

# Qualitätsoptimierung von Sportrasen mit Hilfe von Sensor-Informationen

Steger, S.

## Zusammenfassung

Messungen mit berührungsfreien multiparametrischen Fluoreszenz-Messungen (BF-MFM) wie z.B. der MULTIPLEX® stellt sich als vielversprechende Technologie für das professionelle Rasenmanagement in Sportstadien und Golfanlagen dar. Diese nicht-invasive Methode ermöglicht die simultane Erfassung mehrerer physiologischer Parameter der Rasenpflanzen unter verschiedenen Umweltbedingungen. Die Studie zeigt, dass die MFM-Technologie durch ihre Funktionalität unter diversen Lichtbedingungen besonders für Freilandanwendungen geeignet ist. Andere Parameter wie Quarzsandapplikationen, Rasensysteme und Rasenmischungen müssen bei der Auswertung berücksichtigt werden. Zentrale Erkenntnisse der Untersuchung umfassen:

- Eine starke Korrelation ( $R^2 = 0,90$ ) zwischen dem FRF\_G-Index und dem visuell beurteilten Bedeckungsmaß, was eine objektive Qualitätsbewertung ermöglicht.
- Die Fähigkeit verschiedener Fluoreszenzmarker (SFR\_R, FLAV, BF\_UV, ANTH\_RG, FERARI), Pflanzenstress und Nährstoffmangel frühzeitig zu erkennen.
- Die besondere Fähigkeit durch den FLAV-Index Rückschlüsse auf das Hormongleichgewicht und somit auf den Verzweigungsstatus von Spross und Wurzel zu schließen.
- Die Sensitivität der Indizes gegenüber Umweltfaktoren wie Temperatur, Lichtintensität und -qualität, was eine gezielte Anpassung von Pflegemaßnahmen erlaubt.
- Die Eignung der Methode für Langzeitmonitoring und Trendanalysen zur Entwicklung von Pflegestrategien.

Die MFM-Technologie bietet somit das Potenzial für ein datengesteuertes, präzises Rasenmanagement, das den Anforderungen moderner Sportanlagen gerecht wird. Sie ermöglicht eine proaktive, wissenschaftlich fundierte Herangehensweise an die Rasenpflege, die zur Verbesserung der Spielfeldqualität, Reduzierung von Pflegekosten und Erhöhung der Nachhaltigkeit im Stadionmanagement beitragen kann.

## Summary

Non-contact multiparametric fluorescence measurements (BF-MFM) such as the MULTIPLEX® are a promising technology for professional turf management in sports stadiums and golf courses. This non-invasive method enables the simultaneous measurement of several physiological parameters of turf plants under different environmental conditions. The study shows that the MFM technology is particularly suitable for outdoor applications due to its functionality under various light conditions. Other parameters such as silica sand applications, turf systems and turf mixtures need to be considered in the evaluation. Key findings of the study include:

- A strong correlation ( $R^2 = 0.90$ ) between the FRF\_G index and the visually assessed coverage measure, providing an objective quality assessment.
- The ability of various fluorescence markers (SFR\_R, FLAV, BF\_UV, ANTH\_RG, FERARI) to detect plant stress and nutrient deficiency at an early stage.
- The special ability of the FLAV index to draw conclusions about the hormone balance and thus the branching status of the shoot and root.
- The sensitivity of the indices to environmental factors such as temperature, light intensity and quality, which allows targeted adaptation of care measures.
- The suitability of the method for long-term monitoring and trend analyses for the development of care strategies.

MFM technology therefore offers the potential for data-driven, precise turf management that meets the requirements of modern sports facilities. It enables a proactive, science-based approach to turf maintenance that can help improve pitch quality, reduce maintenance costs and increase sustainability in stadium management.

## Einführung

### Qualitätsmanagement von Sportrasen

Die Anforderungen an Sportrasen in Stadien und Golfanlagen haben sich in den letzten Jahren signifikant erhöht, was zu intensiveren Pflegemaßnahmen und technischen Innovationen geführt hat (PORNARO et al., 2016; MATHEW et al., 2021). Als Reaktion darauf entwickelte sich das Konzept des Präzisen Rasenmanagements (PTM) (CARLSON et al., 2022), welches neben visuellen Qualitätsmerkmalen zunehmend Analysen für Nährstoffverfügbarkeit, Düngestatus und Pflanzengesundheit einbezieht. Traditionelle destruktive Methoden zur Analyse von Pflanzengewebe bieten zwar hohe Genauigkeit, sind jedoch zeit- und arbeitsaufwendig (CHOWDHURY et al., 2024). Im Gegensatz dazu ermöglichen nicht-destruktive Methoden eine schnelle und wiederholbare Datenerfassung ohne Beschädigung des Pflanzengewebes. In den letzten Jahrzehnten gewann die Nutzung spektraler Eigenschaften von Pflanzengewebe zur nicht-invasiven Analyse von Pflanzeninhaltsstoffen an Bedeutung. Diese Methoden ermöglichen es, visuell nicht erkennbare Stressreaktionen frühzeitig zu erfassen. Besonders vielversprechend sind die UV-induzierte Fluoreszenz (CEROVIC et al., 2002; GHOZLEN et al., 2010) und Indizes basierend auf Chlorophyll-Reflektionen im Nahinfrarotbereich (NIR) (CATUREGLI et al., 2016). Traditionelle Chlorophyll-Messgeräte wie SPAD und Greenseeker beurteilen hauptsächlich den Blatt-N-Gehalt und benötigen oft direkten Blattkontakt (PADILLA et al., 2018). Neuere Entwicklungen umfassen kontaktlose Sensoren, multispektrale und hyperspektrale Systeme sowie thermische Sensoren, die verschiedene Aspekte der Pflanzenphysiologie erfassen können (CARAMÉS, 2015). Unter diesen Technologien zeichnen sich berührungsfreie multiparametrische Fluoreszenz-Messungen (BF-MFM) durch ihre vielseitigen Anwendungsmöglichkeiten aus. Diese Systeme ermöglichen die simultane Erfassung mehrerer Parameter wie Chlorophyllgehalt, Flavonoide, Anthocyane und Phenolsäuren (LEJEALLE et al., 2010; TUCCIO et al., 2011). BF-MFM-Sensoren wie der Multiplex sind

unter verschiedenen Lichtbedingungen einsetzbar und zeigen sich unempfindlich gegenüber Bodensignalen, was sie besonders für Freilandanwendungen qualifiziert (HEEGE et al., 2008). Im Kontext des Präzisen Rasenmanagements (PTM) bietet das BF-MFM-Verfahren erhebliches Potenzial für nicht-invasive Echtzeit-Messungen. Es ermöglicht die Optimierung von Düngeprogrammen und kann zur Verbesserung der Rasenqualität sowie zur Steigerung der Stressresistenz beitragen (AGATI et al., 2013). Die Indizes bezüglich Chlorophyll und sekundärer Pflanzenstoffe sind besonders wertvoll für die Pflege von Sportrasen, wo eine fein abgestimmte Balance zwischen Nährstoffversorgung, Wuchsverhalten, Scherfestigkeit, Farbe und Widerstandsfähigkeit gegen Stress und Krankheiten entscheidend ist (AGATI et al., 2015).

### Primäre und sekundäre Pflanzenstoffe

Primäre und sekundäre Pflanzenstoffe spielen eine entscheidende Rolle in der Pflanzenphysiologie. Während primäre Metaboliten wie Chlorophyll für grundlegende Lebensprozesse essenziell sind, erfüllen sekundäre Metaboliten, insbesondere Phenolsäuren und Flavonoide, vielfältige Funktionen bei der Anpassung an Umwelt- und Stressbedingungen (HARBORNE, 2000; PIERGIORGIO et al., 2003). In Sportrasenarten wurden diverse Phenolsäuren und Flavonoide identifiziert, darunter Flavonole wie Rutin- und Kämpferol-Derivate (FAIVRE-RAMPANT et al., 2008; QAWASMEH et al., 2012; LIPIŃSKA et al., 2019). Flavonoide fungieren als Antioxidantien in Stressreaktionen und beeinflussen den pflanzlichen Hormonhaushalt (RICE-EVANS et al., 1997; SHARMA et al., 2019). Eine besonders wichtige Funktion ist die Hemmung des Auxintransports durch bestimmte Flavonoide, was die Cytokinin-Reaktionen und das Wachstumsverhalten von Spross und Wurzel fördert (WINKEL-SHIRLEY, 2001; PONCE et al., 2009). Diese Wechselwirkung ist für das Rasenmanagement von großer Bedeutung, da sie Auswirkungen auf Bestockung und Wurzelbildung hat. Pflanzenhormone wie Auxine und Cytokinine interagieren auf komplexe Weise und regulieren Wachstums- und Entwicklungsprozesse (WERNER und SCHMÜLLING, 2009; KUREPA und SMALLE, 2022). Cytokinine fördern den Austrieb von Achselknospen und die Verzweigung, während Auxine das Spross-Längenwachstum und die Lateralwurzelbildung stimulieren (MOK und MOK, 2001; MÜLLER und LEYSER, 2011). Das Gleichgewicht zwischen diesen Hormonen ist entscheidend für

die Anpassungsfähigkeit der Pflanze an unterschiedliche Umweltbedingungen. Das Verhältnis zwischen den Pflanzenhormonen Auxin und Cytokinin spielt eine entscheidende Rolle für viele Wachstums- und Entwicklungsprozesse in Pflanzen. Ein hohes Auxin/Cytokinin-Verhältnis zum Beispiel fördert die Zellteilung und Aufrechterhaltung des Sprossmeristems, während ein niedriges Verhältnis die Zelldifferenzierung und Organbildung begünstigt. Dieses Zusammenspiel reguliert die Balance zwischen Stammzellerhaltung und Organogenese. Ein hohes Cytokinin/Auxin-Verhältnis verzögert die Alterung von Blättern, indem es den Chlorophyllabbau hemmt. Um das Hormonverhältnis gezielt zu verändern, kann zum Beispiel mit dem Umweltfaktor Licht auf das Verhältnis eingewirkt werden. Mit gezielter Verwendung von Licht in bestimmten Wellenlängen lässt sich per Biosynthese Cytokinin stimulieren und Auxin hemmen. Das daraus entstehende Cytokinin/Auxin-Verhältnis kann gezielt zur Seitentriebbildung, Förderung des Wurzelwachstums oder Längenwachstums genutzt werden (CASHMORE, 2003). Die BF-MFM-Methode ermöglicht die Messung von Chlorophyll, Phenolsäuren und Flavonoiden als wichtige Marker für Pflanzengesundheit und -qualität. Durch die Erfassung des Flavonoid-Gehalts lassen sich möglicherweise Rückschlüsse auf den Hormonstatus des Rasens und damit verbundenes Vermögen zur Bestockung und Wurzelbildung ziehen (TU et al., 2010). Dies eröffnet neue Möglichkeiten für ein präzises Rasenmanagement, bei dem der physiologische Zustand der Pflanzen durch gezielte Belichtungs- und Temperaturstrategien gesteuert werden kann.

Die vorliegende Studie untersucht die Anwendbarkeit und Effizienz dieser nicht-destruktiven Methoden im Kon-

text des präzisen Rasenmanagements, mit dem Ziel, ihre Eignung für die frühzeitige Erkennung von Stressfaktoren und die Optimierung von Pflegemaßnahmen zu evaluieren.

## Material und Methoden

### Pflanzenmaterial und Versuchssysteme

In den Freilandexperimenten wurde in zwei Außenbeeten mit Bodenheizung auf einer 20 cm starken Rasensubstratschicht ein Sportrasen-Rollrasen der Firma Schwab mit folgender Mischung aufgebracht: *Lolium perenne*: 20 % „Barrage“, 10 % „Esquire“, 10 % „Conrad 1“, *Poa pratensis*: 20 % „Compact“, 20 % „Miracle“, 20 % „Yvette“. VAR-1 war permanent der Sonne ausgesetzt, VAR-2 wurde zu 80 % verschattet und mit 200 µmol/m<sup>2</sup>s LED-(Rot, Blau) für 16 h/Tag zusätzlich belichtet.

Die Indoorversuche wurden in Klimakammern von Vötsch Typ: VUZPHL sowohl mit der Rollrasenmischung als auch mit *Poa pratensis* „Julius“, einer *Lolium perenne* Mischung und *Festuca rubra* durchgeführt. Je 100 Korn der Reinsaat wurden in Rasen-Substrat (Sand/Torfsubstrat B Potclay med cvs Floragard 1:1 (v/v) zzgl. 5 g/L Osmocote) in Töpfen 11 cm Ø ausgesät und im Gewächshaus bei 18 °C vorkultiviert und mehrfach geschnitten (3 cm) bevor sie in die Versuchssysteme überführt werden. Die Düngung mit 1 ‰ Ferty® 2 MEGA wurde einmal wöchentlich durchgeführt. Im Kistensystem wurden je 6 Aussaattöpfe in mit Sand gefüllten, beheizbaren Kunststoffkisten (Simulation einer Bodenheizung) in Klimakammern kultiviert. In allen Klimakammer-Experimenten wurde mit 200 µmol/m<sup>2</sup>s für 16 h belichtet, je nach Versuchsfrage unter verschiedenen Temperaturen und Lichtspektren.

Emission (nm)	Anregung (nm)				
	UV (335)	UV (375) <sup>†</sup> *	B (470)	G (516)	R (625)
Rot RF (685)	RF_UV	RF_UV <sup>†</sup>	RF_B	RF_G	RF_R
Dunkelrot FRF (750)	FRF_UV	FRF_UV <sup>†</sup>	FRF_B	FRF_G	FRF_R
Blau BF (400)	BF_UV	BF_UV*	BF_B	GF_G	BF_R*
Blau-Grün BGF (447)*		BGF_UV*	BGF_B*	BGF_G*	BGF_R*
Gelb YF (590) <sup>†</sup>		YF_UV <sup>†</sup>	YF_B <sup>†</sup>	YF_G <sup>†</sup>	YF_R <sup>†</sup>

Das MULTIPLE X® -System ist auch in folgenden Modifikationen erhältlich: :

<sup>†</sup> Gelb YF (590) ersetzt die Blau BF (400)-Emission mit Anregung-Det. UV(375) statt UV (335)

\* Blau-Grün BGF (447) ersetzt die Blau BF (400)-Emission mit Anregung-Det. UV(375) statt UV (335)

Tab. 1: Signalspezifikation des MULTIPLEX® bzw. MULTIPLEX® 330®-Systems. Anregungs-Emissions-Matrix der Fluoreszenzsignale im MULTIPLEX®-System. Jedes Signal wird durch eine Kombination aus Emissions- und Anregungslichtfarbe codiert. Die Nomenklatur folgt dem Schema „Emission\_Anregung“. Zentrale Wellenlängen (in nm) sind in Klammern angegeben.

## Messungen

Frischmasse wurde gewogen (Schnitt auf 3 cm Pflanzenlänge). Die Temperatur-Messungen erfolgten mittels Thermoelementen NiCr-Ni (Typ K) – Bodentemperatur in 10 cm Tiefe; Lufttemperatur 7 cm über dem Pflanzenbestand. Die Substratfeuchte wurde mittels Tensiometer (T13709) erfasst. Bewässert wurde bei einem Wert unter -120 hPa Saugspannung. Die Lichtmessungen erfolgten mittels Quantum Sensor Q 17017 der Firma LI COR.

Für die BF-MFM wurden zwei unterschiedliche Sensoren verwendet, MULTIPLEX® und MULTIPLEX® 330-Sensor (FORCE-A, Orsay, Frankreich). Diese tragbaren, batteriebetriebenen Fluorimeter nutzten Licht-emittierende Dioden (LEDs) als Lichtquellen in verschiedenen Spektralbereichen, die zeitgleich verschiedene primäre und sekundäre Pflanzeninhaltsstoffe in spezifischen Farben zur Fluoreszenz anregen. Drei synchronisierte Photodioden-Detektoren mit Interferenzfiltern erfassen diese farbigen Emissions-Signale (Tabelle 1).

Die Sensoren erfassen diese spezifischen Fluoreszenzemissionen, die sich zur Gehalts-Abschätzung (Indices) verschiedener Pflanzeninhaltsstoffe nutzen lassen und in unserer Studie für mögliche Interpretationen (Marker) genutzt werden. Die Bedeutung und Bewertung der einzelnen Indizes und daraus abgeleiteten Index-Werten wurden schon mehrfach untersucht und für diese Studie gemäß Tabelle 2 übernommen (AGATI et al., 2007).

Für den Chlorophyll-Index (SFR\_R) werden die Chlorophyllmoleküle im Mesophyll angeregt, wobei der Gehalt ein Indikator für Stressfaktoren wie Trockenheit, Salinität oder Lichtstress gilt (LEUFEN et al., 2014; KAUTZ, 2016). Flavonoide in der Epidermis absorbie-

ren einen Teil Emissions-Lichts, wodurch sich die Lichtintensität auf Chlorophyllebene reduziert. Entsprechend reduziert sich die Chlorophyllfluoreszenz proportional zum Flavonoidgehalt (AGATI et al., 2005; GOULAS et al., 2004). Der FLAV-Index quantifiziert diese Absorption für die Stoffgruppe der Flavonole (CEROVIC et al., 2012), der ANTH\_RG-Index für die Anthocyanine (GHOZLEN et al., 2010; AGATI et al., 2007). Der Stickstoff-Balance-Index (NBI) kombiniert die Messungen von Chlorophyll und Flavonolen und liefert einen genaueren Indikator für den N-Stickstoffstatus der Pflanze (CARTELAT et al., 2005; CEROVIC et al., 2015). Der BF\_UV-Index wurde ursprünglich zur Messung von Resveratrol in Weinpflanzen entwickelt, spiegelt aber aufgrund vergleichbarer Absorptionsmerkmale die Hydroxymitsäuren in Rasengräsern wider (LATOUCHE et al., 2015). Diese Methode ermöglicht eine simultane, nicht-invasive Messung mehrerer physiologischer Parameter, die Aufschluss über den Gesundheitszustand und die Stressreaktionen der Rasenpflanzen geben. Das MFM-MULTIPLEX®-System erfordert aufgrund seiner signifikanten Distanzabhängigkeit zur Pflanzenoberfläche eine standardisierte Messdurchführung. Zudem bietet es Anpassungsmöglichkeiten in der Geräteausführung (je nach Gerät verschiedene Emissions- und Detektor-Wellenlängen), Gerätesensitivität (drei Konfigurationen) und der Messfläche (zwei Blendenoptionen sowie blendenlose Messungen), was die Vergleichbarkeit und Flexibilität der Datenerfassung erhöht. Diese Variablen müssen bei Vergleichsanalysen sorgfältig berücksichtigt werden, um die Validität und Vergleichbarkeit der erfassten Daten zu gewährleisten.

## Datenanalyse

Die Daten werden als Mittelwerte ± Standardabweichung präsentiert und

mittels zweifacher Varianzanalyse (ANOVA) analysiert, um Mittelwerte bei einem Signifikanzniveau von  $p < 0,05$  zu vergleichen. Alle statistischen Analysen wurden in Excel 365 durchgeführt.

## Ergebnisse

### Bestimmung des Bedeckungsmaßes

Der FRF\_G-Index erwies sich als zuverlässiger Indikator für das Bedeckungsmaß. Sogar bei der Mischung von Messungen an *L. perenne*- und *F. rubra*-Jungpflanzen, zeigte der FRF\_G-Index eine starke Korrelation mit der Pflanzendichte (Abbildung 1-A). Die physiologische Entwicklung der Pflanzen, insbesondere die Verbreiterung der Blattspreiten von einem schmalen juvenilen zu einem breiteren adulten Stadium, spiegelte sich in den Messwerten von Abbildung 1-B wider. Für eine präzise Bestimmung der Bestockung mittels FRF\_G-Index ist daher eine Differenzierung zwischen Jungpflanzen und adulten Pflanzen sowie eine Arten- und Sorten-Unterscheidung erforderlich. Sowohl für juvenile als auch für adulte Pflanzenstadien zeigte der FRF\_G-Index eine hohe Korrelation mit der Bestockung ( $R^2 > 0,90$ ).

### Einfluss von Temperatur

Adulte *Lolium perenne*-Pflanzen wurden in dem Kisten-System mit Bodenheizung in einer Klimakammer kultiviert, um die Bedingungen eines modernen Fußballstadions zu simulieren. Die Wurzelttemperatur wurde konstant über 12 °C gehalten, während die Lufttemperatur variierte (Abbildung 2). Die wöchentlich ermittelte Wachstumsrate nahm kontinuierlich von 18 °C bis -2 °C ab (A). Bei feineren Temperaturabstufungen wurde ein Schwellenwert von 8 °C Lufttemperatur für die Wachstumsrate identifiziert (Daten nicht gezeigt). Die Bodenheizung verhinderte eine vollständige Wachstumsunterbrechung. Der Wassergehalt im Blattgewebe zeigte jedoch eine signifikante Abnahme zwischen 10 °C und 5 °C (B), was den beobachteten Schwellenwert bestätigt. Mit sinkenden Lufttemperaturen wurden folgende Veränderungen der Fluoreszenzmarker beobachtet:

- I. Anstieg des Chlorophyll-Markers SFR\_R-Index (C);
- II. Zunahme des Verzweigungsmarkers FLAV-Index (F);
- III. Erhöhung des Stress-Marker-2 FERARI-Index (H);
- IV. Abnahme des Hydroxymitsäuren-Markers BF\_UV-Index und des Stress-Markers-1 ANTH\_RG-Index

Index	Bestimmungsformeln	Referenzen (R <sup>2</sup> )
SFR_R Chlorophyll-Index	$SFR\_R = FRF\_R / RF\_R$	AGATI et al. (2013); LEUFEN et al. (2014).
NBI_R N-Balance-Index	$NBI\_R = FRF\_UV / RF\_R$	GHOZLEN et al. (2010); LI et al., (2013).
FLAV Flavonol-Index (Verzweigungs-Marker)	$FLAV = \log(FRF\_R/FRF\_UV) - \log(std\_FRF\_R/std\_FRF\_UV)$	TEAL et al. (2006); LI et al. (2013); AGATI et al. (2011, 2013).
ANTH_RG Anthocyan-Index (Stress-1-Marker)	$ANT = \log(FRF\_R/FRF\_G) - \log(std\_FRF\_R/std\_FRF\_G)$	AGATI et al. (2007); MAXWELL und JOHNSON (2000).
FERARI Stress-2-Marker	$\log(1/FRF\_R)$	GHOZLEN et al. (2010).
BF_UV HZS-Index (Stabilitäts-Marker)	Direkter Marker	GHOZLEN et al. (2010).
FRF_UV Pflanzendichte- Index (Bedeckungs-Marker)	Direkter Marker	LATOUCHE et al. (2015).

HSZ: Hydroxymitsäure (Phenolsäure)

Tab. 2: MULTIPLEX®-Indizes, die in dieser Studien verwendeten Bedeutungen (Marker), Bestimmungsformeln sowie dessen Referenzen.

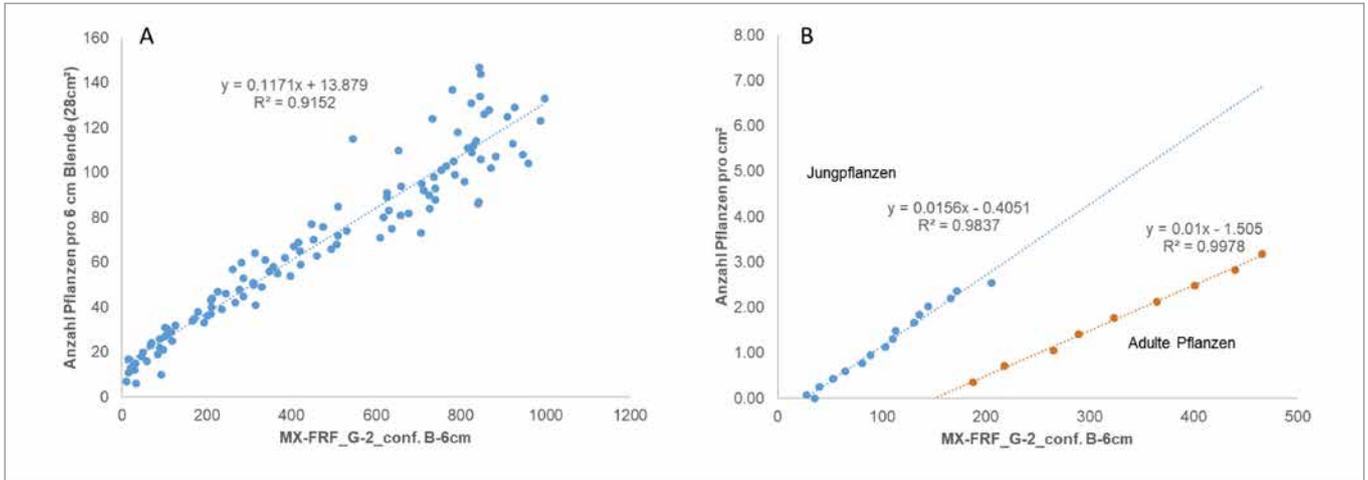


Abb. 1: Bestimmung der Bestockung mittels FRF\_G-Index bei Rasengräsern. A: Korrelation für Jungpflanzen (6 Wochen, 3 cm Höhe) von *Lolium perenne* und *Festuca rubra*. B: Korrelation von FRF\_G-Index versus Pflanzenanzahl pro cm² für juvenile (6 Wochen = blau) und adulte (12 Wochen = orange) *Lolium perenne*-Pflanzen.

zwischen 18 °C und 5 °C, gefolgt von einem Anstieg bei weiterer Temperaturabsenkung (E),

V. Gegenläufiges Verhalten des Blatt-N-Markers NBI-1-Index zu BF\_UV (D).

### Einfluss von Lichtspektren in Kombination mit Lufttemperaturen

Lichtintensität und -qualität beeinflussen den Metabolismus von Pflanzenstoffen, wodurch Wachstum, Phäno-

typ, Stabilität und Pflanzengesundheit moduliert werden. Zur Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Temperatur und Lichtbedingungen, wurden adulte *L. perenne*-Pflanzen verschiedenen Temperatur-Licht-Kombinationen ausgesetzt:

- I. Luft-/Wurzel-Temperatur: 18/18 °C
- I-A. LED-weiß, I-B LED-rot/blau (1:1);
- II. II Luft-/Wurzel-Temperatur: 5/12 °C
- II-A. LED-weiß, I\_B LED-rot/blau (1:1)

Die Ergebnisse zeigten Folgendes (Abbildung 3):

1. Chlorophyll-Marker SFR\_R-Index und Verzweigungs-Marker FLAV-Index waren bei 5 °C Lufttemperatur signifikant höher als bei 18 °C (A, C).
2. Der FLAV-Index wurde bei beiden Temperaturen durch den höheren Blaulichtanteil der LED-R:B (1:1) im Vergleich zu LED-weiß zusätzlich stimuliert. Beim SFR\_R-Index

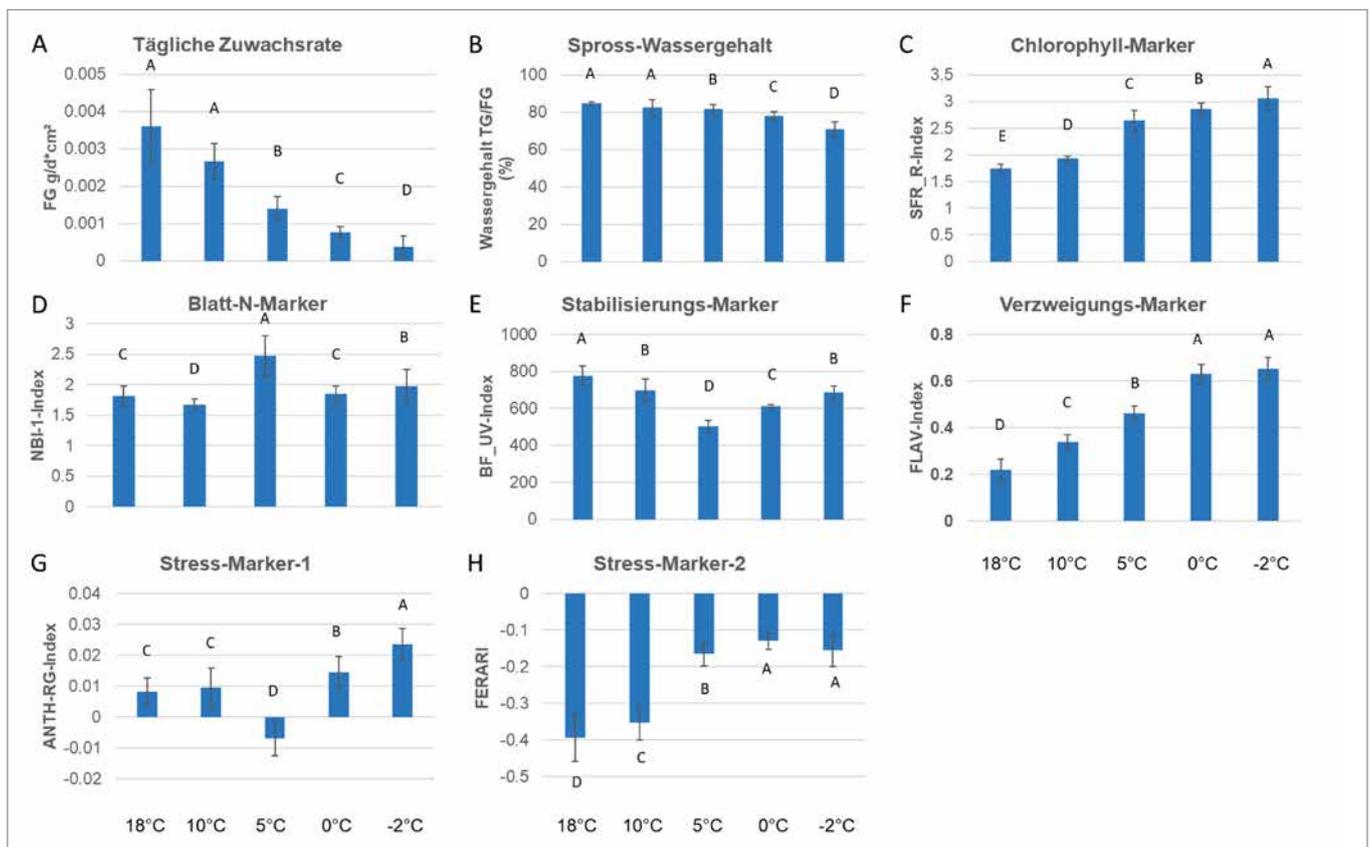


Abb. 2: Temperatureinfluss auf Wachstumsparameter und Fluoreszenzindizes 12 Wochen alter *Lolium perenne*-Pflanzen. Effekte einer jeweils sechsstägigen Temperaturbehandlung (Luft/Wurzel: 18/18, 10/12, 5/12, 0/12, -2/12 °C) auf: (A) Zuwachsrate, (B) Wassergehalt, (C-H) Verschiedene Multiplex-Fluoreszenzindizes. Kultivierungsbedingungen: 16 h Photoperiode, 200 µmol/m²s LED-Weißlicht. Dargestellt sind Mittelwerte ± Standardabweichung (n = 15); unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (α = 5 %).

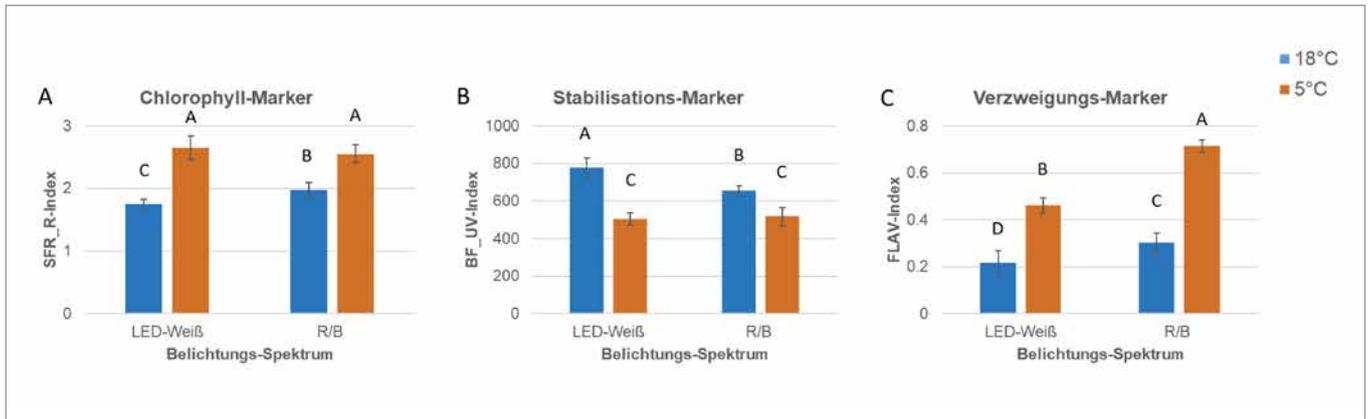


Abb. 3: Interaktive Effekte von Lichtqualität und Temperatur auf Multiplex-Fluoreszenzindizes bei 12 Wochen alten *Lolium perenne*-Pflanzen. Dargestellt sind Mittelwerte  $\pm$  Standardabweichung (n = 15); unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ( $\alpha = 5\%$ ).

- war dieser Effekt nur bei 18 °C messbar.
- Der Stabilisations-Marker BF\_UV-Index, indikativ für den Hydroxymizinsäure-Status, zeigte den niedrigsten Wert bei 5 °C (B). Dies könnte auf einen erhöhten Verbrauch als Substrat für die Flavonol-Synthese zurückzuführen sein.
  - Bei 18 °C und LED-R:B (1:1) Beleuchtung wurde eine erhöhte Flavonol-Bildung beobachtet, was den reduzierten BF\_UV-Index erklären könnte.

### Einfluss von Umweltbedingungen auf Wachstum und Inhaltsstoffe

Die Untersuchungen unter Freilandbedingungen, im Gewächshaus (GWH) und in der Klimakammer (PAR) zeigten signifikante Auswirkungen von Lufttemperatur, Lichtintensität und Lichtqualität auf pflanzliche Inhaltsstoffe und das Wachstum von Rollrasen (Tabelle 3). Unter Freilandbedingungen war das Bestockungsmaß analog zu dem Flavonol-Marker FLAV-Index bei direktem Sonneneinfluss signifikant höher als im Gewächshaus mit UV-Abschirmung (A-

oben). Diese Ergebnisse wurden durch ein kontrolliertes Experiment in der Klimakammer bestätigt, bei dem Blau-Licht als abgeschwächtes UV-Signal ebenfalls eine vermehrte Bestockung induziert (A-unten). Die niedrigsten Werte für Bestockung parallel zum FLAV-Index zeigten Pflanzen unter Rot-Licht.

Die Freilandversuche offenbarten zusätzliche Effekte (B). Während die höchsten Wachstumsraten in den Sommermonaten verzeichnet wurden, stagnierte das Wachstum trotz Bodenhei-

A	Indizes	Bestockung / cm <sup>2</sup>	FLAV	CHL (SFR_G)	ANTH_RG		
<b>Freiland / GWH</b>						<i>(Sommer)</i> Freiland mit natürlicher Besonnung, Gewächshaus (GWH) 1x (20%) schattiert und 3x (60%) schattiert	
	Freiland	7.51 A 0.73	2.062 A 0.35	2.986 A 0.1	0.845 A 0		
	GWH 1x sch.	2.88 B 0.77	1.182 B 0.15	2.158 B 0.25	0.805 A 0.08		
	GWH 3x sch.	2.93 B 0.33	0.969 C 0.04	1.717 C 0.07	0.806 A 0.02		
<b>Klimakammer</b>						<i>Klimakammer (PAR), 18°C, 200 <math>\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}</math> für 16 h/Tag mit LED-Weiß, -Blau, -Rot</i>	
	LED-Weiß	4.74 A 0.75	1.104 B 0.15	2.943 A 0.55	0.688 C 0.04		
	LED-Blau	4.64 A 0.7	1.265 A 0.03	2.839 B 0.26	0.766 A 0.04		
	LED-Rot	4.13 B 0.43	1.119 B 0.04	2.545 B 0.29	0.719 B 0.05		
B	Indizes	FLAV	CHL (SFR_G)	ANTH_RG	HZ (BF_UV)	Blatt-N (NBI-1)	FERARI
<b>Freiland / Sommer</b>							
	Sonne	0.854 C 0.32	2.918 A 0.75	-0.009 D 0.02	165 B 39	0.137 D 0.09	0.062 C 0.11
	LED: B/R (1/1)	0.496 D 0.17	2.496 B 0.74	0.006 C 0.02	216 B 62	0.189 C 0.06	0.213 A 0.19
<b>Freiland / Winter</b>							
	Sonne	1.083 B 0.1	0.937 C 0.11	0.395 B 0.01	178 B 37	0.206 A 0.04	0.076 B 0.1
	LED: B/R (1/1)	1.109 A 0.15	0.906 D 0.12	0.413 A 0.01	224 A 53	0.193 B 0.07	0.034 D 0.1
<i>Freilandversuch Sommer / Winter (mit 12°C Wurzeltemperatur.)</i>							
<i>I. natürlicher Besonnung</i>							
<i>II. 80% Schattierung zzgl. LED-Zusatzbelichtung (Blau-Rot-(1:1), 200 <math>\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}</math>, 16h/Tag)</i>							

Tab. 3: Variation der Multiplex-Fluoreszenzindizes bei Rollrasen unter verschiedenen Licht- und Klima-Bedingungen. Dargestellt sind Mittelwerte und Standardabweichung (SD); unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ( $\alpha = 5\%$ ).

zung im Spätherbst (November). Dieser Herbst-Stagnation konnte jedoch durch den Einsatz von Zusatzlicht (LED B/R (1:1)) signifikant entgegengewirkt werden (Daten nicht gezeigt). Die Chlorophyll-Marker (SFR\_R-Index) waren im August niedriger als Anfang November, wohingegen der Blatt-N-Marker einen gegenläufigen Trend aufwies. Es ist möglich, dass neben der absoluten Chlorophyll-Konzentration auch eine durch hohe Temperaturen verminderte Chlorophyll-Aktivität den SFR\_G-Index beeinflusst. Der Hydroxymethylsäure-Marker (BF\_UV) zeigte sowohl im Sommer als auch im Winter niedrigere Werte unter direktem Sonnenlicht als unter schattierten und künstlich belichteten Flächen. Der FLAV-Index wurde im Winter durch Kältereiz deutlich induziert. Im Sommer erfolgte eine Induktion des FLAV-Index unter direktem Sonnenlicht, was seine Funktion als UV-Schutzverbindung unterstreicht. Bei dem Schutzpigment Anthocyan schien der Kältereiz einen noch größeren Einfluss zu haben als der UV-Reiz des Sonnenlichts, da der ANTH-RG-Index seinen Höchstwert im Winter ohne Sonnenlichteinfluss erreichte. Der FERARI-Index, ein Indikator für Pflanzenstress, zeigte in allen Experimenten unauffällige Werte, was auf eine gute Pflanzengesundheit und das Fehlen von Befall hindeutet.

### Beurteilung von Sportstadien mittels Punkt- und Flächenmessungen

Die Qualität des Spielfeldes wurde durch Punkt- und Flächenmessungen unter Verwendung verschiedener Fluoreszenzmarker evaluiert. Das Bedeckungsmaß, ein anerkannter Qualitätsmarker, wurde für 24 Punkte des Spielfeldes visuell beurteilt und lässt sich sehr gut ( $R^2 = 0,90$ ) über den MX-FRF\_G-Index abbilden (Abbildung 4-A). In Abbildung 4-B ist ersichtlich, dass an Punkten mit verminderter Pflanzendichte (rot-gelb) auch die Verzweigungs- (FLAV) und Stabilisations-Marker (BF\_UV) deutlich schlechter Schätzwerte anzeigten. Die beiden Stressmarker waren bei dieser Messung sehr unauffällig. Ein Pathogenbefall oder sonstige Pflanzenschäden waren analog dazu nicht erkennbar.

Bei den Flächenmessungen ist gut erkennbar, dass in den Bereichen, in denen der Verzweigungs-Marker (FLAV) eher als vermindert eingestuft wurde (gelbe Bereiche an den Spielfeldrändern), eine Anreicherung des Stabilisations-Markers (BF\_UV) bzw. Marker für Hydroxymethylsäuren zu erkennen ist (Abbildung 4-C). Scheinbar reichern sich die Hydroxymethylsäuren an, da sie als Substrat für die Synthese von Flavonole nicht abgerufen werden. Am nördlichen Spielfeldrand ist die verminderte

Flavonol-Akkumulation durch einen Verschattungsprozess zu erklären. Der verminderte Gehalt im südlichen Bereich könnte auf eine intensive Belichtung mit Rot-dominierendem Spektrum zurückzuführen sein.

### Diskussion

Die Qualitätssicherung von Sportrasen in professionellen Stadien und Golfanlagen unterliegt stringenten Anforderungen, um konsistente Spielbedingungen durch optimale Rasendichte und Stabilität zu gewährleisten (WOLSKI et al., 2021). In diesem Kontext etabliert sich das Konzept des Precision Turf Management (PTM), welches innovative Analysesysteme in bewährte Kulturverfahren integriert, um Störfaktoren frühzeitig zu erkennen und ihnen mit gezielten Kulturmaßnahmen entgegenzuwirken. Die in dieser Studie präsentierten Ergebnisse demonstrieren das erhebliche Potenzial der verschiedenen Indizes, die durch Berührungs-Frei-Multiparametrische-Fluoreszenz-Messungen (BF-MFM) als Instrument zur Qualitätsverbesserung gewonnen werden können. Durch diese nicht-invasiven Analysen der Pflanzenphysiologie bietet BF-MFM eine umfassende und objektive Methode zur Beurteilung der

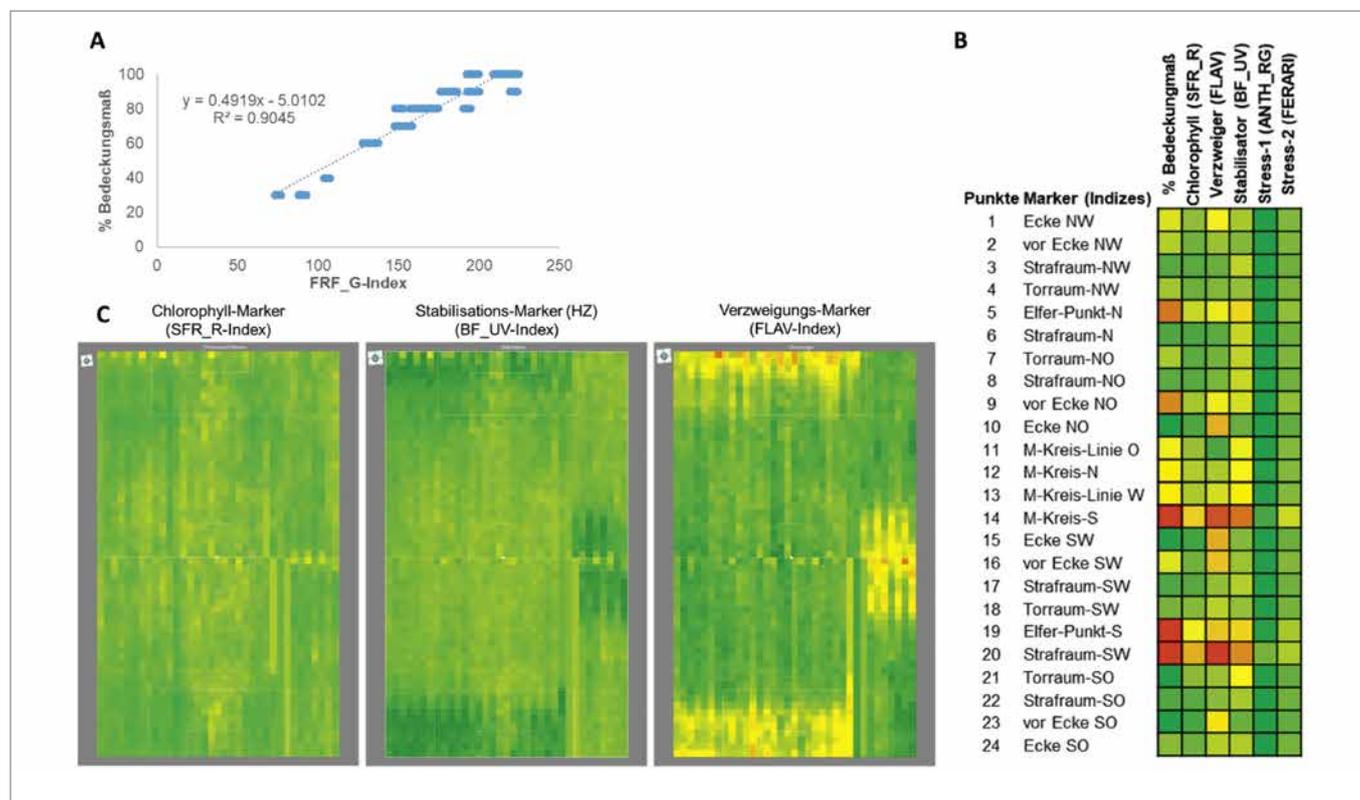


Abb. 4: Anwendung der MULTIPLEX®-Fluoreszenzanalyse zur Bewertung der Rasenqualität in einem Sportstadion im Frühsommer. A: Korrelation zwischen dem MULTIPLEX®-Index FRF\_G und visuell geschätztem Bedeckungsmaß, B: Verteilung ausgewählter MULTIPLEX®-Indizes an spezifischen Messpunkten im Stadion (Punktmessungen), C: Räumliche Verteilung der MULTIPLEX®-Indizes über die Spielfeldfläche (Flächenmessungen). Farbkodierung nach Ampelsystem (rot: unzureichend, gelb: mittelmäßig, grün: optimal) zur Visualisierung der Rasenqualität.

Rasenqualität und des physiologischen Status der Pflanzen, insbesondere seines Bestockungs- und Bewurzelungsvermögens durch die Möglichkeit der Abschätzung des Auxin/Cytokinin-Verhältnisses mittels FLAV-Index.

### **Präzise Quantifizierung der Rasenbedeckung**

Der FRF\_G-Index, mit einer bemerkenswerten Korrelation ( $R^2 > 0,90$ ), eignet sich als zuverlässiges Instrument zur objektiven Beurteilung des Bedeckungsmaßes. Diese datengestützte Methode kann subjektive Einschätzungen ersetzen und ermöglicht Stadionmanagern eine kontinuierliche, präzise Überwachung des Spielfeldzustands. Für eine optimale Bestimmung dieser Größe müssen jedoch Veränderungen des physiologischen Rasen-Alters und der Entwicklungen bezüglich der Artenmischung regelmäßig angepasst werden.

### **Frühzeitige Detektion von Pflanzenstress und Nährstoffdefiziten**

Die vielfältigen Signale, die die BF-MFM-Systeme mit ihren diversen Modifikationsmöglichkeiten mit sich bringen, werden mit Hilfe von KI-Auswertungen in Zukunft sicherlich noch weitere hilfreiche Interpretationen der Indizes und Bedeutung ans Licht bringen. Indizes bezüglich Chlorophyll- und N-Gehalt sowie für Inhaltsstoffe wie Flavonole und Anthocyane wurden schon vielfach als gute Marker bestätigt, sowohl bei diversen Kulturpflanzen als auch bei Rasenpflanzen. Als Biomarker ermöglichen sie eine umfassende Beurteilung der Pflanzenvitalität, indem sie das kritische Gleichgewicht zwischen Fotosyntheseleistung und dem Metabolismus sekundärer Pflanzenstoffe quantifizieren. Die signifikanten Veränderungen dieser Indizes in Reaktion auf Klimafaktoren wie Temperatur, Licht-Quantität und -Qualität korrelieren mit Auswirkungen auf Biomasseproduktion, Bestockung und Wurzelentwicklung (auch Rhizom- und Stolon-Bildung). Diese Zusammenhänge eröffnen Möglichkeiten für die optimierte Abstimmung von Dünge-, Heiz- und Belichtungsstrategien sowie potenziell sogar UV-Behandlungen.

Bei vielen Untersuchungen steht die Nährstoffversorgung im Mittelpunkt. Bereits LEJEALLE und EVAÏN (2010) bestätigten bei Sport- und Golfrasen eine starke positive Korrelation ( $R^2 > 0,9$ ) zwischen dem SFR\_R-Index und dem Blatt-Stickstoffgehalt (%). Da dieser Index jedoch anfällig gegenüber Störgrößen ist, eignet sich der NBI-index besser (LEJEALLE und EVAÏN, 2010; AGATI et al., 2013). Um diese Störgrößen zu

minimieren, müssen äußere Rahmenbedingungen wie Rasenarten bzw. Phänotypen, klimatische Unterschiede und potenzielle Störfaktoren für die Interpretation der Indizes berücksichtigt werden. Dabei wird die Rasenfarbe primär von klimatischen Bedingungen und erst sekundär von den Gräsermischungen beeinflusst (WOLSKI et al., 2021). Die erhöhten Chlorophyll-Werte (SFR\_R) bei niedrigeren Temperaturen in unserer Studie decken sich mit Beobachtungen von WOLSKI et al. (2021), die die höchsten Chlorophyllgehalte im Frühjahr und geringere im Sommer zeigten.

### **Innovative Beurteilung der Pflanzen-Architektur und -Stabilität**

Die Möglichkeit, auch weitere Indizes zu nutzen, um zerstörungsfrei Einblicke in den Pflanzenstatus zu erlangen, eröffnet vielseitige Möglichkeiten für das Rasenmanagement. Durch die BF\_UV- und FLAV-Indizes kann sowohl der Status der Zellwandstabilität als auch das Potenzial zur Bestockung und Wurzelverzweigung abgeschätzt werden. Umweltfaktoren wie Licht, Temperaturen und Kulturmaßnahmen beeinflussen maßgeblich die Konzentrationen von Phenylpropanoiden in Pflanzen. Diese Verbindungen werden nicht nur innerhalb der Pflanze zwischen Spross und Wurzel transportiert (BUER et al., 2008), sondern auch direkt in den Wurzeln durch Lichteinwirkung induziert (HEMM et al., 2004). Zusätzlich haben Düngemittel und Düngerkonzentrationen einen signifikanten Einfluss auf die Bildung phenolischer Verbindungen, auch bei Sportrasen-Gräsern (ZANELLI et al., 2022). Phenolsäuren, insbesondere Hydroxymitsäuren, spielen eine doppelte Rolle in Pflanzen. Sie dienen einerseits als Substrate für die Bildung komplexerer Flavonoide wie Flavonole, andererseits sind sie essenziell für die Lignifizierung der Zellwände und damit für die strukturelle Integrität der Pflanzen (BOUDET, 2000). Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde der BF\_UV-Index in unserer Studie als „Stabilisationsmarker“ eingestuft, der den Lignifikationsstatus der Zellen und somit die Widerstandsfähigkeit des Rasens gegenüber mechanischen Belastungen z.B. durch Sportler abbildet. Es ist wichtig, die Messungen immer zur gleichen Tageszeit durchzuführen, da die Hydroxymitsäure-Konzentrationen täglichen Schwankungen unterliegen. KAGAN (2021) beobachtete beispielsweise, dass die Konzentration der Hydroxymitsäuren im Deutschen Weidelgras „Calibra“ in den Morgenstunden etwa 20 % höher war als am Nachmittag. Dies könnte auf eine beschleunigte Weitersynthese zu komple-

xeren Flavonoiden durch blaues Licht zurückzuführen sein. Der BF\_UV-Index muss in Verbindung mit dem FLAV-Index interpretiert werden, da Hydroxymitsäuren als Substrate für Flavonole dienen. Ein Anstieg des Flavonolgehalts in den Pflanzen geht zwangsläufig mit einer Abnahme des Hydroxymitsäure-Gehalts einher. Die Fähigkeit der BF-MFM-Technologie, beide Mechanismen abzubilden, zeigt sich in den gegenläufigen Reaktionsmustern beider Indizes in unserer Untersuchungsreihe. Während der FLAV-Index mit sinkender Temperatur stetig zunimmt, verläuft der BF\_UV-Index zwischen 18 °C und 5 °C gegenläufig, was die Substrat-Funktion der Hydroxymitsäuren unterstreicht. Bei Temperaturen unter 5 °C steigt der BF\_UV-Wert jedoch wieder an, was auf eine starke Induktion der Hydroxymitsäuren über ihre Substratfunktion hindeutet.

Die Präzision des FLAV-Index bei der Quantifizierung des Flavonoidgehalts wurde in verschiedenen Studien bestätigt. STEGER und TREUTTER (2011) fanden eine hohe Korrelation zu realen Analysewerten ( $R^2 = 0,93$ ) bei Äpfeln. Diese Genauigkeit ermöglicht einzigartige Einblicke in das Hormongleichgewicht der Pflanzen, insbesondere hinsichtlich der Auxine und deren Antagonisten. In den hier beschriebenen Untersuchungen konnte wiederholt ein signifikanter Zusammenhang zwischen Flavonolgehalt und Pflanzendichte bzw. Bestockungsvermögen nachweisen werden. Die Induktion des Flavonol-Index erfolgte sowohl durch Sonnenlicht – vermutlich aufgrund seines UV-Anteils – und LED-Blaulicht als auch durch niedrige Temperaturen. Die Induzierbarkeit von Flavonolen, Anthocyanen und Phenolsäuren über Pflanzen-Rezeptoren (Cryptochrom und Phototropin) durch UV-Licht und den langwelligeren Blaulicht-Bereich wurde auch bei Gräsern bestätigt (SCHOCH et al., 2001; SCHWEIGER und BERNHARDT, 2024). In *Lolium perenne* kann beispielsweise der Gesamtflavonoidgehalt durch UV-Bestrahlung um etwa 76 % erhöht werden, wobei die Konzentrationszunahme der Hydroxymitsäuren proportional zur UV-Dosis verläuft (NANGLE et al., 2015). Diese dualen Mechanismen dienen einerseits als UV-Schutz, andererseits bewirken sie eine Modulation des Pflanzenwachstums. Spezifisch führen sie zu einem verminderten Streckungswachstum (Auxin-Hemmung) bei gleichzeitiger Förderung der Bestockung (Cytokinin-Förderung), was als adaptive Wuchsregulation interpretiert werden kann (Abbildung 5).

Mehrere Studien haben gezeigt, dass Flavonole den Auxintransport in Pflanzen hemmen und somit eine Steuergröße für phänotypische Wachstumsveränderungen darstellen (BUER u. MUDAY, 2004; TAYLOR u. GROTEWOLD, 2005). Flavonoide werden schnell und in großen Mengen produziert, wenn Pflanzen verletzt werden oder Pathogenangriffen ausgesetzt sind. Diese rasche Produktion von Flavonoiden als Schutzreaktion hilft gleichzeitig dabei, das Wachstumshormon Auxin gezielt zu steuern, wodurch die Pflanze schnell und effektiv auf Umweltreize reagieren kann (BUER u. MUDAY, 2004). Auch Mähvorgänge stellen Verletzungen dar und verschieben das Hormongleichgewicht von Rasenpflanzen. Sie induzieren bestimmte Cytokinine in der Blattspreite, die vermutlich die Verzweigung der Rasenpflanzen anregen (ROCHE et al., 2017) und Alterungsprozesse hemmen, was wiederum fotosynthetische Prozesse fördert (GAN u. AMASINO, 1995).

Diese Anpassungsmechanismen manifestieren sich in saisonalen Wachstumsmodellen. Im Sommer optimieren die Pflanzen bei hohem Lichtangebot ihre Fotosyntheseleistung durch verstärkte Verzweigung, während bei Lichtmangel ein gesteigertes Längenwachstum effektiver ist. Im Winter resultiert eine Wuchsdepression aus verminderten Stoffwechselprozessen. Die durch den FLAV-Index reflektierte hormonelle Balance erweist sich als entscheidend für den Verzweigungsstatus sowohl des Wurzelsystems als auch des oberirdischen Pflanzenmaterials. Die Integration dieser Biomarker in das Rasenmanagement macht es möglich Stressfaktoren präzise zu lokalisieren, Nährstoffmängel zu quantifizieren und den physiologischen Zustand des Rasens kontinuierlich zu überwachen. Dies führt zu einer proaktiven, präventiven Rasenpflege mit verbesserter Qualität und Nachhaltigkeit.

nuierlich zu überwachen. Dies führt zu einer proaktiven, präventiven Rasenpflege mit verbesserter Qualität und Nachhaltigkeit.

### Systemanpassungen

Die Anwendung von BF-MFM-Sensorsystemen im Rasenmanagement erfordert eine sorgfältige und kontinuierliche Anpassung an die spezifischen Bedingungen des jeweiligen Standorts und die dynamische Veränderung der Rasenfläche. Für eine effektive Unterstützung des Rasenmanagements sind regelmäßige Systemadaptionen und eine differenzierte Interpretation der Messwerte unerlässlich. Rasenflächen unterliegen ständigen Veränderungen durch Faktoren wie Nachsaaten, Ontogenese und Interferenzen zwischen Pflanzen. Klima- und Pflanzen-Faktoren beeinflussen die Inhaltsstoffkonzentrationen in Rasenpflanzen und damit die Messergebnisse. Sortenunterschiede spielen dabei eine entscheidende Rolle, da das Flavonoid-Muster primär durch die genetische Variation, also die Sorte, bestimmt wird (KAGAN, 2021). CAO et al. (2017) fanden z.B. in 23 untersuchten *Lolium perenne*-Sorten deutliche Flavonoid-Unterschiede, insbesondere im Muster der Flavonole. KAGAN et al. (2019) zeigten, dass die *Lolium perenne*-Sorte „Calibra“ unter gleichen Versuchsbedingungen und bei ähnlichen Phenolmustern etwa 20 % mehr Phenolverbindungen aufwies als die Sorte „Linn“. Diese Ergebnisse unterstreichen die Notwendigkeit, sortenspezifische Referenzwerte zu etablieren und bei der Interpretation der Messdaten zu berücksichtigen. Jedoch beeinflussen auch Faktoren wie das Entwicklungsstadium, Klimabedingungen, Kulturmaßnahmen, symbiotische Verbindungen mit Endophyten und das Vorhandensein von

Krankheiten diese Parameter (KAGAN, 2021). Um die Vergleichbarkeit der Messwerte zu gewährleisten, müssen diese Einflussfaktoren systematisch erfasst und in die KI-unterstützte Analyse einbezogen werden.

### Durch KI-unterstützte Weiterentwicklungs-Ziele

Die Komplexität der Daten und die Vielzahl der Einflussfaktoren stellen hohe Anforderungen an die Interpretation der Messergebnisse. Um aus den BF-MFM-Messungen fundierte Handlungsempfehlungen abzuleiten, sind umfassende Kenntnisse der Pflanzenphysiologie, der Rasenökologie und der spezifischen Standortbedingungen erforderlich. Daher sollte für den Anwender ein praxistaugliches und anwenderfreundliches System entwickelt werden, welches nach Abfrage verschiedener Parameter die Ergebnisse verständlich darstellt und daraus ermittelte Handlungsempfehlungen ausgibt. Für die Entwicklung solcher BF-MFM-gestützten Systeme sind in einem ersten Schritt bezahlbare Sensoren notwendig, die entweder autonom arbeiten oder einfach an Anbaugeräte anzuhängen sind und mit standardisierten Protokollen arbeiten. Weiterhin müssen die verschiedenen Indizes mit Hilfe von KI-Systemen interpretiert und daraus Handlungsempfehlungen etabliert werden. Dabei sollten sortenspezifische Referenzwerte, standortabhängige Kalibrierungen und die Integration zusätzlicher Umweltparameter berücksichtigt werden. Langzeitstudien könnten wertvolle Einblicke in die saisonale und ontogenetische Dynamik der gemessenen Parameter liefern und zur Verfeinerung der Interpretationsmodelle beitragen.

Zu beiden Entwicklungsbereichen gibt es erste Ansätze, z.B. von einer kanadischen Arbeitsgruppe, die sich mit der Entwicklung eines Sensors zur Bestimmung des N-Status bei Pflanzen (z.B. Raps) beschäftigen und erste gute Ergebnisse aufweisen (HABIBULLAH et al., 2020). Auch die Firma RHENAC GreenTec AG entwickelt zur Zeit einen BF-MFM-„Qualitäts-Analyzer“, um die Auswirkungen von unterschiedlichen Licht-Spektren in Abhängigkeit zur diversen Einflussparametern erfassen und entsprechende Lichtprogramme optimieren zu können. Außerdem soll anhand dieses System die UV-C-Bestrahlungssysteme zu Pflanzenschutz Zwecken kontrolliert und optimiert werden.

Die kontinuierliche Weiterentwicklung und Anpassung der BF-MFM-Technologie an die spezifischen Anforderungen

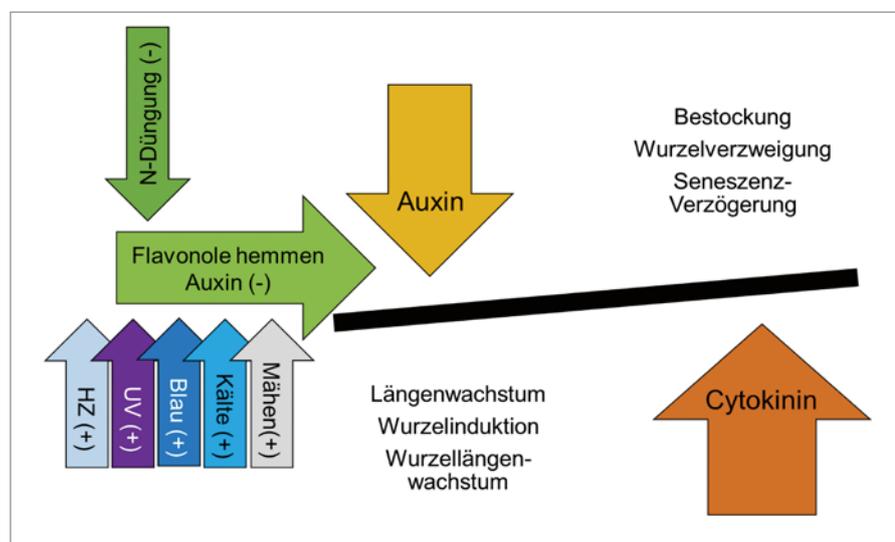


Abb. 5: Schema: Wechselwirkungen des Auxin: Cytokinin-Gleichgewichts

des Rasenmanagements verspricht ein leistungsfähiges Werkzeug für ein präzises und nachhaltiges Rasenmanagement. Die Herausforderung liegt in der erfolgreichen Integration dieser komplexen Daten in praxistaugliche Entscheidungshilfen für Rasenmanager.

## Literatur

- AGATI, G., L. FOSCHI, N. GROSSI, L. GUGLIEMINETTI, Z.G. CEROVIC, M. VOLTERRANI, 2013: Fluorescence-based versus reflectance proximal sensing of nitrogen content in *Paspalum vaginatum* and *Zoysia matrella* turfgrasses. In: *European Journal of Agronomy* 45, S. 39-51.
- AGATI, G., L. FOSCHI, N. GROSSI, M. VOLTERRANI, 2015: In field non-invasive sensing of the nitrogen status in hybrid bermudagrass (*Cynodon dactylon* × *C. transvaalensis* Burt Davy) by a fluorescence-based method. In: *European Journal of Agronomy* 63, S. 89-96.
- AGATI, G., S. MEYER, P. MATTEINI, Z.G. CEROVIC, 2007: Assessment of anthocyanins in grape (*Vitis vinifera* L.) berries using a non-invasive chlorophyll fluorescence method. In: *J. Agric. Food Chem.* 55 (4), S. 1053-1061.
- AGATI, G., P. PINELLI, E.S. CORTÉS, A. ROMANI, A. CARTELAT, Z.G. CEROVIC, 2005: Nondestructive evaluation of anthocyanins in olive (*Olea europaea*) fruits by in situ chlorophyll fluorescence spectroscopy. In: *J. Agric. Food Chem.* 53 (5), S. 1354-1363.
- AGATI, G., Z.G. CEROVIC, P. PINELLI, M. TATTINI, 2011: Light-induced accumulation of ortho-dihydroxylated flavonoids as non-destructively monitored by chlorophyll fluorescence excitation techniques. In: *Environmental and Experimental Botany* 73, S. 3-9.
- BOUDET, A.M., 2000: Lignins and lignification: Selected issues. In: *Plant Physiology and Biochemistry* 38 (1-2), S. 81-96.
- BUER, C.S. u. G.K. MUDAY, 2004: The transparent testa4 mutation prevents flavonoid synthesis and alters auxin transport and the response of *Arabidopsis* roots to gravity and light. In: *Plant Cell* 16 (5), S. 1191-1205.
- BUER, C.S., G.K. MUDAY, M.A. DJORDJEVIC, 2008: Implications of long-distance flavonoid movement in *Arabidopsis thaliana*. In: *Plant Signaling & Behavior* 3 (6), S. 415-417.
- CARLSON, M.G., R.E. GAUSSOIN, L.A. PUNTEL, 2022: A review of precision management for golf course turfgrass. In: *Crop Forage & Turfgrass Mgmt* 8 (2), Artikel e20183.
- CARAMÉS, C.R., 2015: Assessment of the spatial variability of vegetative status in vineyards using non-destructive sensors: Application of remote and proximal sensing technologies in precision viticulture. Online verfügbar unter <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=46013>.
- CARTELAT, A.Z.G. CEROVIC, Y. GOULAS, S. MEYER, C. LELARGE, J.L. PRIOUL et al., 2005: Optically assessed contents of leaf polyphenolics and chlorophyll as indicators of nitrogen deficiency in wheat (*Triticum aestivum* L.). In: *Field Crops Research* 91 (1), S. 35-49.
- CASHMORE, A.R., 2003: Cryptochromes: Enabling Plants and Animals to Determine Circadian Time. In: *Cell* 114 (5), S. 537-543.
- CATUREGLI, L., M. CORNIGLIA, M. GAETANI, N. GROSSI, S. MAGNI, M. MIGLIAZZI et al., 2016: Unmanned Aerial Vehicle to Estimate Nitrogen Status of Turfgrasses. In: *PLOS ONE* 11 (6), e0158268.
- CEROVIC, Z.G., N.B. GHOZLEN, C. MILHADE, M. OBERT, S. DEBUISSON, M. LE MOIGNE, 2015: Nondestructive diagnostic test for nitrogen nutrition of grapevine (*Vitis vinifera* L.) based on dual leaf-clip measurements in the field. In: *J. Agric. Food Chem.* 63 (14), S. 3669-3680.
- CEROVIC, Z.G., G. MASDOUMIER, N.B. GHOZLEN, G. LATOUCHE, 2012: A new optical leaf-clip meter for simultaneous non-destructive assessment of leaf chlorophyll and epidermal flavonoids. In: *Physiologia Plantarum* 146 (3), S. 251-260.
- CEROVIC, Z.G., A. OUNIS, A. CARTELAT, G. LATOUCHE, Y. GOULAS, S. MEYER, I. MOYA, 2002: The use of chlorophyll fluorescence excitation spectra for the non-destructive in situ assessment of UV-absorbing compounds in leaves. In: *Plant, Cell & Environment* 25 (12), S. 1663-1676.
- CHOWDHURY, M., K.T. KUMAR, P.R. AHMAD, H.L. KUSHWAHA, P.K. UPADHYAY, A. JHA et al., 2024: The use of destructive and non-destructive techniques in concrete nitrogen assessment in plants. In: *Journal of Plant Nutrition* 47 (14), S. 2271-2294.
- FAIVRE-RAMPANT, O., J. THOMAS, M. ALLÈGRE, J.B. MOREL, D. THARREAU, J.L. NOTÉGHEM et al., 2008: Characterization of the model system rice-Magnaporthe for the study of nonhost resistance in cereals. In: *New Phytologist* 180 (4), S. 899-910.
- GAN, S. u. R.M. AMASINO, 1995: Inhibition of leaf senescence by autoregulated production of cytokinin. In: *Science* 270 (5244), S. 1986-1988.
- GHOZLEN, N.B., Z.G. CEROVIC, C. GERMAIN, S. TOUTAIN, G. LATOUCHE, 2010: Non-destructive optical monitoring of grape maturation by proximal sensing. In: *Sensors* 10 (11), S. 10040-10068.
- GOULAS, Y., Z.G. CEROVIC, A. CARTELAT, I. MOYA, 2004: Dualix: a new instrument for field measurements of epidermal ultraviolet absorbance by chlorophyll fluorescence. In: *Appl. Opt.*, AO 43 (23), S. 4488-4496.
- HABIBULLAH, M., M.R. MOHEBIAN, R. SOOLANAYAKANAHALLY, A.N.S. BAHAR, K.A. WAHID, A. DINH, 2020: Low-Cost Multispectral Sensor Array for Determining Leaf Nitrogen Status. In: *Nitrogen* 1 (1), S. 67-80.
- HARBORNE, J.B., 2000: Arsenal for survival: secondary plant products. In: *TAXON* 49 (3), S. 435-449.
- HEEGE, H.J., S. REUSCH, E. THIESSEN, 2008: Prospects and results for optical systems for site-specific on-the-go control of nitrogen-top-dressing in Germany. In: *Precision Agric* 9 (3), S. 115-131.
- HEMM, M.R., S.D. RIDER, J. OGAS, D.J. MURRY, C. CHAPPLE, 2004: Light induces phenylpropanoid metabolism in *Arabidopsis* roots. In: *The Plant journal: for cell and molecular biology* 38 (5), S. 765-778.
- KAGAN, I.A., 2021: Soluble phenolic compounds of perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.): Potential effects on animal performance, and challenges in determining profiles and concentrations. In: *Animal Feed Science and Technology* 277, S. 114960.
- KAGAN, I.A., J.P. GOODMAN, D.H. SEMAN, L.M. LAWRENCE, S.R. SMITH, 2019: Effects of Harvest Date, Sampling Time, and Cultivar on Total Phenolic Concentrations, Water-Soluble Carbohydrate Concentrations, and Phenolic Profiles of Selected Cool-Season Grasses in Central Kentucky. In: *Journal of equine veterinary science* 39, S. 86-93.
- KAUTZ, B., 2016: Fluorescence-based systems for detection of abiotic stresses on horticultural crops. Dissertation. Universitäts- und Landesbibliothek Bonn, Bonn. Online verfügbar unter <https://bonndoc.ulb.uni-bonn.de/xmlui/handle/20.500.11811/6606>.
- KUREPA, J., J.A. SMALLE, 2022: Auxin/Cytokinin Antagonistic Control of the Shoot/Root Growth Ratio and Its Relevance for Adaptation to Drought and Nutrient Deficiency Stresses. In: *International journal of molecular sciences* 23 (4).
- LATOUCHE, G., C. DEBORD, M. RAYNAL, C. MILHADE, Z.G. CEROVIC, 2015: First detection of the presence of naturally occurring grapevine downy mildew in the field by a fluorescence-based method. In: *Photochem Photobiol Sci* 14 (10), S. 1807-1813.
- LEJEALLE, S., S. EVAIN, Z.G. CEROVIC (Hg.), 2010: Multiplex: a diagnostic tool for the management of nitrogen fertilization of turfgrass. In 10th International Conference on Precision Agriculture. 18-21 July. International Society of Precision Agriculture. (CD-ROM (Ed. R. Khosla), p. 15. Denver, CO): Denver, Colorado.
- LEUFEN, G., G. NOGA, M. HUNSCHE, 2014: Proximal sensing of plant-pathogen interactions in spring barley with three fluorescence techniques. In: *Sensors* 14 (6), S. 11135-11152.
- LI, J. W., J.X. ZHANG, Z. ZHAO, X.D. LEI, X.L. XU, X.X. LU et al., 2013: Use of fluorescence-based sensors to determine the nitrogen status of paddy rice. In: *J. Agric. Sci.* 151 (6), S. 862-871.
- LIPÍŃSKA, H., A. KĘPKOWICZ, M. SYKUT, I. JACKOWSKA, 2019: Effects of decomposing biomass of *Festuca arundinacea*, *Festuca ovina* and *Festuca rubra* lawn cultivars on growth of other lawn grasses. In: *AJ* 46 (2), S. 107-120.
- MATHEW, S., G.K. SEETHARAMU, M. DILEEPKUMAR, D. SATISH, 2021: Grasses for sports grounds and its influence on playing quality: A review. In: *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry* 10 (2), S. 17-26.
- MAXWELL, K., G.N. JOHNSON, 2000: Chlorophyll fluorescence – a practical guide. In: *J Exp Bot* 51 (345), S. 659-668.

- MOK, D.W.S., M.C. MOK, 2001: CYTOKININ METABOLISM AND ACTION. In: Annual review of plant physiology and plant molecular biology 52 (Volume 52, 2001), S. 89-118.
- MÜLLER, D., O. LEYSER, 2011: Auxin, cytokinin and the control of shoot branching. In: Ann Bot 107 (7), S. 1203-1212.
- NANGLE, E.J., D.S. GARDNER, J.D. METZGER, L. RODRIGUEZ-SAONA, M.M. GUISTI, T.K. DANNEBERGER, D.P. PETRELLA, 2015: Pigment Changes in Cool-Season Turfgrasses in Response to Ultraviolet-B Light Irradiance. In: Agronomy Journal 107 (1), S. 41-50.
- PADILLA, F.M., M. GALLARDO, M.T. PEÑAFLEITAS, R. DE SOUZA, R.B. THOMPSON, 2018: Proximal Optical Sensors for Nitrogen Management of Vegetable Crops: A Review. In: Sensors 18 (7), S. 2083.
- PIERGIORGIO, P., M. MINOGGIO, L. BRAMATI, 2003: Plant Polyphenols: Structure, Occurrence and Bioactivity. In: Bioactive Natural Products (Part I): Elsevier, S. 257-312.
- PONCE, M.A., M.J. BOMPADRE, J.M. SCERVINO, J.A. OCAMPO, E.J. CHANETON, A.M. GODEAS, 2009: Flavonoids, benzoic acids and cinnamic acids isolated from shoots and roots of Italian rye grass (*Lolium multiflorum* Lam.) with and without endophyte association and arbuscular mycorrhizal fungus. In: Biochemical Systematics and Ecology 37 (4), S. 245-253.
- PORNARO, C., E. BAROLO, F. RIMI, S. MACOLINO, M. RICHARDSON, 2016: Performance of various cool-season turfgrasses as influenced by simulated traffic in northeastern Italy. In: Europ.J.Hortic.Sci. 81 (1), S. 27-36.
- QAWASMEH, A., H.K. OBIED, A. RAMAN, W. WHEATLEY, 2012: Influence of fungal endophyte infection on phenolic content and antioxidant activity in grasses: interaction between *Lolium perenne* and different strains of *Neotyphodium lolii*. In: Journal of agricultural and food chemistry 60 (13), S. 3381-3388.
- RHENAC GREENTEC AG: Bestrahlung mit UV-C-Licht reduziert den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln. Theisen, H. Online verfügbar unter: <https://www.rhenac-greentec.de/pressemitteilung-rhenac-greentec-ag-praesentiert-mobiles-rasentkeimungssystem/>.
- RICE-EVANS, C., N. MILLER, G. PAGANGA, 1997: Antioxidant properties of phenolic compounds. In: Trends in Plant Science 2 (4), S. 152-159.
- ROCHE, J., M.H. TURNBULL, Q. GUO, O. NOVÁK, J. SPÁTH, S.P. GIESEG et al., 2017: Coordinated nitrogen and carbon remobilization for nitrate assimilation in leaf, sheath and root and associated cytokinin signals during early regrowth of *Lolium perenne*. In: Annals of botany 119 (8), S. 1353-1364.
- SCHOCH, G., S. GOEPFERT, M. MORANT, A. HEHN, D. MEYER, P. ULLMANN, D. WERCK-REICHHART, 2001: CYP98A3 from *Arabidopsis thaliana* is a 3'-hydroxylase of phenolic esters, a missing link in the phenylpropanoid pathway. In: The Journal of biological chemistry 276 (39), S. 36566-36574.
- SCHWEIGER, A., H. BERNHARDT, 2024: Influence of Temperature and LED Light Spectra on Flavonoid Contents in *Poa pratensis*. In: AgriEngineering 6 (3), S. 2167-2178.
- SHARMA, A., B. SHAHZAD, A. REHMAN, R. BHARDWAJ, M. LANDI, B. ZHENG, 2019: Response of Phenylpropanoid Pathway and the Role of Polyphenols in Plants under Abiotic Stress. In: Molecules 24 (13), S. 2452.
- STEGE (RÜHMANN), S., D. TREUTTER, 2011: Nicht-invasives Monitoring des Reifeprozesses von Früchten zur Verbesserung der Marktqualität. 47. Gartenbauwissenschaftliche Jahrestagung – Produkt- und Prozessinnovationen im Gartenbau. Hannover, 23-26.02.2011. DGG-Deutsche Gartenbauliche Gesellschaft. Berlin: BHGL (28/2011).
- TAYLOR, L.P., E. GROTEWOLD, 2005: Flavonoids as developmental regulators. In: Current Opinion in Plant Biology 8 (3), S. 317-323.
- TEAL, R.K., B. TUBANA, K. GIRMA, K.W. FREEMAN, D.B. ARNALL, O. WALSH, W.R. RAUN, 2006: In-Season Prediction of Corn Grain Yield Potential Using Normalized Difference Vegetation Index. In: Agronomy Journal 98 (6), S. 1488-1494.
- TU, Y., S. ROCHFORT, Z. LIU, Y. RAN, M. GRIFFITH, P. BADENHORST et al., 2010: Functional analyses of caffeic acid O-Methyltransferase and Cinnamoyl-CoA-reductase genes from perennial ryegrass (*Lolium perenne*). In: Plant Cell 22 (10), S. 3357-3373.
- TUCCIO, L., D. REMORINI, P. PINELLI, E. FIERINI, P. TONUTTOI, G. SCALABRELLI, G. AGATI, 2011: Rapid and non-destructive method to assess in the vineyard grape berry anthocyanins under different seasonal and water conditions\*. In: Australian Journal of Grape and Wine Research 17 (2), S. 181-189.
- WERNER, T., T. SCHMÜLLING, 2009: Cytokinin action in plant development. In: Current Opinion in Plant Biology 12 (5), S. 527-538.
- WINKEL-SHIRLEY, B., 2001: Flavonoid biosynthesis. A colorful model for genetics, biochemistry, cell biology, and biotechnology. In: Plant Physiol 126 (2), S. 485-493.
- WOLSKI, K., J. MARKOWSKA, A. RADKOWSKI, M. BRENNENSTHUL, L. SOBOL, G. PEÇZKOWSKI et al., 2021: The influence of the grass mixture composition on the quality and suitability for football pitches. In: Scientific reports 11 (1), S. 20592.
- ZANELLI, B., M. OCVRK, I. JOŽE KOŠIR, M. VIDRIH, T. BOHINC, S. TRDAN, 2022: Environmental parameters and fertilisers as factors affecting the salicylic acid and total polyphenol contents in sport turfgrasses. In: Acta Agriculturae Scandinavica, Section B – Soil & Plant Science 72 (1), S. 81-91.

#### Autorin:

Dr. Susanne Steger  
 Gewächshauslaborzentrum Dürnast  
 School of Life Sciences – TUM  
 Dürnast 7-10  
 85354 Freising  
 E-Mail: [susanne.steger@tum.de](mailto:susanne.steger@tum.de)