgorithmus in binäre Schwarz-Weiß-Bilder umgewandelt (Ariza-Carricondo et al. 2019:70). Anschließend wird der Lückenanteil der Baumkrone anhand der binären Schwarz-Weiß-Bilder geschätzt und der LAI durch Inversion des Poisson-Modells, wie von Thimonier et al. 2010 beschrieben, unter Berücksichtigung der Verklumpung berechnet.

Aufgrund der Miteinbeziehung der lichtblockierenden nicht-blättrigen und nicht-grünen Elemente bei der Lückenanteilsanalyse, kommt es zu einer Überschätzung des LAI. Die Lückenanteilsanalyse liefert so gesehen ein Ergebnis für den PAI (Ariza-Carricondo et al. 2019:79). Um aus dem PAI den LAI zu erhalten, wurde nach (Chen 1997) ein Korrekturfaktor für holzige Elemente eingeführt.

Im Anschluss an die Analyse der DHP erfolgte eine Evaluierung der Bilder anhand diverser Kriterien, um deren Brauchbarkeit zu beurteilen. Im Rahmen der Qualitätskontrolle wurden die DHP unter anderem auf das Vorhandensein fremder Objekte, sowie auf eine mögliche Überbelichtung überprüft. Die korrekte Belichtung stellt den entscheidenden Faktor bei der Aufnahme digitaler halbkugelförmiger Fotos dar, da sie eine präzise Schätzung des LAI ermöglicht (Zhang et al. 2005:166). Im Verlauf der Qualitätskontrolle wurden an jedem Messstandort zwei bis vier geeignete DHP identifiziert.

Des Weiteren wurden durch die DHP-Analyse Ergebnisse für die beiden Parameter Clumping-Faktor und ALIA (Blattwinkelverteilung) geliefert. Diese wiederum werden für die Gleichung zur Berechnung des LAI mit Hilfe der photosynthetisch aktiven Strahlung benötigt.

3.5 Parameter Clumping Faktor

Bei einer Vielzahl von Modellen, die zur Berechnung des LAI für indirekte Methoden herangezogen werden, darunter auch das Poisson-Modell, wird vorausgesetzt, dass die Belaubung innerhalb des Kronendachs zufällig verteilt ist. Diese Annahme steht jedoch im Widerspruch zur tatsächlichen, aufgrund der Vegetationsstruktur nicht zufälligen Verteilung der Belaubung des Kronendachs (Weiss et al. 2004:43). In einer Reihe von wissenschaftlichen Untersuchungen wurde der mit indirekten Methoden ermittelte LAI mit direkten LAI-Schätzungen verglichen. Die Mehrzahl dieser Arbeiten gelang zu dem Schluss, dass indirekte Methoden den LAI im Vergleich zur direkten Messung unterschätzen. Es besteht heute weitgehende Übereinstimmung darüber, dass ein Grund für die Unterschätzung die nicht zufällige Verteilung der Blattelemente innerhalb des Kronendachs ist. Zur Korrektur dieses Messfehlers wird der Clumping Faktor herangezogen (Breda 2003:2409-2410).

Der Clumping Faktor beschreibt dabei, wie weit sich die reale Blattverteilung von der Annahme der zufälligen Verteilung unterscheidet (Ariza-Carricondo et al. 2019:68). Somit beschreibt er die räumliche Verteilung von Blättern und Nadeln innerhalb eines Vegetationsdaches. Er ist einen wesentlichen Parameter zur Quantifizierung des Strahlungstransfers im Kronendach. Die Berücksichtigung des Clumping Faktor ist für die korrekte Schätzung des LAI mit dem indirekten

optischen Ansatz von essenzieller Bedeutung. Daraus resultiert, dass der Clumping Faktor ein Schlüsselparameter bei der Schätzung des Blattflächenindex ist (Fang 2021:1).

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Clumping Faktor separat für alle zehn Messpunkte durch die Analyse der jeweils vorliegenden DHP ermittelt. Der Mittelwert des Clumping Faktors wurde aus den für den jeweiligen Messpunkt vorliegenden DHP berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 zu sehen. In Anbetracht der Tatsache, dass der Clumping Faktor im Jahresverlauf eine hohe Konstanz aufweist (vgl. Chen 1995:135), können die in Tabelle 2 berechneten Werte für alle LAI-Berechnungen, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden, herangezogen werden.

Tabelle 2: Clumping-Faktor Mittelwerte der einzelnen Messpunkte

Messpunkt	MP1	MP2	MP3	MP4	MP5	MP6	MP7	MP8	MP9	MP10
Clumping-Faktor	0.89	0.92	0.94	0.93	0.95	0.95	0.95	0.98	0.94	0.94

3.6 Parameter ALIA

Der Parameter ALIA beschreibt die Blattwinkelverteilung innerhalb des Kronendaches, wobei die Blattwinkelverteilung großen Einfluss auf die Lichtdurchlässigkeit des Kronendaches hat (Jonckheere 2006:179-180). Die Blattwinkelverteilung ist damit für die genau Bestimmung des LAI aus Messungen der photosynthetisch aktiven Strahlung von hoher Bedeutung. Der Parameter ALIA der in der Gleichung zur Berechnung des LAI mit X angegeben wird konnte aus den an den Messpunkten aufgenommenen DHP abgeleitet werden (ICOS 2020:12). Dies basiert auf der Beziehung zwischen Lichtdurchlässigkeit und Blattwinkelverteilung, die mittels des Beerschen Gesetzes unter der Annahme einer zufälligen Blattverteilung modelliert werden kann (Yan et al. 2021:1-2).

Diese Methode liefert den statistischen Durchschnitt der Blattneigungswinkel, wobei die Genauigkeit durch unregelmäßige Blattverteilungen und variierende Lichtverhältnisse beeinflusst wird (Yan et al. 2021:2). Die mittlere Blattwinkelverteilung, welche aus den erfassten DHP abgeleitet werden konnte, ist für die einzelnen Messpunkte in der nachfolgenden Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: ALIA-Mittelwerte der einzelnen Messpunkte

Messpunkt	MP1	MP2	MP3	MP4	MP5	MP6	MP7	MP8	MP9	MP10
ALIA	44.5°	59.1°	41.7°	59.6°	55.1°	55.1°	50.5°	49.7°	49.4°	53.5°

3.7 Parameter Fbeam

Mit dem Parameter Fbeam wird der Strahlungsanteil der einfallenden kurzwelligen Strahlung beschrieben (ICOS 2020:12). Die Gleichung, die zur Berechnung von Fbeam verwendet wird, lautet wie folgt:

$$f_b = \frac{KW - KD}{KW}$$

KW steht für kurzwellige Strahlung und KD für kurzwellige diffuse Strahlung.

Die Messungen der kurzwelligen Strahlung und kurzwelligen diffusen Strahlung wurden mit fest installierten Sensoren auf dem Messturm aufgezeichnet. Die verwendeten Daten stammen aus Druee, Graf 2024. Die kurzwellige und kurzwellige diffuse Strahlung wurde kontinuierlich gemessen, sodass für jeden berechneten TAU-Wert der zeitlich zugehörige Fbeam-Wert berechnet wurde.

3.8 Parameter Zenit

Der Parameter Zenit beschreibt die Position der Sonne relativ zu einem Standort auf der Erde. Der Zenitwinkel gibt die Höhe der Sonne am Himmel an. Der Zenitwinkel ist dabei abhängig von der geografischen Breite, der Sonnendeklination und der Tageszeit. Mit der folgenden Formel kann der Zenitwinkel eines Standortes zu einem bestimmten Zeitpunkt berechnet werden:

$$cos(Z) = sin(\phi) \cdot sin(\delta) + cos(\phi) \cdot cos(\delta) \cdot cos(H)$$

Die geografische Breite des Standortes wird durch Φ angegeben. δ gibt die Sonnendeklination an und H steht für den Zeitpunkt relativ zum lokalen Sonnenhöchststand (Reda, Andreas 2004:577-589). Auf der Grundlage dieser Formel wurde ein MATLAB-Skript geschrieben, welches den Zenitwinkel für den Untersuchungsstandort in 10 Minuten-Intervallen ausgibt. So konnte sichergestellt werden, dass für jede PAR-Messung der zeitlich passende Zenitwinkel berechnet wurde.

3.9 Parameter ABSORB

Der Parameter ABSORB beschreibt das Absorptionsvermögen der Blätter für die photosynthetisch aktiven Strahlung. Dabei wird das Blattabsorptionsvermögen für PAR in der verwendeten Gleichung mit dem Buchstaben a angegeben und stellt eine Konstante mit einem Wert von 0,85 dar (ICOS 2020:12).

4 LAI-Schätzung

Im Vorfeld der Berechnung des LAI wurden die einzelnen Parameter der Gleichung aus Abschnitt 3.1 „Gleichung“ in einer vorgegebenen Reihenfolge in einer Excel-Datei zusammengeführt. Bei der Datenverarbeitung wurde darauf geachtet, dass die erfassten Zeitpunkte der einzelnen Parameter übereinstimmen. Die in Abschnitt 3.2 „PAR-Messung“ dargelegten Messfehler der verwendeten PAR-Sensoren wurden vor der weiteren Verarbeitung zum Parameter TAU korrigiert. Zu diesem Zweck wurden an den Messpunkten MP1 bis MP4 sowie MP6, MP8 und MP10 die negativen Werte für PAR gleich null gesetzt. An den Messpunkten (MP5, MP7 und MP9) wurde eine Korrektur der Werte vorgenommen, indem Schwellenwerte definiert wurden. Waren die erfassten PAR-Werte geringer als der definierte Schwellenwert, wurden sie mit dem Wert null gleichgesetzt. Die definierten Schwellenwerte betrugen für MP5 2,6 µmol m^{-2} s^{-1}, für MP7 40-55 µmol m^{-2} s^{-1} und für MP9 1,9 µmol m^{-2} s^{-1}. Im Rahmen der Berechnung des Jahresgangs wurde der Messpunkt MP7 nicht berücksichtigt. Aufgrund der signifikanten und inkonstanten Messungenauigkeit des Sensors konnte eine Berichtigung mit dem zuvor definierten Schwellenwert für die größeren Datenmengen nicht zufriedenstellend durchgeführt werden.

Zur Berechnung des LAI wurde ein MATLAB Code zu Verfügung gestellt, welcher die Gleichungen aus Abschnitt 3.1 „Gleichung“ implementiert. Damit der gegebene Code die zuvor entstandene Excel-Datei auslassen konnte, wurde er um diese Möglichkeit ergänzt. Des Weiteren wurde der Code dahingehend erweitert, dass die entstanden LAI-Ergebnisse wieder in einer .xlsx-Datei ausgegeben wurden.

4.1 Vergleich LAI Werte aus Berechnung und DHP

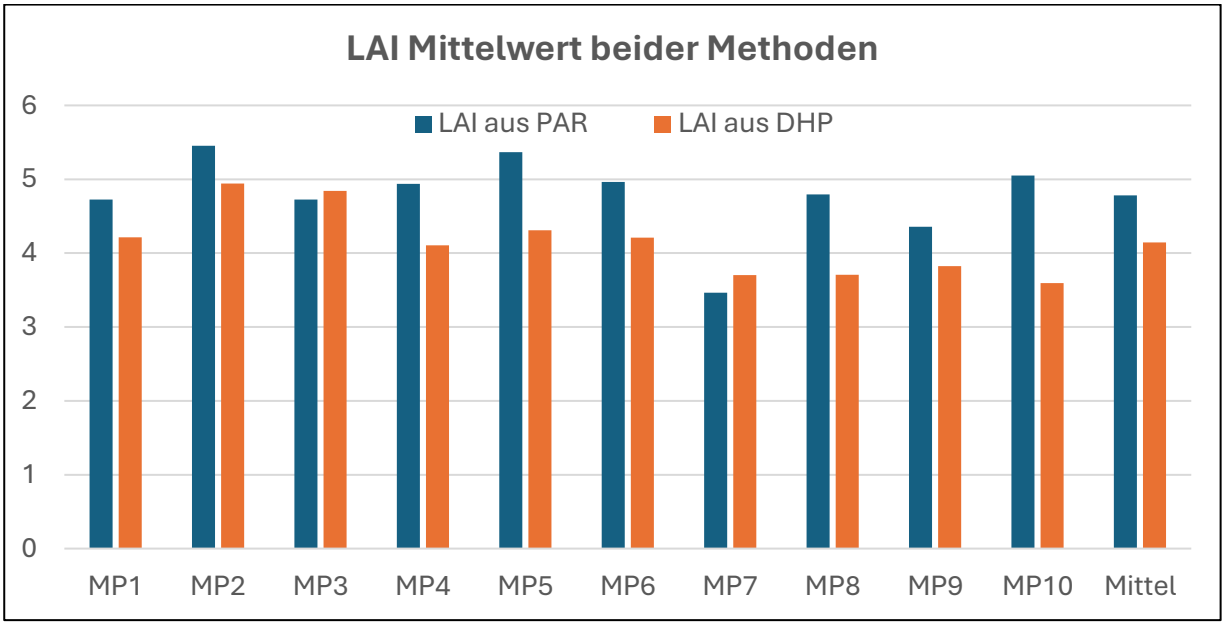
Im Rahmen dieser Arbeit wurde der LAI mit Hilfe zweier unterschiedlicher Methoden berechnet. Zum einen aus der photosynthetisch aktiven Strahlung mit Hilfe der Gleichung aus Abschnitt 3.1 „Gleichung“ Und zum anderen aus Digitale Hemisphärische Fotos. Im Folgenden erfolgt ein Vergleich der LAI-Werte, welche aus den zuvor erläuterten Methoden resultieren. Dieser Vergleich zielt darauf ab, die Aussagekraft der aus der PAR-Methodik berechneten LAI-Werte zu evaluieren. Dies ist möglich, denn DHP sind ein gängiges Mittel zur Messung des LAI (Zhang et al. 2005:167)

Um die beiden Methoden miteinander zu vergleichen, wurden die LAI-Werte für beide Methoden am selben Tag berechnet. Diese Maßnahme zielt darauf ab, möglichst vergleichbare Voraussetzungen zu schaffen. Aufgrund dessen, dass die DHP-Aufnahmen am 23.04.2024 durchgeführt wurden wurde dieses Datum als Referenzdatum ausgewählt. Infolgedessen, dass die DHP-Aufnahmen, wie in Abschnitt 3.4.2 „Messpunkte DHP“ beschrieben direkt an den vorhandenen PAR-

Sensoren in dem Zeitraum von 11 bis 17 Uhr an dem 23.04.2024 aufgenommen wurden, kann dieser Zeitraum nicht für den Vergleich der LAI werte herangezogen werden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Aktivitäten im Umfeld der PAR-Sensoren einen Einfluss auf die erfassten Strahlungswerte ausüben könnten. Aus diesem Grund wurden die Zeiträume von 10 -11 Uhr und von 17-18 Uhr am 23.04.2024 als Referenz zur Berechnung der LAI-Werte aus PAR herangezogen. Dass die LAI-Werte trotz der unterschiedlichen Tageszeit miteinander verglichen werden können, beruht auf der Hypothese, dass sich der reale LAI-Wert an diesem Standort im Tagesverlauf nur unerheblich verändert.

In der Abbildung 9 wurden für alle zehn Messpunkte die LAI-Werte aus beiden Methoden gegenübergestellt. Zu diesem Zweck wurden aus sämtlichen für den 23.04.2024 aus der jeweiligen Methode vorliegenden LAI-Werte für jeden Messpunkt ein Mittelwert gebildet.

Abb.9: Vergleich der Mittelwerte der LAI-Ergebnisse der PAR-Methodik und DHP-Methodik für die Einzelnen Messpunkte am 23.04.2024

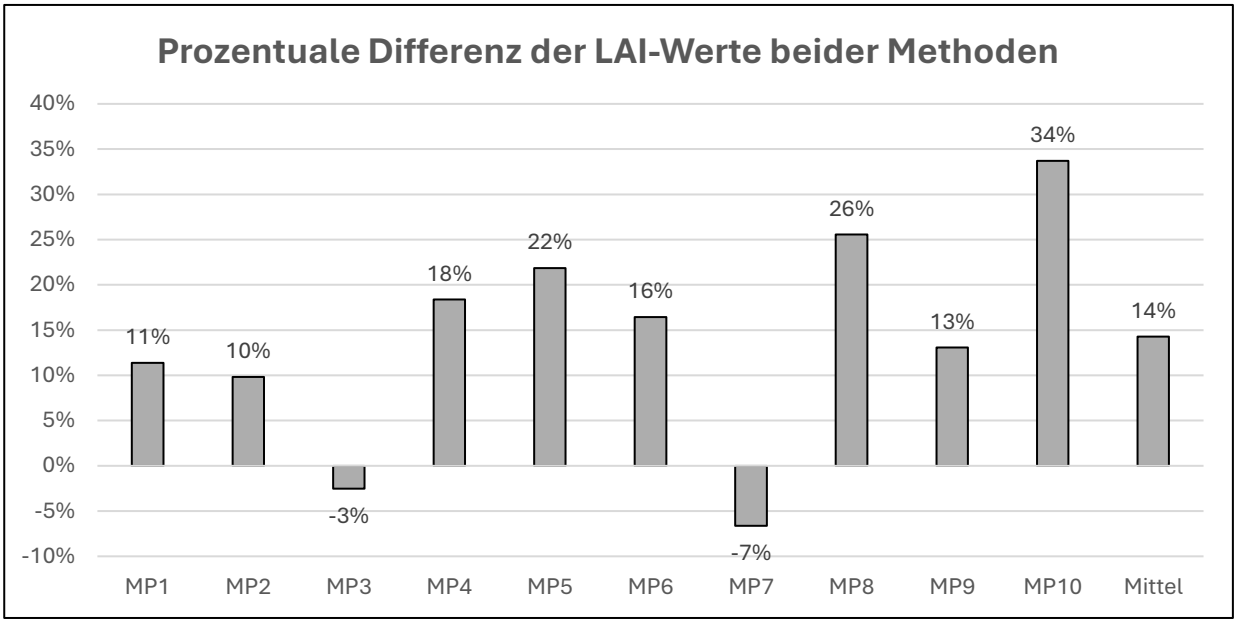


Die durchschnittlichen LAI-Werte, die mittels der PAR-Methode ermittelt wurden, liegen an acht von zehn Messpunkten über den mit der DHP-Methode erfassten Werten. Lediglich an den Messpunkten MP3 und MP7 wurden höhere mittlere LAI-Werte für die DHP-Methode ermittelt. Die Auswertung der Messpunkte ergibt einen über alle Messpunkte gemittelten LAI von 4,78 für die PAR-Methode und von 4,15 für die DHP-Methode für den 23.04.2024.

Die dargestellten Ergebnisse legen zunächst den Schluss nahe, dass die PAR-Methode im Vergleich zur DHP-Methode für den gleichen Standort zu höheren LAI-Werten führt. Die Abbildung 10 zeigt die prozentuale Differenz der LAI-Werte, die mit Hilfe der PAR- und DHP-Methode

ermittelt wurden. Die Berechnung der Differenz wurde durchgeführt, indem die LAI-Werte aus den DHP von den LAI-Werten aus PAR-Methodik subtrahiert wurden. Die prozentuale Differenz wird für jeden Messpunkt sowie im Mittel als Balkendiagramm dargestellt.

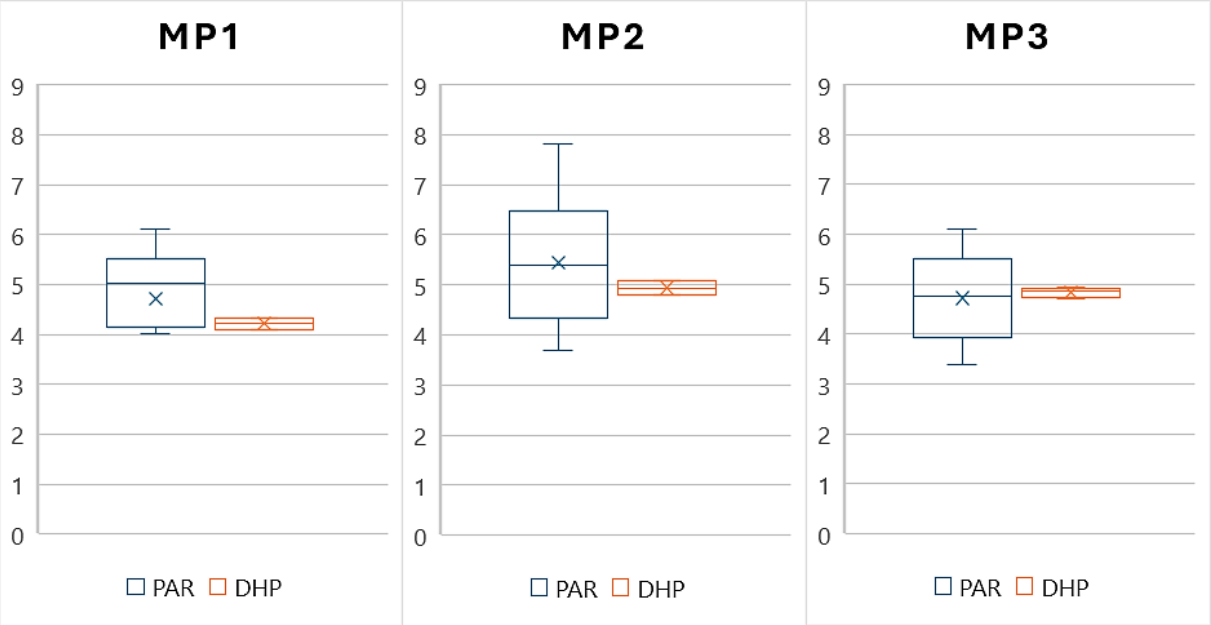
Abb.10: Prozentuale Differenz der LAI-Werte der DHP- und PAR-Methodik des 23.04.2024



Die Differenzen variieren erheblich zwischen den Messpunkten. Die größten prozentualen Differenzen sind bei den Messpunkten MP10, MP8 und MP5 zu verzeichnen (34%, 26% und 22%). Demgegenüber weist MP3 mit einer Differenz von -3% den geringsten Abstand für den gemessenen Mittelwert der beiden Methoden auf. Im Durschnitt sind LAI-Werte, die mit der PAR-Methode gemessen wurden, um 14% höher als die LAI-Werte, die sich aus der DHP-Methodik ergeben. Daraus resultiert, dass sich durchaus signifikante Unterschiede zwischen den Ergebnissen dieser beiden Methoden für die betrachteten Zeiträume am 23.04.2024 ergeben.

Im Folgenden wurden die Daten einer detaillierten Analyse unterzogen, um mögliche Ursachen für die Diskrepanzen zwischen den Resultaten der beiden Methoden zu identifizieren. Die Abbildung 11 zeigt ein Boxplot-Diagramm, in welchem die einzelnen LAI-Werte der PAR- und DHP-Methodik für den 23.04.24 gegenübergestellt wurden. Diese Gegenüberstellung wurde für alle zehn Messpunkte durchgeführt.

Abb.11: Boxplot-Diagramme der Ergebnisse der PAR- und DHP-Methodik für die Messpunkte 1-3 am 23.04.2024



Die Boxplot-Diagramme für die Messpunkte 4-10 können dem Anhang der Abbildung 12 entnommen werden. In der Abbildung steht PAR und DHP jeweils für die LAI-Werte, die aus der PAR- und DHP-Methodik berechnet wurden.

Es ist zu erkennen, dass die LAI-Werte, die aus der PAR-Methodik stammen eine signifikante Streuung aufweisen. Dabei tritt die größte Varianz der LAI-Werte an den Messpunkten MP2, MP4 und MP10 auf. Dort liegt die Differenz zwischen dem größten und kleinsten gemessenen LAI-Wert bei 4.13, 3.79 und 3.97. An dem Messpunkt MP1 wurde mit 2.09 die geringste, aber dennoch erhebliche Streuung gemessen. Die LAI-Werte, die aus den DHP berechnet wurden, zeigen dagegen eine deutlich geringere Streuung. Dies könnte aber auch daran liegen, dass für die DHP-Methodik ein kleinerer Datensatz verwendet wurde. Für den Messpunkt MP7 wurden zwei LAI-Werte aus den DHP berechnet, Für die Messpunkte MP1, MP2, MP8, MP9 und MP10 waren es drei und für die Messpunkte MP3, MP4, MP5 und MP6 waren es vier.

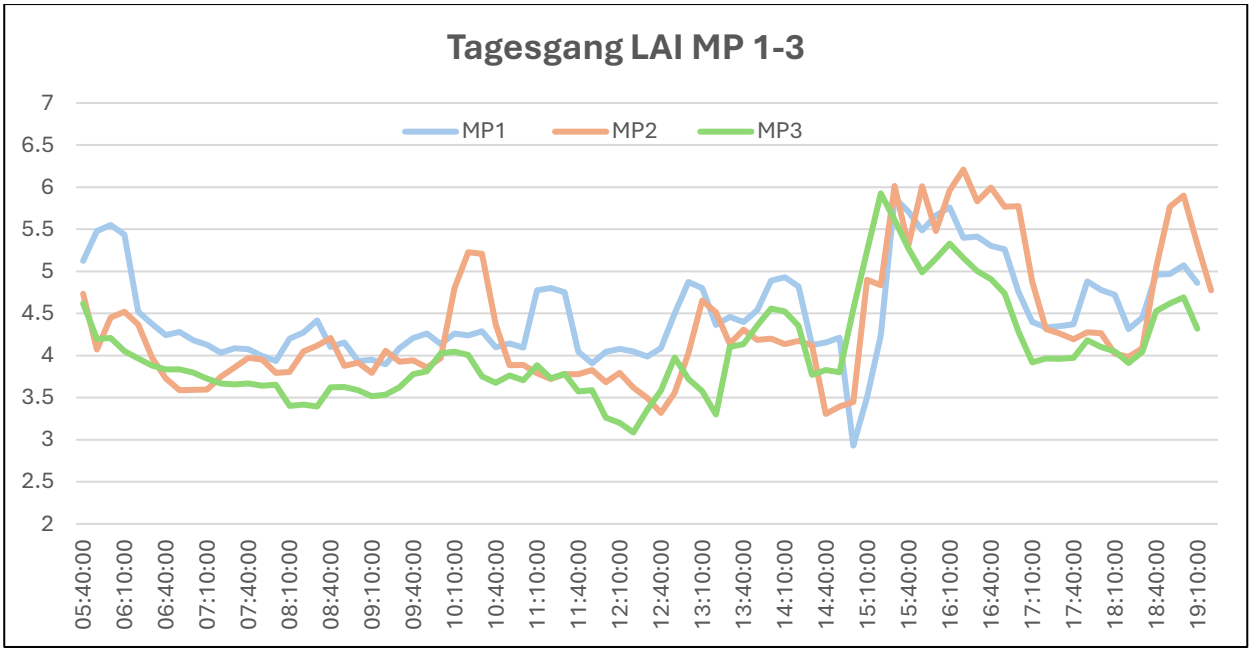
Dagegen wurden für alle Messpunkte bei der PAR-Methodik 14 verschiedene LAI-Werte für die Abbildungen 11 und 12 verwendet. Diese signifikante Streuung bei den LAI-Werten, die mit Hilfe der PAR-Methodik berechnet werden, lässt darauf schließen, dass für genauere Ermittlung des LAI große Datenmengen analysiert, werden sollten. Denn so kann durch Bildung des Mittelwertes die Streuung der einzelnen LAI-Werte ausgeglichen werden. Die Resultate werfen zudem die Frage auf, welche Faktoren für die signifikante Streuung der LAI-Werte verantwortlich sind, die mittels der PAR-Methode berechnet wurden.

4.2 Tagesgang LAI

Die im vorherigen Abschnitt aufgestellte Hypothese, dass sich der reale LAI-Wert an diesem Standort im Tagesverlauf nur unerheblich verändert, soll im Folgenden darauf überprüft werden, ob diese Hypothese auch für den Tagesgang der aus der PAR-Methodik berechneten LAI-Werte gilt. Zu diesem Zweck wird der Tagesgang der LAI-Werte für den 24.04.2024 berechnet. Die Auswahl dieses Datums erfolgte vor dem Hintergrund der zeitlichen Nähe zum 23.04.2024, dem Tag der Durchführung der DHP-Aufnahmen, wodurch eine Aktualität der Parameter "Clumping-Faktor" und "ALIA" gewährleistet ist.

Im Zuge diese Überprüfung wurde der LAI-Tagesgang des 24.04.2024 zunächst mit Hilfe der Gleichung zur Berechnung des LAI aus der photosynthetisch aktiven Strahlung für jeden der 10 Messpunkte separat ermittelt. Die Ergebnisse sind für die Messpunkte MP1-3 in der Abbildung 13 grafisch dargestellt. Die Abbildung 14 für die Messpunkte MP4-10 können dem Anhang entnommen werden.

Abb.13: LAI-Tagesgang des 24.4.24 für die Messpunkte 1-3 aus Berechnung der photosynthetisch aktiven Strahlung



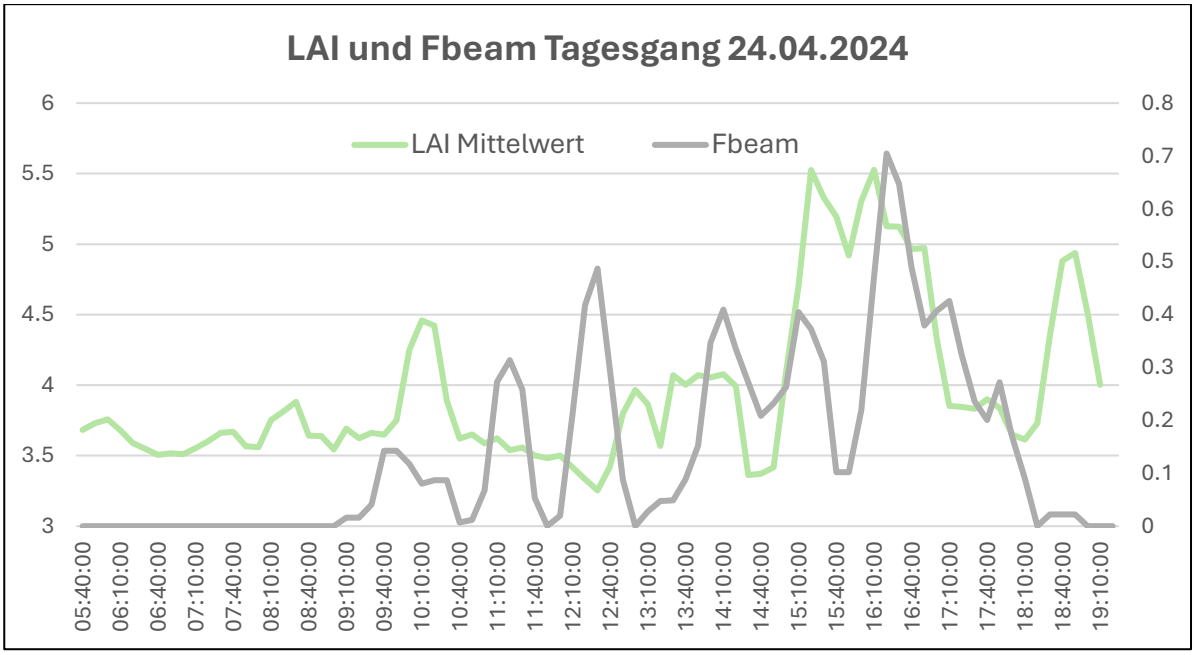
In der Abbildung wird der Tagesgang nach Berechnung der dritten Periode des gleitenden Mittelwertes dargestellt

Aufgrund der im vorherigen Abschnitt erwähnten signifikanten Streuung der LAI-Werte aus der PAR-Berechnung, wurden die Werte mit Hilfe der dritten Periode des gleitenden Mittelwertes geglättet. Dies dient der Lesbarkeit der Abbildung. Die einzelnen Messpunkte zeigen im

Tagesverlauf erhebliche Übereinstimmungen. Im Zeitraum von 15:10 bis 17:00 Uhr weisen alle zehn Messpunkte die höchsten LAI-Werte auf. Des Weiteren ist eine erhebliche Schwankung der berechneten LAI-Werte aller Messpunkte im Tagesverlauf zu verzeichnen. Es lassen sich wiederholt kurzfristige, signifikante Anstiege der LAI-Werte im Tagesverlauf beobachten. Die kurzfristigen und erheblichen Schwankungen der LAI-Werte können mit dem realen LAI jedoch nicht übereinstimmen, da die Blattentwicklung nicht im gleichen Maße voranschreiten kann. Folglich müssen die Schwankungen auf einen der sich verändernden Parameter zurückzuverfolgen sein. Der gesuchte Parameter muss erhebliche und kurzfristige Schwankungen im Tagesverlauf aufweisen.

Der Parameter Fbeam weist diese erheblichen und kurzfristigen Schwankungen auf. Zur Überprüfung einer möglichen Übereinstimmung der Schwankungen des Fbeam mit denen des LAI-Tagesgangs wurde in der Abbildung 15 der über alle Messpunkte gemittelte Tagesgang des LAI dem Tagesgang des Fbeam gegenübergestellt.

Abb.15: Vergleich des über alle Messpunkte gemittelten LAI-Tagesgang mit dem Tagesgang des fbeam für den 24.4.24



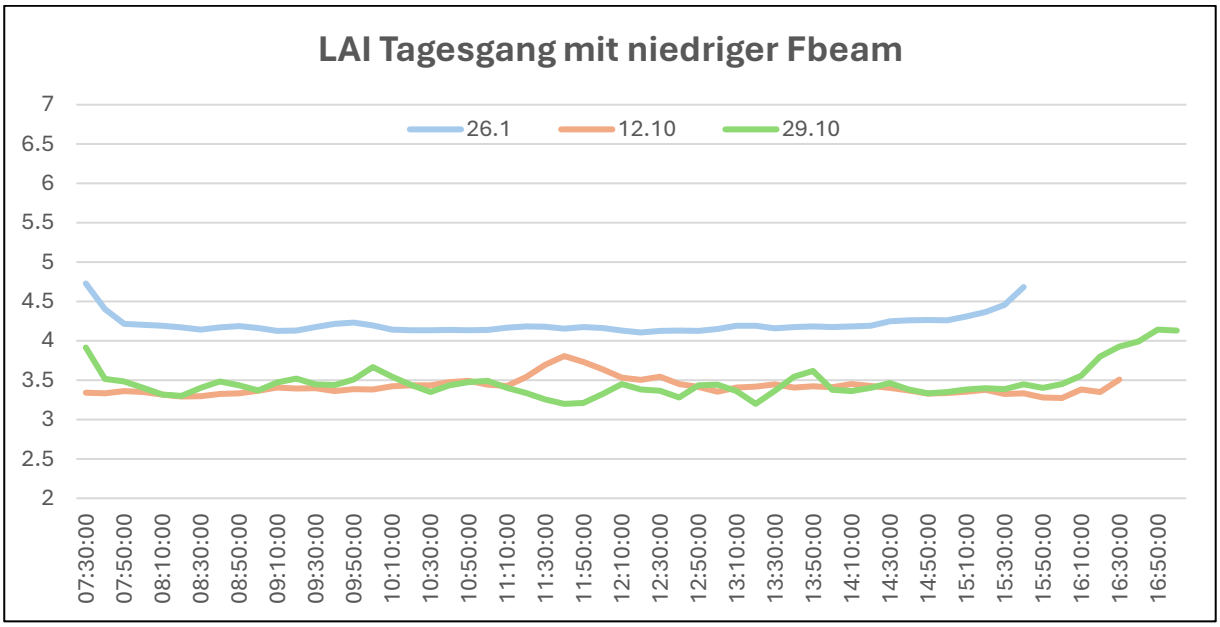
Darstellung des Tagesgangs des LAI und fbeam nach berechnung der dritten Periode des gleitenden Mittelwertes. In der Abbildung ist auf der linken Skala der LAI angegeben. Die rechte Skala zeigt den Fbeam in Watt pro Quadratmeter (W/m²) an.

Es lässt sich feststellen, dass eine Übereinstimmung zwischen dem Tagesgang des LAI und dem Tagesgang des Fbeam besteht. So sind an dem 24.04.2024 tendenziell höhere LAI-Werte berechnet wurden, wenn zum gleichen Zeitpunkt hohe Fbeam-Werte gemessen wurden. So wurden am Nachmittag des 24.04.2024 die höchsten Fbeam-Werte des Tages gemessen. Im selben Zeitraum sind auch die höchsten LAI-Werte berechnet wurden. Dennoch lassen sich auch Zeitpunkte

im Tagesverlauf ausmachen, an denen keine Übereinstimmungen des LAI mit dem Fbeam zu erkennen sind. So wurden beispielsweise starke Fbeam-Anstiege im Zeitraum von 11:10 bis 11:40 Uhr und von 12:10 bis 12:40 Uhr gemessen. Dies spiegeln sich jedoch nicht im Verlauf des LAI wider. Ein weiteres Bespiel ist der Anstieg der LAI-Werte im Zeitraum von 18:40 bis 19:10. Im selben Zeitraum ist lediglich ein geringfügiger Anstieg der Fbeam-Werte zu erkennen. Dennoch lässt sich die Vermutung aufstellen, dass ein wesentlicher Grund für die unterschiedlich hohen Messungen des LAI im Verlauf eines Tages die sich verändernden Fbeam-Werte sind.

Im Rahmen der weiteren Untersuchung der aufgestellten Hypothese wurde im nächsten Schritt der Tagesgang des LAI an Tagen mit niedrigen Fbeam-Werten analysiert. Hierfür wurden aus dem Jahr 2023 drei Tage ausgewählt, die über den gesamten Tagesverlauf einen Fbeam-Wert von null aufweisen. Das sind die Tage 26.1.23, 12.10.23 und 29.10.23. Es wurde der Mittelwert der untersuchten Messpunkte für die verschiedenen Zeitpunkte an den drei Tagen berechnet und in Abbildung 16 grafisch dargestellt.

Abb.16: Gemittelter LAI-Tagesgang aller Messpunkte für Tage mit niedrigem Fbeam



Darstellung des Tagesgangs des LAI nach Berechnung der dritten Periode des gleitenden Mittelwertes

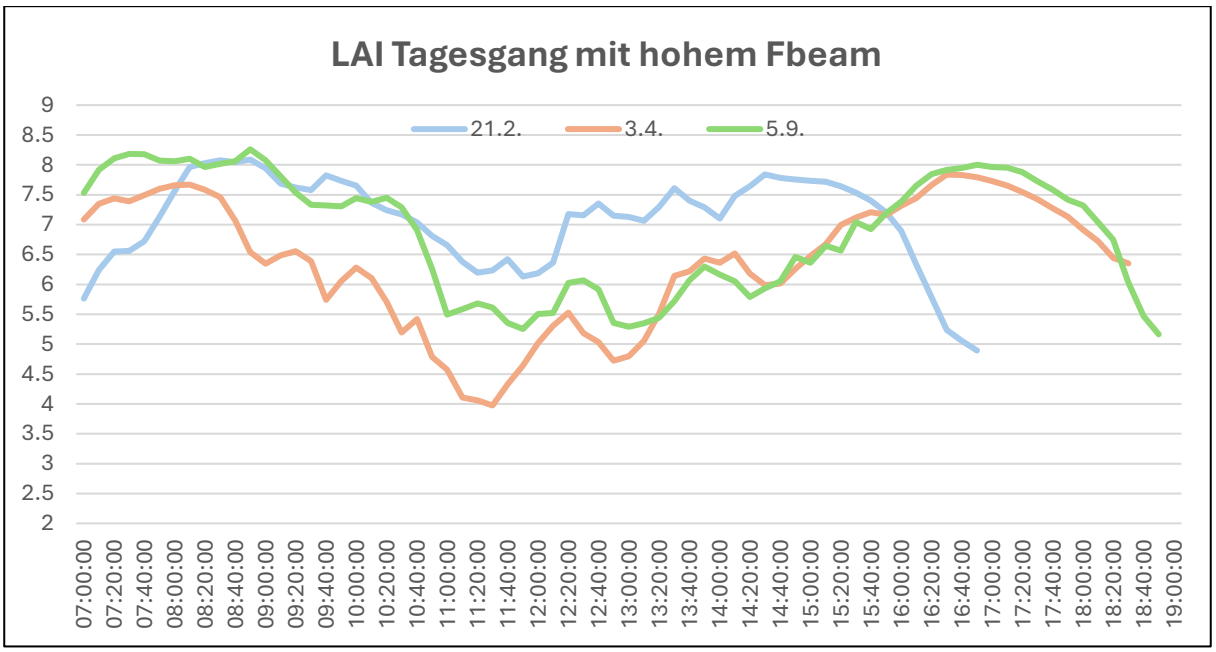
Es lässt sich feststellen, dass an den Tagen, an denen der Fbeam-Wert konstant niedrig ist, die Schwankungen der LAI-Werte im Tagesverlauf geringer ausfallen als in Abbildung13 und 14 dargestellt. An allen drei ausgewählten Tagen lässt sich eine nur geringfügige Schwankung der berechneten LAI-Werte im Tagesverlauf beobachten. Eine Ausnahme bildet lediglich der Zeitraum kurz nach Sonnenaufgang und kurz vor Sonnenuntergang, in dem ein Anstieg der LAI-Werte an den betrachteten Tagen zu verzeichnen ist. Diese Beobachtung steht möglicherweise in einem

Zusammenhang mit den zu diesen Tageszeiten noch niedrigem Zenitstand der Sonne. Eine mögliche Erklärung für diese Beobachtung ist, dass bei niedrigerem Sonnenstand das Licht einen längeren Weg durch die Baumkrone zurücklegt, was zu höheren LAI-Werten führt. Um diese These zu überprüfen, sind jedoch in Zukunft noch weitere Untersuchungen erforderlich. So schreiben Pokovai und Fodor 2019:11, dass wenn die Messungen nicht zu früh am Morgen bei niedrigen Zenitstand, durchgeführt würden, es nicht zu erwarten sei, dass der Zenitwinkel die LAI-Messung signifikant beeinflusst.

Der über den gesamten Tag von allen Messpunkten gemittelte LAI für die Tage 26.01.2023, 12.10.2023 und 29.10.2023 beträgt 4,24; 3,42 und 3,49. Die beobachteten konstanteren LAI-Werte an Tagen mit geringen Fbeam-Werten könnte möglicherweise den realen LAI an dem Standort besser wiedergeben. Denn die kurzfristigen Schwankungen des berechneten LAI, die in der Abbildung 13 und 14 zu sehen sind stimmen, wie im Vorhinein bereits erwähnt, höchst wahrscheinlich nicht mit dem realen LAI überein.

Um den Einfluss des Fbeam auf die Berechnung des LAI weiter zu untersuchen, wurden im Folgenden drei Tage aus dem Jahr 2023 ausgewählt an denen der Fbeam die meiste Zeit des Tages >0,5 W/m² war. Dies war an den Tagen 21.02.2023, 03.04.2023 und 05.09.2023 der Fall. Der LAI-Tagesgang dieser drei Tage ist in Abbildung 17 dargestellt. Hierfür wurde der Mittelwert aller betrachteter Messpunkte herangezogen.

Abb.17: LAI-Tagesgang an Tagen mit hohen Fbeam-Werten



Darstellung des Tagesgangs des LAI nach Berechnung der dritten Periode des gleitenden Mittelwertes

In der Abbildung 17 ist zu erkennen, dass die Kurven der drei betrachteten Tage unterschiedliche Verläufe aufweisen. So liegen die berechneten LAI-Werte für den 21.02.2023 in den frühen Morgenstunden niedriger als für die anderen beiden Tage. Bei allen drei Tagen ist im Verlauf der Mittagsstunden eine Absenkung der LAI-Werte zu beobachten. Diese ist am 03.04.2023 besonders stark ausgeprägt. Im Nachmitag bis in die Abendstunden, steigen die LAI-Werte an allen drei Tagen wieder an und erreichen wieder das Niveau der Morgenstunden. Zum Ende des Tages sinken die LAI-Werte an den drei Tagen wieder ab.

Insgesamt liegen die berechneten LAI-Werte an den drei Tagen mit dem ganztagig hohem Fbeam auf einem wesentlich höherem Niveau als bei den drei Tagen mit dem kostant niedrigem Fbeam. So liegt der über alle Messpunkte über den gesamten Tag gemittelte LAI für die Tage 21.02.2023, 03.04.2023 und 05.09.2023 bei 7,01; 6,37 und 6,81. Daraus ergibt sich, dass die LAI-Werte der betrachteten Tage mit hohem Fbeam im Schnitt um etwa 80% höhere Werte aufweisen als die betrachteten Tage mit niedrigem Fbeam. Dieser signifikante Unterschied zwischen den berechneten LAI-Werten je nach Beleuchtungszustand zeigt, dass auch die in dieser Arbeit angewandte indirekte Methodik zur Berechnung des LAI aus PAR mit Hilfe der Gleichung aus Abschnitt 3.1 „Gleichug“ von den Lichtverhältnissen erheblich beeinflusst wird.

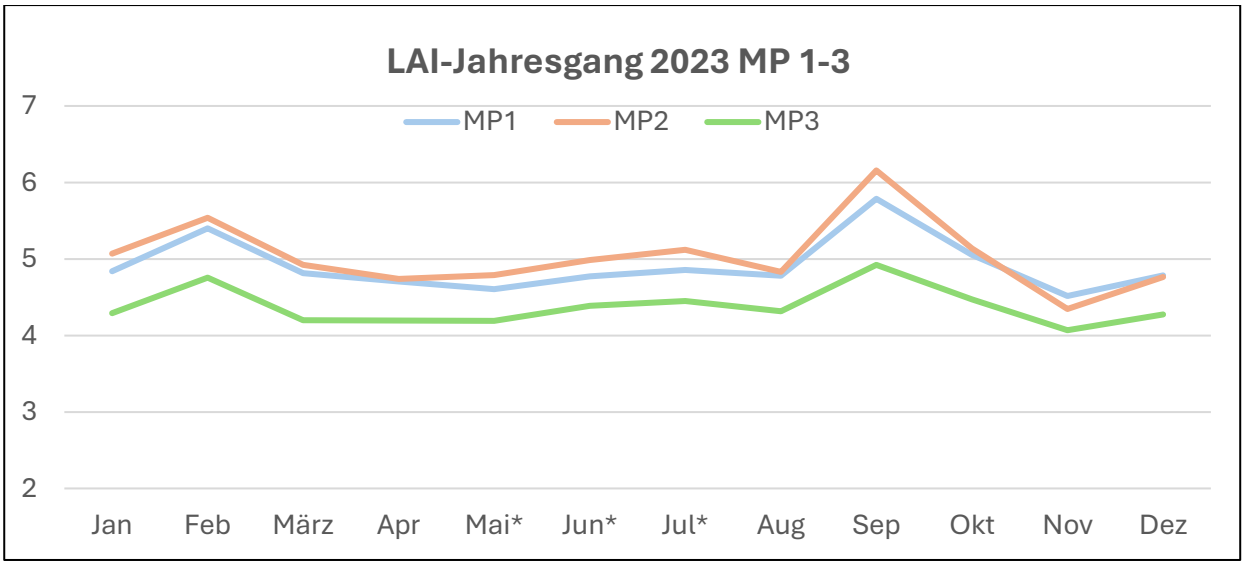
Die Frage, die sich aus dieser Erkenntnis ergibt, lautet welche Belichtungsverhältnisse für die angewandte Methodik am besten geeignet sind, um den realen LAI bestmöglich abzubilden. Diese Frage nach dem optimalen Beleuchtungszustand ist wahrscheinlich die entscheidende Frage bei der Bestimmung des LAI mit Hilfe von PAR, bei der erhebliche Diskrepanzen zwischen den Expertenmeinungen zu finden sind (Pokovai, Fodor 2019:1). In ICOS 2021:10–11 wird hierzu ausgeführt, dass die Messungen von PAR vorzugsweise bei stabilen Lichtverhältnissen durchgeführt werden sollten. Dies impliziert, dass die Messungen bei einem gleichmäßig blauen oder grauen Himmel durchgeführt werden sollten. Es wird empfohlen Messungen bei variierenden Lichtverhältnissen zu vermeiden. Zusätzlich wird darauf hingewiesen, dass während der gesamten Vegetationsperiode konsequent unter den gleichen Lichtverhältnissen gemessen werden sollte. Dies kann entweder durch die Durchführung aller Messungen in Anwesenheit direkter Sonneneinstrahlung oder aller Messungen ohne direkte Sonneneinstrahlung erfolgen. Es wird jedoch auch darauf hingewiesen, dass eine solche Konsistenz in der Praxis nur schwer zu erreichen ist und aus diesem Grund auch nicht zwingend erforderlich ist (ICOS 2021:10-11).

4.3 Jahresgang LAI

Im vorliegenden Abschnitt wurde der LAI-Jahresgang für das Jahr 2023 erstellt. Die Auswahl dieses Jahres erfolgte, da es sich um das aktuelle vollständig durchgelaufene Jahr handelt. Im Rahmen der Berechnung des Jahresgangs wurden insgesamt neun der zehn Messpunkte berücksichtigt. Eine Einbeziehung des MP7 war nicht möglich, da die PAR-Messung an diesem Messpunkt eine signifikante, nicht konstante Messungenauigkeit aufweist. Eine manuelle Korrektur dieses Messfehlers wäre aufgrund der großen Datenmenge zeitaufwändig und fehleranfällig und könnte so möglicherweise die Ergebnisse verfälschen. Aus diesem Grund wurde beschlossen, den Messpunkt MP7 nicht in die Berechnung einzubeziehen. Eine weitere Herausforderung bei der Berechnung des LAI-Jahresgangs für das Jahr 2023 stellt die Tatsache dar, dass im Zeitraum von Mai, Juni und Juli keine PAR-Messungen des Turmes vorlagen. Aufgrund der Unverzichtbarkeit der PAR-Messung über der Baumkrone für alle Messpunkte zur Berechnung des TAU konnte in diesem Zeitraum keine LAI-Berechnung durchgeführt werden. Des Weiteren lagen für die Monate Januar, Februar und März für den Messpunkt MP6 ebenfalls keine PAR-Messungen vor. Um die entstandenen Lücken zu schließen, wurden Werte aus dem Jahr 2022 herangezogen, sodass eine Vervollständigung der Datengrundlage gewährleistet ist.

Aus der nun mit Werten aus dem Jahr 2022 vervollständigten Datengrundlage, wurde zunächst für jeden der neun Messpunkte ein Jahresgang für das Jahr 2023 berechnet. Dies ist in den Abbildung 18 und19 zu sehen. Hierfür wurde zunächst für jeden Messpunkt aus den gesamten Daten für jeden Monat ein Mittelwert gebildet. Aus diesen Mittelwerten wurde dann für die einzelnen Messpunkte der Jahresgang gebildet. Dieses Vorgehen wurde gewählt, da für jeden Monat der einzelnen Messpunkte zwischen 1400 und 2800 LAI-Werte vorlagen. Der erhebliche Unterschied in der Anzahl der vorliegenden Werten für die einzelnen Monate hängt maßgeblich mit der Tageslänge zu den unterschiedlichen Jahreszeiten zusammen. Für jeden Messpunkt wurden im Durchschnitt etwa 24.000 LAI-Werte erfasst. Diese große Menge an Daten mit der in Abschnitt 4.2 „Tagesgang LAI“ beschriebenen Streuung, hätte die Abbildungen 18 und 19 ohne Bildung der Mittelwerte unlesbar gemacht. Infolge der beträchtlichen Datenmenge, sowie der Evaluierung der implementierten PAR-Methodik, erfolgte keine Berücksichtigung der in Abschnitt 4.2 „Tagesgang LAI“ in ICOS 2021:10-11 dargelegten Vorschläge zu den Lichtverhältnissen während der PAR-Messungen, bei der Berechnung des LAI-Jahresgangs.

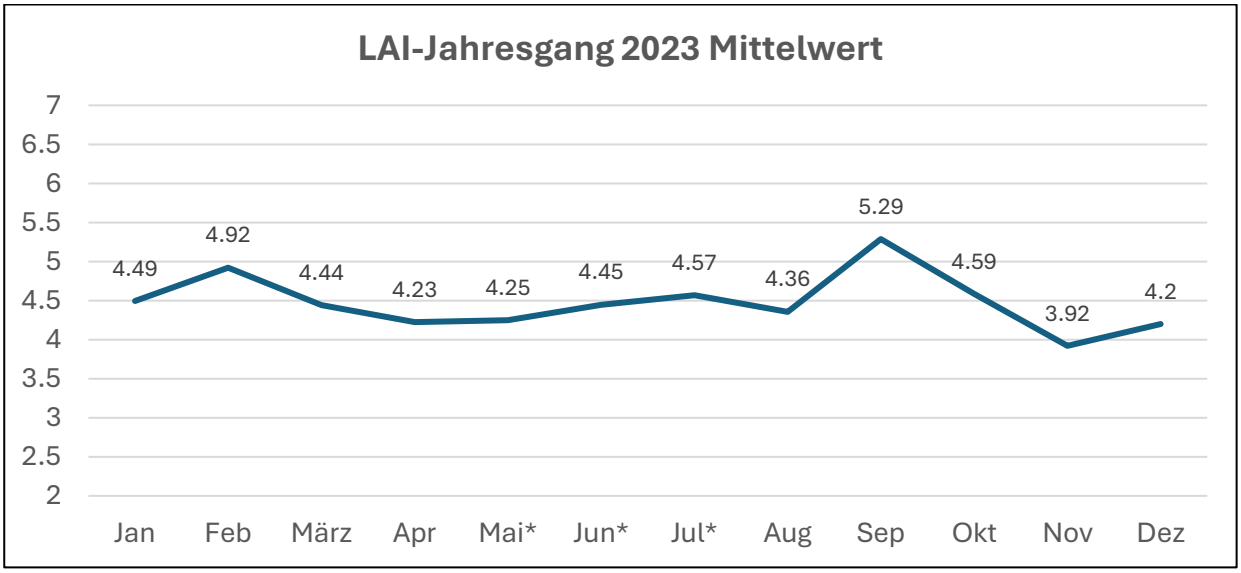
Abb.18: LAI-Jahresgang 2023 für die Messpunkte 1-3



Die Monate, die mit einem * markiert sind beinhalten Werte aus dem Jahr 2022. Die Graphen für den LAI-Jahresgang für die Messpunkte 4-10 können dem Anhang entnommen werden.

Der LAI-Jahresgang der einzelnen Messpunkte weist eine hohe Ähnlichkeit auf. Lediglich der Messpunkt MP6 zeigt für die Monate Januar, Februar und März eine andere Tendenz auf (s. Abb. 19 im Anhang). Dies ist darin begründet, das MP6 der einzige Messpunkt ist, der für diese Monate Werte aus dem Jahr 2022 beinhaltet. Im Wesentlichen unterscheiden sich die einzelnen Messpunkte nur in der Höhe des berechneten LAI. Im Anschluss wurden die Ergebnisse der einzelnen Messpunkte zu einem Mittelwert zusammengeführt, welcher in der Abbildung 20 dargestellt wurde.

Abb.20: LAI- Jahresgang 2023 Mittelwert aller Messpunkte



Die Monate, die mit einem * markiert sind beinhalten Werte aus dem Jahr 2022. Die Graphen für den

Zu Beginn des Jahres liegt der berechnete Mittelwert des LAI bei 4,49. Zum Februar steigt der LAI auf 4,92, bevor er im April und Mai auf 4,23 und 4,25 absinkt. Im Anschluss steigt der LAI bis Juli leicht an bis auf 4,57. Im August sinkt der LAI leicht auf 4,36, um dann im September stark anzusteigen und mit 5,28 den höchsten Wert des Jahres 2023 für den Untersuchungsstandort zu erreichen. Im Anschluss fällt der LAI bis November stark auf 3,92 ab. Im November wurden somit die geringsten LAI-Werte für den Standort berechnet. Im Folgemonat Dezember steigt der LAI noch einmal geringfügig an.

Es besteht Anlass zu zweifeln, ob der mit Hilfe der PAR-Methodik berechnete Jahresgang dem realen Jahresgang des LAI entspricht. Denn obwohl Nadelwälder immergrün sind, durchlaufen sie auch die jährlichen Zyklen des Neuwachstums im Frühling und der Seneszenz im Herbst (Chen 1996:136). Aus diesem Grund ist jedoch zu erwarten das das LAI-Maxima im Sommer und LAI-Minima im Winter auftritt. Da sich das in den Werten aus der Abbildung 20 nicht widerspiegelt, muss davon ausgegangen werden, dass die berechneten LAI-Maxima im Februar und September durch die bereits in Abschnitt 4.2 „Tagesgang LAI“ beschriebenen Effekte des Fbeam hervorgerufen werden.

Die Berechnung des LAI-Jahresgangs basiert auf einer Gesamtsumme von 216.698 LAI-Werten. Die Bildung des Mittelwerts aus den 216.698 LAI-Werten ergibt einen LAI von 4,47. Dieser Wert gibt den durchschnittlichen LAI-Wert aller neun Messpunkte über das Jahr 2023 an. Unter der Voraussetzung, dass die verwendeten Messpunkte als repräsentativ für das Waldstück am Wüstebach angesehen werden können, wie in Reitz et al. 2023:4 beschreiben, lässt sich sagen, dass sich mit der verwendeten Methodik für das untersuchte Waldstück ein durchschnittlicher LAI von etwa 4,5 für das Jahr 2023 ergibt.

5 Ergebnisse und Diskussion

Aufgrund der Tatsache, dass indirekte Methoden den Blattflächenindex aus Messungen des Strahlungstransfers durch Baumkronen ableiten (Breda 2003:2405), werden sie durch die Strahlungsbedingungen des Messzeitpunktes beeinflusst. Im Rahmen dieser Untersuchung konnte nachgewiesen werden, dass die Ergebnisse der Berechnung des LAI aus Messungen der photosynthetisch aktiven Strahlung in erheblichem Maße von den Strahlungsbedingungen zum Zeitpunkt der Messung abhängig sind. Die durchgeführte Untersuchung belegt, dass in Extremfällen die Berechnung der LAI-Werte an Tagen mit hohen Fbeam-Werten bis zu 80 % höhere Werte ergibt als an Tagen, an denen konstant diffuse Lichtbedingungen vorherrschen. Diese Ergebnisse legen nahe, dass die entscheidende Frage zur korrekten Berechnung des LAI mit der in dieser Arbeit angewandten Methode darin besteht, welche Strahlungsbedingungen den realen LAI bei der Berechnung mit der PAR-Methodik am besten widerspiegeln.

In ICOS 2021:10–11 wird hierzu ausgeführt, dass die Messungen von PAR vorzugsweise bei stabilen Lichtverhältnissen durchgeführt werden sollten. Dies impliziert, dass die Messungen bei einem gleichmäßig blauen oder grauen Himmel durchgeführt werden sollten. Dies steht jedoch im Widerspruch zu den Ergebnissen des Einflusses des Fbeam, die in dieser Arbeit gewonnen wurden.

Der in dieser Arbeit vollzogene Vergleich zwischen den Ergebnissen aus der PAR- und DHP-Methodik sollte noch einmal eingeordnet werden. Da zum einen ein kleiner Datensatz verwendet wurde und zum anderen am 23.04.2024 im Zeitraum zwischen 11 bis 17 Uhr optimale Lichtbedingungen für die Aufnahme der DHP herrschten. Dies jedoch nicht unbedingt für die Zeiträume zwischen 10 bis 11 Uhr sowie zwischen 17 bis 18 Uhr gilt, die für die Berechnung des LAI mit der PAR-Methodik herangezogen wurden. Dennoch legen die Resultate des Vergleiches die Schlussfolgerung nahe, dass hohe Fbeam-Werte zu einer Überschätzung des realen LAI durch die PAR-Methodik führen. Denn es ist festzustellen, dass die Resultate der LAI-Bestimmung an Tagen mit hohen Fbeam-Werten keine Übereinstimmung mit den Resultaten der DHP-Methodik aufweisen. Daher lässt sich annehmen, dass die ausschließliche Berücksichtigung von Messwerten, die mit geringen Fbeam-Werten einhergehen, die Ergebnisse liefert, welche den realen LAI für die PAR-Methodik am besten widerspiegeln.

Um die Frage nach den optimalen Strahlungsbedingungen für die PAR-Methodik mit Gewissheit beantworten zu können, ist ein Vergleich der PAR-Methodik mit Ergebnissen aus direkten Messungen des LAI erforderlich. Da sich die direkten Methoden lediglich auf das Laub beziehen, sind sie die einzigen Methoden, die den tatsächlichen LAI abbilden können. Daher eignen sie sich zur Evaluierung der PAR-Methodik (Breda 2003:2404).

5.1 Vorteile der PAR-Methodik

Ein wesentlicher Unterschied der in dieser Arbeit angewendeten Methodik gegenüber anderen indirekten Methoden zur Messung des LAI, ist die Nutzung von fest installierten PAR-Sensoren. Diese PAR-Sensoren haben die photosynthetisch aktive Strahlung alle 10 Minuten gemessen. Die kontinuierliche Messung führt zu der Generierung umfangreicher chronologischer Datensätze. Aus jeder der einzelnen PAR-Messungen kann unter Zuhilfenahme der in Abschnitt 3.1 „Gleichung“ dargelegten Gleichung, der LAI für jeden Messpunkt mit einer zeitlichen Auflösung von 10 Minuten berechnet werden. Dies wiederum erlaubt die Erstellung von hochauflösenden Zeitreihen. Eine detaillierte Analyse dieser Zeitreihen gestattet eine präzise Evaluierung der angewandten Methodik. Dies eröffnet die Möglichkeit, Rückschlüsse hinsichtlich der Auswirkungen der einzelnen Parameter zu ziehen. Wie im Rahmen dieser Arbeit für den Parameter Fbeam exemplarisch dargelegt.

Die gewonnenen Erkenntnisse sind die Grundlage für eine weitere Optimierung der angewandten PAR-Methodik zur Berechnung des LAI. Darüber hinaus gestatten diese hochauflösenden Zeitreihen eine Analyse der präzisen zeitlichen Veränderung des LAI, was Rückschlüsse auf die Dynamiken im Wald zulässt. Die fest installierten PAR-Sensoren ermöglichen dies unter moderatem Zeitaufwand im Gelände. Der Zeitaufwand für die Beschaffung einer vergleichbaren Datengrundlage mittels einer alternativen Methode zur LAI-Bestimmung wäre um ein Vielfaches höher.

5.2 Verbesserungen der PAR-Methodik

Infolge der bereits seit 2021 bestehenden festen Installation der PAR-Sensoren ist an den Messpunkten MP5, MP7 und MP9 eine Drift der erfassten PAR-Werte zu beobachten. Diese Drift ist insbesondere am Messpunkt MP7 signifikant ausgeprägt. Daher wird eine erneute Kreuzkalibrierung der PAR-Sensoren empfohlen, wie sie in ICOS 2022:9 beschrieben ist. Ein wesentlicher Schritt zur Optimierung der erzielten Ergebnisse besteht darin, in die Berechnung des LAI ausschließlich Zeitpunkte einfließen zu lassen, an denen gute Strahlungsbedingungen für die PAR-Methodik herrschen. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass dies möglicherweise gleichmäßig diffuse Bedingungen sind. Dies sollte jedoch in Zukunft durch den Vergleich mit Ergebnissen aus direkten LAI-Messungen belegt werden. Die ausschließliche Verwendung von Daten unter bestimmten Strahlungsbedingungen limitiert die Möglichkeit der Erstellung von hochauflösenden Zeitreihen durch die PAR-Methodik. Dennoch wäre eine höhere Aussagekraft der Ergebnisse zu erwarten, da diese den realen LAI besser widerspiegeln würden.

5.3 Mögliche weiteren Anwendungen

Die Nutzung der fest installierten PAR-Sensoren erlaubt die Realisierung einer Vielzahl zusätzlicher Anwendungen, welche auf Basis der gewonnenen Daten durchgeführt werden können. Die Ergebnisse dieser Arbeit eröffnen die Möglichkeit, eine Definition zu erstellen, welche Strahlungsbedingungen für die PAR-Methodik am besten geeignet sind, um den realen LAI möglichst genau abzubilden. Des Weiteren ermöglicht die kontinuierliche PAR-Messung die Generierung von Zeitreihen, welche die zeitliche Entwicklung des LAI widerspiegeln. In der Konsequenz könnten auf Basis der vorliegenden Daten in Zukunft erkenntnisreiche Aussagen über die Veränderung der LAI-Werte am Untersuchungsstandort im Zuge des Waldumbaus getroffen werden. Eine weitere potenzielle Anwendungsmöglichkeit besteht in der Kombination der erfassten Zeitreihen des LAI mit den Daten der meteorologischen Beobachtungen am Wüstebach. Dadurch könnten Prognosen für die zukünftige Entwicklung des LAI unter verschiedenen Klimawandel-Szenarien erstellt werden.

6 Literaturverzeichnis

Ariza-Carricondo, C./Di Mauro, F./de Beeck, M. O./Roland, M./Gielen, B./Vitale, D./ Ceuleman, R./Papale, D. (2019): A comparison of different methods for assessing leaf area index in four canopy types. In: *Central European Forestry Journal 65*(2), 67-80.

Baret, F./de Solan, B./Lopez-Lozano, R./Ma, K./Weiss, M. (2010): GAI estimates of row crops from downward looking digital photos taken perpendicular to rows at 57.5° zenith angle-Theoretical considerations based on 3D architecture models and application to wheat crops. In: Agricultural and Forest Meteorology 150(11), 1393–1401.

Bogena, H. R./Montzka, C./Huisman, J. A./Graf, A./Schmidt, M./Stockinger, M./von Hebel, C./ Hendrick-Franssen, H. J./van Kruk, J./Tappe, W./Lücke, A./Baatz, B./Bol, R./Groh, J./Pütz, T./ Jakobi, J./Kunkel, R./Sorg, J./Vereecken, H. (2018): The TERENO-Rur hydrological observatory- A multiscale multi-compartment research platform for the advancement of hydrological science. In: *Vadose Zone Journal 17*(1), 1-22.

Breda, N. J. (2003): Ground-based measurements of leaf area index- a review of methods, instruments and current controversies. In: *Journal of experimental botany 54*(392), 2403-2417.

Cescatti, A. (2007): Indirect estimates of canopy gap fraction based on the linear conversion of hemispherical photographs- Methodology and comparison with standard thresholding techniques. In: Agricultural and Forest Meteorology 143(1-2), 1-12.

Chen, J. M./Black, T. A. (1992): Defining leaf area index for non-flat leaves. In: *Plant, Cell & Environment 15*(4), 421-429.

Chen, J. M. (1996): Optically based methods for measuring seasonal variation of leaf area index in boreal conifer stands. In: *Agricultural and Forest Meteorology 80*(2-4), 135-163.

Chen, J. M./Rich, P. M./Gower, S. T./Norman, J. M./Plummer, S. (1997): Leaf area index of boreal forests- Theory, techniques, and measurements. In: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres 102*(D24), 29429-29443.

Cutini, A. (2002): Litterfall and leaf area index in the CONECOFOR permanent monitoring plots. In: Journal of Limnology 61(1s), 62-68.

Druee C./Graf A. (2024): TERENO data from station(s) WU_EC_001 with parameter(s) Radiation, Radiation for time period 2023.01.01 to 2023.12.31 and 2023.12.31 to 2024.05.15. https://hdl.handle.net/20.500.11952/TERENO.WU_EC_001.1722176866145 zuletzt abgerufen am 05.09.2024.

Fang, H./Baret, F./Plummer, S./Schaepman-Strub, G. (2019): An overview of global leaf area index (LAI)- Methods, products, validation, and applications. In: Reviews of Geophysics 57(3), 739-799.

Fang, H. (2021): Canopy clumping index (CI)- A review of methods, characteristics, and applications. In: Agricultural and Forest Meteorology 303, 108374.

Fassnacht, K. S./Gower, S. T./Norman, J. M./McMurtric, R. E. (1994): A comparison of optical and direct methods for estimating foliage surface area index in forests. In: Agricultural and Forest Meteorology 71(1-2), 183-207.

Gallenmüller, F. (1999): Blattflächenindex. In Lexikon der Biologie. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag. https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/blattflaechenindex/9186 abgerufen am 12.03.2024.

GCOS (2009): Implementation plan for the global observing system for climate in support of the UNFCCC (2010 Update). In: *Proceedings of the Conference of the Parties (COP), Copenhagen, Denmark* (pp. 7-18).

ICOS (2020): Guidelines for PAR transmission measurements for GAI estimations in forests. In: ICOS Ecosystem guidelines, Version 20200415.

ICOS (2021): Instructions for ancillary vegetation measurments in forest, Green Area Index Aboveground Biomass Litter Biomass. In: ICOS Ecosystem Instructions, Version 20211109.

ICOS (2022): Instruction for PPFD transmission measurements for below canopy PAR GAI estimations. In ICOS Ecosystem Instruction, Version 20221001.

Jonckheere, I./Fleck, S./Nackaerts, K./Muys, B./Coppin, P./Weiss, M./Baret, F. (2004): Review of methods for in situ leaf area index determination part I- Theories, sensors and hemispherical photography. In: Agricultural and Forest Meteorology 121(1-2), 19–35.

Jonckheere, I./Nackaerts, K./Muys, B./van Aardt, J./Coppin, P. (2006): A fractal dimension-based modelling approach for studying the effect of leaf distribution on LAI retrieval in forest canopies. In: *Ecological Modelling 197*(1-2), 179-195.

Leblanc, S. G./Chen, J. M./Fernandes, R./Deering, D. W./Conley, A. (2005): Methodology comparison for canopy structure parameters extraction from digital hemispherical photography in boreal forests. In: Agricultural and Forest Meteorology 129(3-4), 187-207

Lehmkuhl, F./Loibl, D./Borchardt, H. (2010): Geomorphological map of the Wüstebach (Nationalpark Eifel, Germany)- an example of human impact on mid-European mountain areas. In: Journal of Maps 6(1), 520-530.

Lennartz, G./Röös, M. (2006): Nationalpark Eifel: Wald in Entwicklung Leitlinien – Maßnahmen. *Bericht zur Fachtagung 4*(5).

Pokovai, K./Fodor, N. (2019): Adjusting ceptometer data to improve leaf area index measurements. In: *Agronomy 9*(12), 866.

Reda, I./Andreas, A. (2004): Solar position algorithm for solar radiation applications. In: *Solar energy 76*(5), 577-589.

Reitz, O./Bogena, H./Neuwirth, B./Sanchez-Azofeifa, A./Graf, A./Bates, J./Leuchner, M. (2023): Environmental drivers of gross primary productivity and light use efficiency of a temperate spruce forest. In: Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 128(2)

Schmidt, M. (2020): Biomassebestimmung im Wüstebachtal - Hocheifel mittels allometrischer Funktionen und direkter Messungen. Universität Potsdam. Masterarbeit

Thimonier, A./Sedivy, I./Schleppi, P. (2010): Estimating leaf area index in different types of mature forest stands in Switzerland- a comparison of methods. In: *European Journal of Forest Research 129*, 543-562.

Weiss, M./Baret, F./Smith, G. J./Jonckheere, I./Coppin, P. (2004): Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination Part II- Estimation of LAI, errors and sampling. In: *Agricultural and forest meteorology 121*(1-2), 37-53.

Welles, J. M. (1990): Some indirect methods of estimating canopy structure. In: *Remote sensing reviews 5*(1), 31-43.

Yan, G./Jiang, H./Luo, J./Mu, X./Li, F./Qi, J./Hu, R./Xie, D./Zhou, G. (2021): Quantitative evaluation of leaf inclination angle distribution on leaf area index retrieval of coniferous canopies. In: *Journal of Remote Sensing*.

Zhang, Y./Chen, J. M./Miller, J. R. (2005): Determining digital hemispherical photograph exposure for leaf area index estimation. In: Agricultural and Forest Meteorology 133(1-4), 166-181.

7 Anhang

Abb.7: DHP-Aufnahmen der Messpunkte 5 bis 10

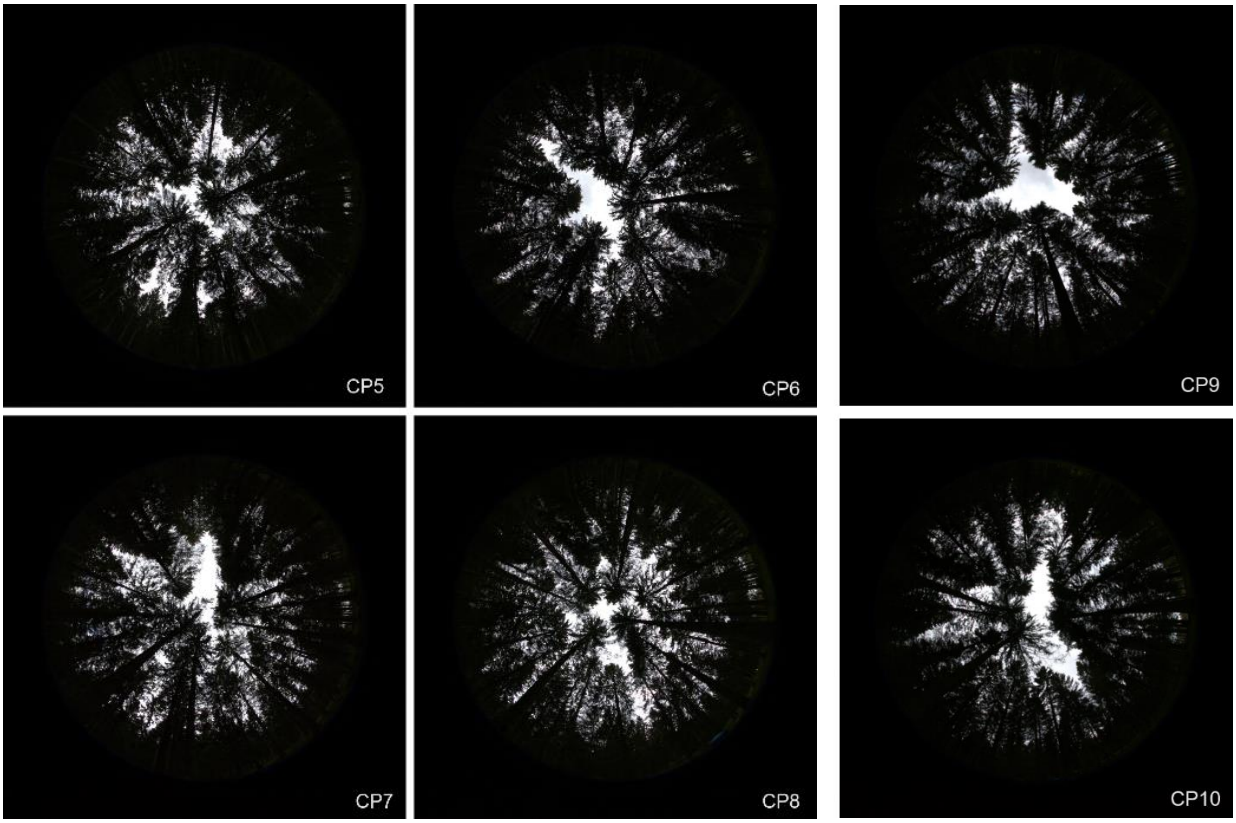
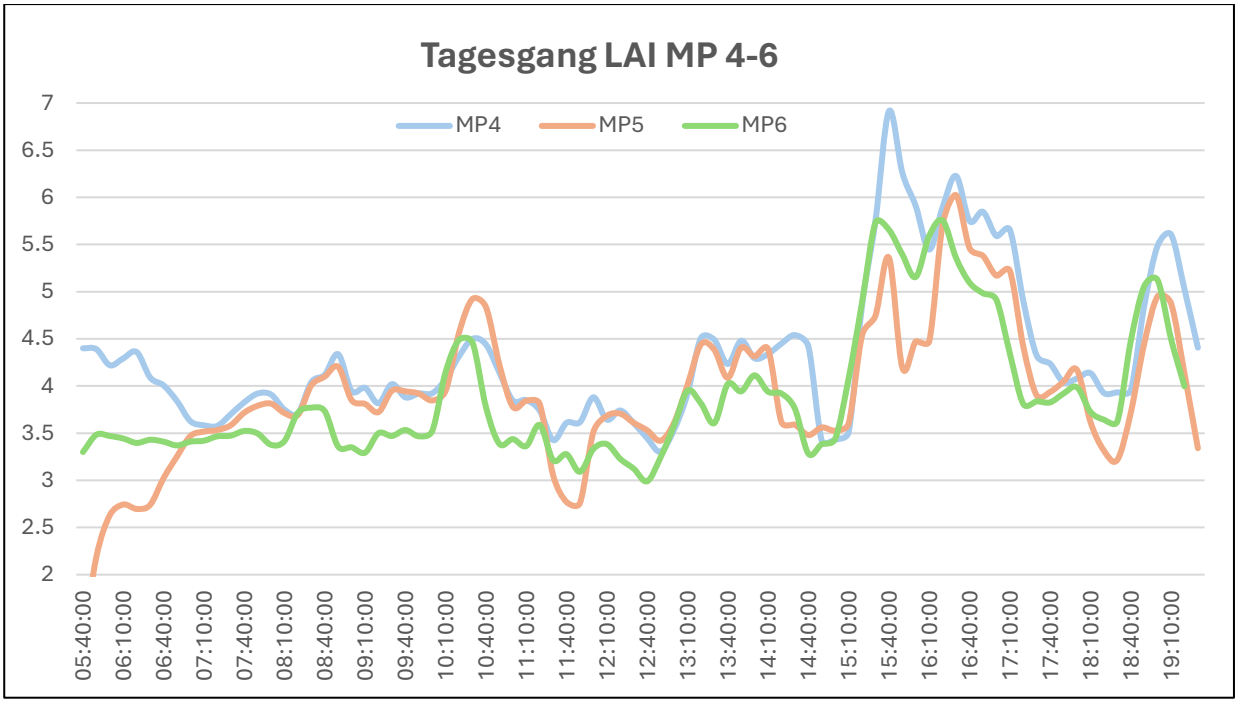
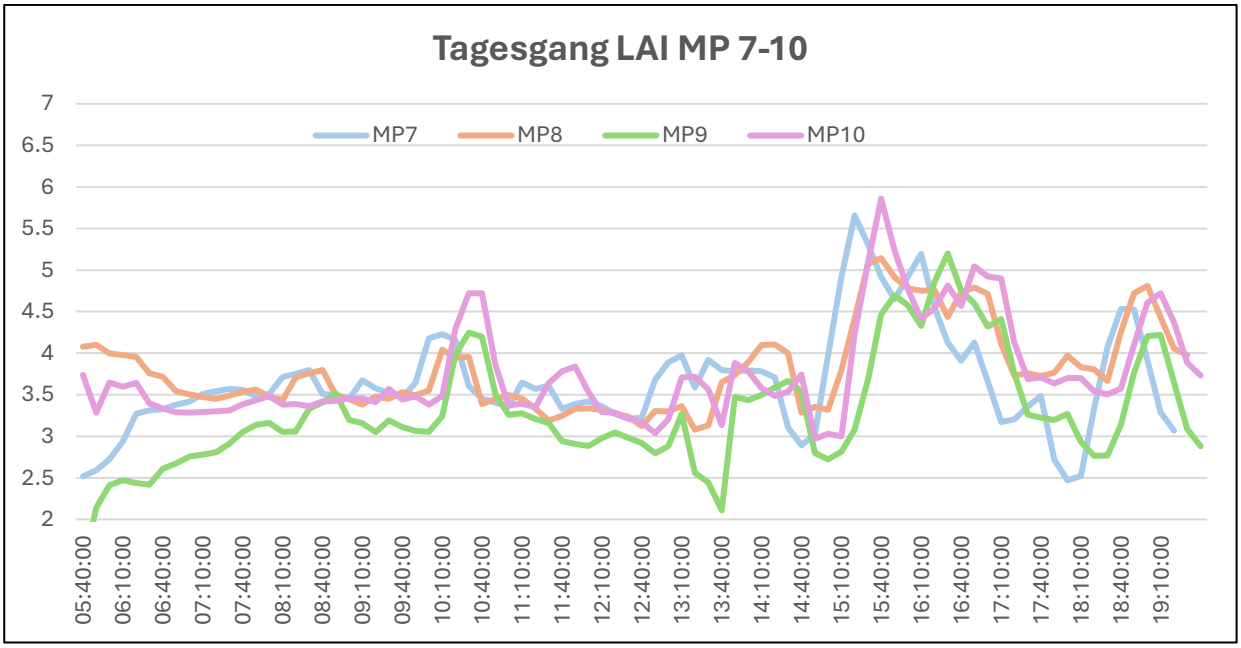


Abb.12: Boxplot-Diagramme der Ergebnisse der PAR- und DHP-Methodik für die Messpunkte 4-10 am 23.04.2024

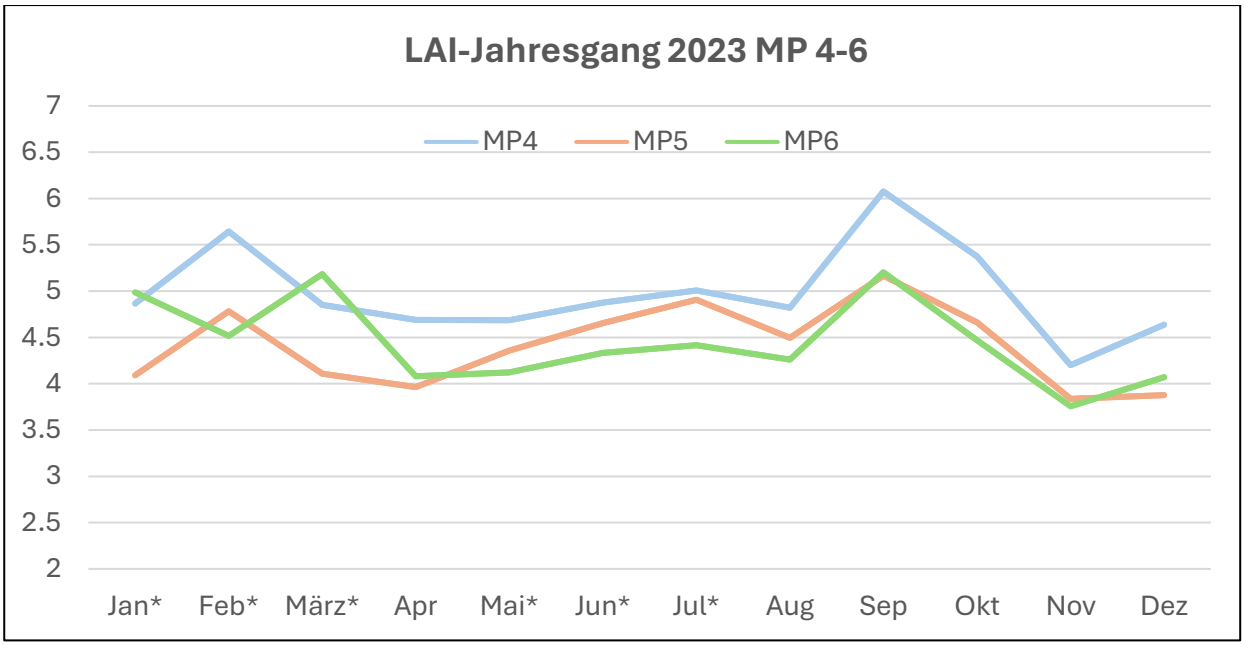
Abb.14: LAI-Tagesgang des 24.4.24 für die Messpunkte 4-10 aus Berechnung der photosynthetisch aktiven Strahlung

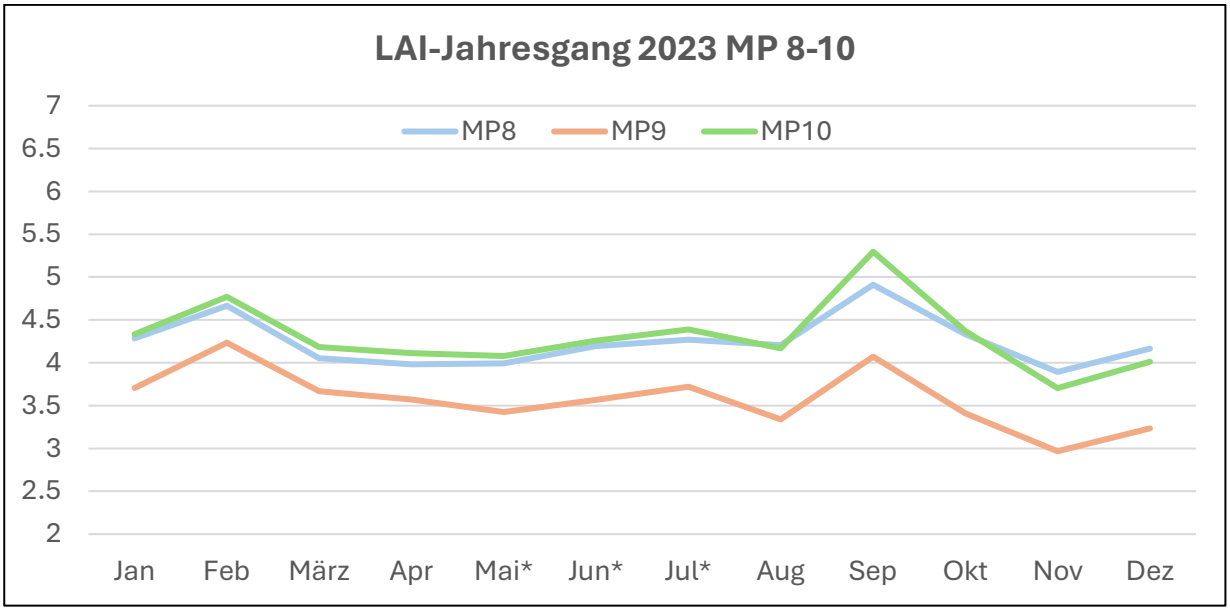




Darstellung des LAI Tagesgang nach berechnung 3.Periode des gleitenden Mittelwertes.

Abb.19: LAI-Jahresgang 2023 für die Messpunkte 1-3





Die Monate, die mit einem * markiert sind beinhalten Werte aus dem Jahr 2022

Eidesstattliche Versicherung
Declaration of Academic Integrity

Nießen, Tim — Name, Vorname/Last Name, First Name

409905 — Matrikelnummer (freiwillige Angabe) / Student ID Number (optional)

Ich versichere hiermit an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit/Bachelorarbeit/Masterarbeit* mit dem Titel
I hereby declare under penalty of perjury that I have completed the present paper/bachelor's thesis/master's thesis* entitled

Blattflächenindex-Schätzung in einem Fichtenwald im Nationalpark Eifel anhand Von Messungen der photosynthetisch aktiven Strahlung

selbstständig und ohne unzulässige fremde Hilfe (insbes. akademisches Ghostwriting) erbracht habe. Ich habe keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt; dies umfasst insbesondere auch Software und Dienste zur Sprach-, Text- und Medienproduktion. Ich erkläre, dass für den Fall, dass die Arbeit in unterschiedlichen Formen eingereicht wird (z.B. elektronisch, gedruckt, geplottet, auf einem Datenträger) alle eingereichten Versionen vollständig übereinstimmen. Die Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.
independently and without unauthorized assistance from third parties (in particular academic ghostwriting**.** I have not used any other sources or aids than those indicated; this includes in particular software and services for language, text, and media production. In the event that the work is submitted in different formats (e.g. electronically, printed, plotted, on a data carrier), I declare that all the submitted versions are fully identical. I have not previously submitted this work, either in the same or a similar form to an examination body.

Aachen 21.09.2024 — Ort, Datum/City, Date

T. Nießen — Unterschrift/Signature

*Nichtzutreffendes bitte streichen/Please delete as appropriate

Belehrung:
Official Notification:

§ 156 StGB: Falsche Versicherung an Eides Statt
Wer vor einer zur Abnahme einer Versicherung an Eides Statt zuständigen Behörde eine solche Versicherung falsch abgibt oder unter Berufung auf eine solche Versicherung falsch aussagt, wird mit Freiheitsstrafe bis zu drei Jahren oder mit Geldstrafe bestraft.
§ 156 StGB (German Criminal Code): False Unsworn Declarations
Whosoever before a public authority competent to administer unsworn declarations (including Declarations of Academic Integrity) falsely submits such a declaration or falsely testifies while referring to such a declaration shall be liable to imprisonment for a term not exceeding three years or to a fine.
§ 161 StGB: Fahrlässiger Falscheid; fahrlässige falsche Versicherung an Eides Statt
(1) Wenn eine der in den §§ 154 bis 156 bezeichneten Handlungen aus Fahrlässigkeit begangen worden ist, so tritt Freiheitsstrafe bis zu einem Jahr oder Geldstrafe ein.
(2) Straflosigkeit tritt ein, wenn der Täter die falsche Angabe rechtzeitig berichtigt. Die Vorschriften des § 158 Abs. 2 und 3 gelten entsprechend.
§ 161 StGB (German Criminal Code): False Unsworn Declarations Due to Negligence
(1) If an individual commits one of the offenses listed in §§ 154 to 156 due to negligence, they are liable to imprisonment for a term not exceeding one year or to a fine.
(2) The offender shall be exempt from liability if they correct their false testimony in time. The provisions of § 158 (2) and (3) shall apply accordingly.

Die vorstehende Belehrung habe ich zur Kenntnis genommen:
I have read and understood the above official notification:

Aachen 21.09.2024 — Ort, Datum/City, Date

T. Nießen — Unterschrift/Signature