

Infrarotthermometrie: einfache Ausrüstung zur Temperaturerfassung im agrarischen Grünland?

Schick, K., Müller, J., und Wrage-Mönnig, N.
Universität Rostock, Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät
Grünland und Futterbauwissenschaften
Justus-von-Liebig-Weg 6, 18059 Rostock
Kristina.schick2@uni-rostock.de

Einleitung

Artenreiche Grünlandbestände gelten häufig als effizienter in der Ressourcennutzung als artärmere Bestände. Dies wird durch eine geringere interspezifische Konkurrenz im Vergleich zu intraspezifischer Konkurrenz begründet. Jedoch lässt sich das genaue kompetitive Verhalten um Ressourcen zwischen Arten sowie innerhalb von Arten im Dauergrünland nur schwer messen (Huston *et al.* 2000). Mögliche Untersuchungsmethoden sind derzeit zumeist zeit- sowie kostenintensiv. Unterschiedliche Wasser- und Nährstoffverfügbarkeit zwischen Pflanzen könnte Unterschiede in der Transpiration bewirken, welche sich ggf. über Messungen der Blatttemperaturen untersuchen lassen. Der Einsatz von Infrarottechnik gilt als gängige Methode, um Temperaturdaten von Vegetation zu erheben. Schon in den 1960er Jahren waren erste Messgeräte käuflich zu erwerben (Rahkonen und Jokela 2003). Das Einsatzspektrum hat sich seitdem immer mehr erweitert. Im Agrarbereich wird Infrarottechnik häufig zur Trockenstressdetektierung und Bewässerungsoptimierung eingesetzt (z.B. Wiegand und Namken 1966, Hatfield 1983, Hatfield *et al.* 1985, Nielsen *et al.* 1989, Sdoodee und Kaewkong 2006, O'Shaughnessy *et al.* 2014). Dabei kommen in der agrarischen Forschung häufig Thermoelemente zum Einsatz (u.a. Cook *et al.* 1964, Pieters und Schurer 1973, Jackson *et al.* 1981, Mahan und Yeater 2008), welche in oder auf der Pflanze befestigt werden. Hierfür spielt der genaue thermale Kontakt zwischen Element und Blattfläche eine wichtige Rolle (Beadle *et al.* 1973). Ungenaue Anbringung der Messelemente oder auch das Thermoelement als Fremdkörper selbst kann die Messungen beeinträchtigen (Tanner 1963). Weiterhin ist die Anbringung relativ aufwendig. Ein Alternative ist die berührungslose Messung des Blattes anhand von Infrarotthermometern. Diese kontaktlose Messtechnik mit sogenannten Handthermometern wird durch ihre einfache Handhabung und kostengünstige Anschaffung in vielen Einsatzbereichen präferiert (z.B. Kraft 2010) und war in den vergangenen Jahrzehnten die meistgenutzte Messtechnik (O'Shaughnessy *et al.* 2014). Wir untersuchen, inwieweit man gängige Infrarotthermometer nutzen kann, um über die Messung von Blatttemperaturen Informationen über die Konkurrenz um Wasser und den Nährstoff Stickstoff in Reinkultur und Gemengen zu erhalten.

Material und Methoden

Vorversuch – Modellvergleich & anschließende Kalibrierung des Zielgerätes

In einem Vorversuch unter kontrollierten Gewächshausbedingungen wurden zwei Infrarotthermometer (*Optris MS LT & Trebs 99714*) getestet, um das besser geeignete Gerät für unsere Zwecke zu ermitteln. Es wurde ein Trockenstressgefäßversuch bei konstanter Lufttemperatur (22 °C) durchgeführt. Dafür wurde eine breitblättrige Testpflanze, *Brassica napus*, verwendet. Insgesamt umfasste der Versuch 20 Gefäße (Bodenvolumen: 4 Liter, Boden: Torfsubstrat) mit je einer Testpflanze. Zehn Pflanzen wurden unter Trockenstress gesetzt (Untergrenze des pflanzenverfügbaren Wassers nach Äquivalentwelkepunkt mit nFK ≤ 30 %) und zehn Pflanzen optimal wasserversorgt (nFK ≥ 80 %). Zur Temperaturmessung wurde ein low-cost-Infrarot-Handthermometer (*Trebs 99714*, TrebsBV) für unter 30,- € Anschaffungskosten und ein hochwertigeres Modell (*Optris MS LT*, Optris GmbH) für ~ 300,- € Anschaffungskosten verwendet. Mit beiden Geräten wurde in einem möglichst kurzen Zeitabstand (< 30 Sekunden) hintereinander jeweils dasselbe Blatt derselben Testpflanze gemessen.

Da es sich um eine punktuelle Messung handelt, wurden mit jedem Messgerät pro Pflanze drei Temperaturmesswiederholungen kurzzeitig nacheinander durchgeführt, woraus ein Temperaturmittelwert für die jeweilige Testpflanze je Messgerät und Durchgang ermittelt wurde. Bei jeder Testpflanze wurde stets das jüngste, voll entwickelte Blatt zur Messung verwendet.

Es wurde ein genauer Messabstand des Messgerätes zum Messobjekt von circa 14 cm eingehalten, da sonst der Durchmesser des Messflecks größer als der Messobjektdurchmesser gewesen wäre, was zu Messfehlern führt. Insgesamt wurden fünf Messdurchgänge durchgeführt. Das aus dem Versuch favorisierte Messgerät *Optris MS LT* wurde weiterhin mit einem Schwarzstrahler, Temperatur-Kalibrierquelle CS 171, kalibriert, um mögliche Messabweichungen vom eigentlichen Temperaturwert feststellen zu können.

Freilandversuche – Düngerversuch im Dauergrünland & Trockenstressversuch im Ansaatgrünland in einem Folientunnel

Das favorisierte Handthermometer wurde nach dem Gewächshausversuch weiter im Grünland getestet. Der erste Freilandversuch umfasste eine extensiv genutzte Dauergrünlandfläche (Glatt-haferwiese auf lehmigem Sand, max. 3 Pflegeschritte pro Jahr ohne Düngung), auf der drei Testarten für die Temperaturmessungen ausgewählt wurden: *Taraxacum officinale* (*To*), *Rumex acetosa* (*Ra*) und *Dactylis glomerata* (*Dg*). Für den Versuch wurden zehn Flächen von jeweils 1 m² Größe abgesteckt (Kantenlängen 1 m × 1 m). Fünf der zehn Flächen wurden mit KAS (Kalkamonsalpeter) am 07. Mai und 27. Mai 2015 behandelt (300 kg ha⁻¹ KAS oder 81 kg N ha⁻¹ je Applikation). Die übrigen Flächen blieben ungedüngt. Am zweiten Applikationstag wurde zuvor ein Pflegeschnitt (8 cm Schnitthöhe) auf allen Testflächen durchgeführt. Insgesamt wurden an 15 Messtagen die Blatttemperaturen der drei Testpflanzen je Fläche mit je 3 Messwiederholungen erhoben und gemittelt. Die Messungen fanden nur an Tagen mit klarem Himmel und keinem bis wenig Wind statt (Beaufortskala: 1–2).

Der zweite Versuch wurde ab Mai 2016 in einem Folientunnel durchgeführt (Länge × Breite: 40 m × 8 m), wo durch kontrollierte Tröpfchenbewässerung Trockenstress und optimale Bewässerung induziert werden konnten. Als Testpflanzen wurden *Trifolium repens* (*tr*) und *Festulolium braunii* (*fl*) miteinander im Gemenge (*trg* & *flg*) sowie als Monokultur (*trm* & *flm*) unter Trockenstress und optimaler Wasserversorgung in vier Wiederholungen angebaut. Die Testparzellen betragen je 7,5 m² (Kantenlänge 2,5 m × 3 m). Die Bewässerungsmengen für optimal bewässerte Parzellen (60 % bis 80 % nFK) und Trockenstressparzellen (15 % bis 30 % nFK) wurden nach Messergebnissen von TDR-Sonden (auf den Testflächen vergraben in 10 cm, 20 cm, 40 cm & 60 cm Tiefe) und deren Verrechnung im Programm MATLAB eingestellt und über die Bewässerungsanlage gesteuert. Insgesamt wurden im Versuchsjahr drei Schnitte durchgeführt (BBCH bei Schnittzeitpunkt: Gräser circa 32, Klee circa 63). Zur Ernte wurde ein Schätzrahmen (Kantenlänge 0,5 m × 0,5 m) zweimal auf jeder Testfläche aufgelegt und der Bestand in 6 cm Schnitthöhe abgeerntet. Der Rest der Fläche wurde in derselben Schnitthöhe geschnitten und das Schnittgut entfernt. Die Temperaturaufnahmen wurden mit dem favorisierten Handthermometer auf dieselbe Weise durchgeführt, wie bereits in den vorangegangenen Versuchen beschrieben. Zur Analyse wurden mit der Software RStudio, Version 1.0.143, lineare gemischte Modelle erstellt sowie Anova, Tukey- und Kruskal-Test genutzt, um signifikante Temperaturunterschiede zu ermitteln.

Ergebnisse und Diskussion

Im Vorversuch zur Trockenstressdetektierung unter kontrollierten Gewächshausbedingungen konnten beide Handthermometer signifikante Temperaturunterschiede zwischen optimal bewässerten und minimal bewässerten Testpflanzen feststellen. Das low-cost-Modell *Trebs 99714* maß allerdings fast immer geringere Blatttemperaturwerte und zeigte größere Schwankungen um den Mittelwert als das kostenintensivere *Optris MS LT* (Tabelle 1). Im Vergleich lagen die Temperaturmesswerte des *Trebs 99714* im Mittel 2,69 °C unterhalb der Messwerte des *Optris MS LT* (nicht abgebildet). Aufgrund der größeren Schwankungsbreite der gemessenen Temperaturen des *Trebs 99714* (Standardabweichung *Trebs*: 2,13 °C zur Standardabweichung *Optris*: 1,47 °C; nicht tabellarisch abgebildet) wurde das *Optris MS LT* für weitere Temperaturmessungen ausgewählt.

Tabelle 1: Vergleich der mittleren Temperaturwerte [°C] von *Optris MS LT* & *Trebs 99714* nach Gesamtdatensatz und einzelnen Messdurchgängen, unterteilt nach optimaler Bewässerung und Trockenstress; mit Kruskal-Test, um signifikante Temperaturunterschiede zwischen den Geräten aufzuzeigen; Werte in Klammern zeigen die Standardabweichung vom jeweiligen Mittelwert an

Gesamtdaten & Messdurchgang	Temperaturdaten optimale Bewässerung [°C]			Temperaturdaten Trockenstress [°C]		
	Optris MS LT	Trebs 99714	Kruskal-Test	Optris MS LT	Trebs 99714	Kruskal-Test
Gesamtdaten	23,04 (0,90)	20,44 (2,07)	b a	24,78 (1,42)	22,01 (1,91)	b a
1	22,16 (0,59)	22,31 (1,13)	a a	23,43 (1,04)	19,53 (0,68)	b a
2	23,74 (0,68)	22,07 (0,69)	b a	24,92 (0,65)	23,21 (1,44)	b a
3	22,61 (0,68)	20,48 (1,46)	b a	23,93 (1,50)	21,21 (1,30)	b a
4	23,36 (0,68)	18,53 (1,51)	b a	25,44 (0,92)	23,83 (0,58)	b a
5	23,32 (0,68)	18,79 (1,78)	b a	26,20 (0,93)	22,28 (1,57)	b a

Das *Optris MS LT* wurde daraufhin mittels eines Schwarzstrahlers, der Temperatur-Kalibrierquelle CS 171, auf mögliche Messabweichungen außerhalb der vom Hersteller Optris GmbH beschriebenen Norm von $\pm 1\%$ oder $\pm 1\text{ °C}$ (20...420 °C) überprüft. Es wurden insgesamt fünf Testmessungen unter stabilen klimatischen Raumbedingungen durchgeführt (Umgebungstemperatur: 24,5 bis 25,0 °C). Dabei wurden bestimmte Temperaturen beim Schwarzstrahler vor jeder Messung festgelegt, welche möglichst genau vom Handthermometer wiedergegeben werden mussten. Alle Messdurchgänge zeigten sehr zuverlässige Messergebnisse seitens des *Optris MS LT*, die weit unterhalb der maximalen Abweichnorm von 1 °C lagen (Tabelle 2). Die exakten Ergebnisse der Kalibrierung würden ebenfalls die größeren Messabstände zwischen beiden Handthermometern erklären, da eine höhere Messgenauigkeit durch sensiblere Messtechnik seitens des teureren Handmessgerätes vorlag. Die technischen Daten geben beim kostengünstigeren Modell einen größeren FOV (field of view = 8:1), langsamere Reaktionszeit (500 ms) sowie eine allgemein geringere Messgenauigkeit mit maximalen Abweichungen von 2 % oder 2 °C (-20 °C...320 °C) an. Weiterhin besitzt das *Optris MS LT* Streublenden, welche die hemisphärische Strahlung minimieren, sodass Fremdstrahlung bei der Temperaturberechnung weitestgehend nicht mit einbezogen wird.

Tabelle 2: Kalibrierung des Handthermometers *Optris MS LT* mit einem schwarzen Strahler über verschiedene Temperaturen; Normabweichung des *Optris MS LT* sollte 1 % bzw. 1 °C in einem Temperaturbereich zwischen 20 °C und 240 °C nicht überschreiten

Kalibrierung, Temperatur in °C	
Schwarzer Strahler	Optris MS LT
60,0	59,7
62,0	61,8
67,5	67,3
70,2	70,1
71,5	71,1

Im ersten Freilanddüngerversuch konnten wir mit dem *Optris MS LT* signifikante Temperaturunterschiede zwischen den zwei getesteten Kräutern, *Rumex acetosa* (*Ra*) und *Taraxacum officinale* (*To*), und dem Gras *Dactylis glomerata* (*Dg*) feststellen. Dabei zeigten die Kräuter insgesamt signifikant höhere Temperaturwerte als das Gras. An sieben von insgesamt 15 Messtagen konnte zudem ein signifikanter Einfluss des Faktors „Pflanzenart“ ermittelt werden. An fünf dieser sieben Messtage (Messtage 4–8) zeigte dabei *Ra* die höchsten Blatttemperaturmittelwerte. An den zwei verbleibenden Messtagen (Messtag 11 & 14) besaß *To* die höchsten Messwerte. Das getestete Gras zeigte hingegen an keinem Messtag die höchsten Temperaturmittelwerte.

Bei den Blatttemperaturmessungen schien die Entfernung des Messblattes zum Boden bei der Temperaturentwicklung eine entscheidende Rolle zu spielen. Besonders nach dem ersten Schnitt (ab Messtag 4) wurde dies erkennbar, nachdem an einem kurzen Grünlandbestand von 8 cm Schnitthöhe gemessen wurde. Dabei wurden stets Temperaturen um 20 °C und höher, selten darunter, gemessen (s. Tabelle 3).

Die offenere Grünlandfläche heizte sich insgesamt stärker auf. Zudem war auffällig, dass vor allem die schnellwüchsige und hoch wachsende Art *Dg* häufig die niedrigsten Temperaturen aufwies. *Ra* benötigte nach dem Schnitt von den drei Testarten die längste Zeit, um erneut Biomasse aufzubauen und verblieb lange sehr bodennah. Dieses Verhältnis zeigte sich ebenfalls in den Messdaten: vor allem in den ersten Messungen nach dem Schnitt wies die höchste Pflanzenart (*Dg*) die geringsten, die niedrigste Pflanzenart (*Ra*) die höchsten Temperaturmesswerte auf. Die Bodewärmestrahlung hat somit besonders in kurzen oder auch lückigen Grünlandbeständen einen stärkeren Einfluss auf die Temperatur des Blattes und kann diese je nach Sonneneinstrahlung, Tages-temperatur und Narbenbeschaffenheit erhöhen. Die aktuelle Wuchshöhe steht demnach in Relation zur Temperaturentwicklung des Blattes, was bei Folgeversuchen in Grünlandbeständen mit einer Mindestmesshöhe zum Boden berücksichtigt werden muss.

Entgegen unserer Erwartung zeigte die Düngung keinen signifikanten Effekt auf die Blatttemperaturen ($p > 0,599$). Ein Trend zu geringeren Temperaturen in der gedüngten Variante im Vergleich zur ungedüngten Variante war jedoch insgesamt erkennbar (durchschnittliche Temperatur gedüngter zu ungedüngten Testflächen: 22,8 °C zu 23,1 °C). Ebenfalls konnte durch den höheren Biomasseaufwuchs auf den gedüngten Flächen der Düngeeffekt nachgewiesen werden (Trockensubstanz gedüngter zu ungedüngten Testflächen gesamt: 2027,3 g/m² zu 1382,3 g/m²). Im Freiland war die Messung wie zu erwarten durch mehr Störfaktoren, wie Störstrahlungsquellen, welche vom Messgerät nicht komplett herausgerechnet werden können, und unterschiedliche Messvoraussetzungen in Messhöhen und Wetterbedingungen, erschwert. Weiterhin erschwerten schmale Blattspreiten die Temperaturerhebungen (Messfleckgröße von 14 mm muss stets kleiner als Messobjekt sein). Die entdeckte Tendenz des Düngeeffekts könnte bei weiterer Minimierung der genannten Störquellen klarer zu erkennen sein. Eine einheitliche Messmethodik und Messhöhe mit Pausieren nach dem Schnitt wurden beim anschließenden Folientunnel-trockenstressversuch beachtet.

Tabelle 3: Temperaturmittelwerte [°C] von *Dactylis glomerata* (*Dg*), *Taraxacum officinale* (*To*) und *Rumex acetosa* (*Ra*) aller Testflächen je Messtag, mit Standardabweichung (in Klammern) und Tukey Test (signifikante Unterschiede zwischen den Arten je Messtag mit hochgestellten Buchstaben gekennzeichnet)

Messtag	<i>Dg</i>	<i>To</i>	<i>Ra</i>
1	16.5 (3.3)	18.6 (4.0)	16.4 (2.8)
2	13.1 (2.8)	12.5 (3.5)	12.4 (1.9)
3	18.6 (1.0)	19.0 (0.7)	18.8 (0.4)
4	21.6 (1.5) ^a	24.3 (3.3) ^b	27.0 (3.3) ^c
5	22.3 (4.1) ^a	24.7 (1.3) ^{ab}	26.6 (2.4) ^b
6	21.7 (4.2) ^a	25.8 (3.2) ^b	27.7 (3.0) ^b
7	22.0 (3.1) ^a	24.7 (2.5) ^{ab}	26.5 (4.7) ^b
8	28.2 (4.8) ^a	27.9 (1.2) ^a	32.0 (3.5) ^b
9	20.2 (2.7) ^{ab}	19.5 (1.5) ^a	22.9 (4.5) ^b
10	20.3 (1.5)	19.9 (2.4)	20.6 (2.3)
11	23.5 (1.5) ^a	26.2 (2.3) ^b	24.9 (1.4) ^b
12	26.2 (1.6)	27.2 (2.9)	27.7 (1.4)
13	25.9 (1.3)	27.9 (1.9)	26.6 (3.3)
14	27.4 (1.4) ^a	29.9 (2.4) ^b	28.4 (2.1) ^{ab}
15	19.9 (3.2)	20.2 (4.4)	20.1 (4.9)

Der Trockenstressversuch im Ansaatgrünland im Folientunnel zeigte insgesamt keine signifikanten Temperaturunterschiede zwischen optimal und minimal bewässerter Variante von *Trifolium repens* und *Festulolium* (*tr*: $p > 0,763$, *fl*: $p > 0,639$). Auch im Temperaturvergleich der Mono- und Mischkulturen innerhalb und zwischen den Arten waren nahezu alle Temperaturentwicklungen nicht signifikant unterschiedlich. Nur im Vergleich von *flm* und *flp* der optimal bewässerten Variante konnte ein signifikanter Temperaturunterschied gefunden werden ($p = 0,044$) (Tabelle 4).

Eine Tendenz zu allgemein höheren Temperaturwerten konnte bei *Festulolium* im Vergleich mit *Trifolium repens* über alle Anbauvarianten gefunden werden ($p = 0,062$).

Die höheren Blatttemperaturen beim Gras gegenüber dem Weißklee stehen im Gegensatz zu den Ergebnissen des ersten Freilanddüngerversuchs im Dauergrünland. Dies kann vor allem mit der Bestandsdichte des Testgrases *Festulolium* sowie dessen Blattspreitenbreite erklärt werden. Anders als die dichten Mischkulturparzellen und reinen Kleeparzellen, bildeten die Grasbestände keine geschlossene Narbe in Monokultur, sondern vereinzelt Horste. Dadurch konnte selbst bei guter Blattmassebildung immer Wärmestrahlung seitens des Bodens einwirken. Die direkte Aufheizung der Blätter durch den aufgewärmten Boden wurde mit einer Mindestmesshöhe von 30 cm verhindert bzw. stark vermindert. Jedoch machte es das Handthermometer mit der Messfleckgröße von 14mm häufig schwer, das schmale Testblatt genau und sicher anzuvissieren. Da keine visuelle Absicherung beim Handthermometer gegeben ist, können Messfehler durch Abweichen vom Messbereich (Vorbeimessen an der Blattoberfläche) auftreten. Dieser Fehler kann auf den Graspzellen zu höheren Temperaturwerten führen, da vom Messgerät neben der Blatttemperatur zusätzlich Bodenwärmestrahlung aufgefangen wird. Insgesamt konnten vermutlich deshalb höhere mittlere Temperaturen bei *Festulolium* in den reinen Graspzellen ermittelt werden als in den Mischkulturparzellen mit *Trifolium repens*, unabhängig von der Bewässerungsart (Mittelwerte von *flm* und *flp* auf optimal bewässerte Parzellen: 15,91 °C zu 17,10 °C; Mittelwerte von *flm* und *flp* auf minimal bewässerten Parzellen: 16,84 °C zu 17,27 °C). U.a. beschrieben Rahkonen und Jokela (2003) ebenfalls den Einfluss von Hintergrundstrahlung in der Temperaturaufnahme als mögliche Fehlerquelle, wie auch den Nachteil der räumlichen Auflösung von Handthermometern, welche die kleinstmögliche Messgröße des Objekts begrenzt, sodass Temperaturen von sehr schmalen bzw. kleinen Objekten (hier kleiner als 14 mm Durchmesser) nicht erhoben werden können. Da Blattspreiten bei Gräsern selten ~ 20 mm überschreiten, sind unbemerkte Messfehler relativ wahrscheinlich. Weiterhin muss die Umgebungsstrahlung, welche vom Blatt selbst reflektiert wird, mit einberechnet werden. Diese hängt vom Messwinkel ab und geht bei Grünlandaufnahmen im Freiland zumeist vom Himmel aus. Fuchs und Tanner (1966) zeigten bereits die Problematik der Strahlungsquellen der Umgebung auf, welche für korrekte Temperaturerhebungen miteinbezogen werden müssen. Bei Handthermometern ist diese Einstellung i.d.R. nicht möglich, sodass unterschiedlich starke Messabweichungen, je nach Stärke der Störstrahlung, auftreten können.

Tabelle 4: Vergleich der Temperaturwerte der Testarten *Trifolium repens* (*tr*) und *Festulolium* (*fl*) in den verschiedenen Anbauvarianten (Monokultur: *trm* bzw. *flm*, Gemengekultur: *trg* bzw. *flg*) und Bewässerungszuständen (optimal und minimal bewässerte Parzellen) nach dem Kruskal-Test

Vergleich Anbauvarianten	p-Werte		
	optimal bewässerte Parzellen	minimal bewässerte Parzellen	optimal gegen minimal bewässerte Parzellen
<i>flg</i> : <i>flm</i>	0,044	0,411	–
<i>trg</i> : <i>trm</i>	0,648	0,587	–
<i>flg</i> : <i>flg</i>	–	–	0,651
<i>flm</i> : <i>flm</i>	–	–	0,908
<i>trg</i> : <i>trg</i>	–	–	0,427
<i>trm</i> : <i>trm</i>	–	–	0,538

Ein weiterer Einfluss besteht durch die direkte Sonneneinstrahlung auf das Blatt selbst. Sie stellte in allen Versuchen eine große Fehlerquelle dar. Da der Messwinkel und die Position des Handthermometers beim Messvorgang von Pflanze zu Pflanze nie exakt gleich sind, variiert der Strahlungseinfluss der Sonne ebenfalls. Zukünftige Messungen werden daher bei gleichmäßig dichter Bewölkung, bei Beschattung oder bei Nacht durchgeführt. Weiterhin können kaum merkliche Wetterveränderungen (z.B. leichte Brise) einen großen Einfluss auf die Blatttemperaturen besitzen. Bildgebende Technik ist in der Lage, diese dem Anwender sofort aufzuzeigen, indem das gesamte Blatt in Farbschemen wiedergegeben wird. Da Handthermometer allgemein nur punktuelle Messungen am Objekt durchführen, geben diese Messungen nicht zwingend die wirkliche Blatttemperatur der Pflanze wieder. Verschiedene Untersuchungen zeigten dazu, dass die Temperatur innerhalb eines Blattes zwischen mehreren Grad Celsius variieren kann (Cook *et al.* 1964, Hashimoto *et al.* 1984, Jones 1999).

Hinzu kommt die starke räumliche und zeitliche Einschränkung der Messung. Einzelne Blattmessungen repräsentieren nicht zwingend den Bewässerungsstand (oder die Düngevariante) der gesamten Parzelle, außerdem sind tägliche Aufnahmen über die gesamte Vegetationsperiode sehr aufwendig (O'Shaughnessy *et al.* 2014).

Schlussfolgerung

Der Erwerb von Infrarottechnik ist bereits im low-cost-Segment um 25,- € möglich. Diese preiswerte und schnelle Möglichkeit, Temperaturen im Pflanzenbestand fernstehend zu bestimmen, kann jedoch zu unerkannten Problemen in der Temperaturdatenerfassung führen, besonders wenn Grundlagen der Strahlungsphysik sowie die Grenzen der Messgeräte nicht beachtet werden. Wir zeigen hier die Komplexität der Temperaturermittlung in Pflanzenbeständen auf. Bei einfacher Messtechnik sind mögliche signifikante Temperaturunterschiede durch Trockenstress und Nährstoffversorgung durch eine Vielzahl von Störfaktoren nicht sicher auszumachen. Das Handthermometer trifft bei Messungen im Freiland insgesamt auf Probleme, die unseres Erachtens nicht ausreichend behoben werden können. Dagegen sehen wir einen Einsatz im Gewächshaus unter kontrollierten Klimabedingungen als möglich an.

Literatur

- Beadle, C.L., Stevenson, K.R. und Thurtell, G.W. (1973): Leaf temperature measurement and control in a gas-exchange cuvette. *Canadian Journal of Plant Science*, 53, 407–412.
- Cook, G.D., Dixon, J.R. und Leopold, A.C. (1964): Transpiration: its effect on plant leaf temperature. *Science*, 144, 546–547.
- Fuchs, M. und Tanner, C.B. (1966): Infrared Thermometry of Vegetation. *Agronomy Journal*, 58, 597–601.
- Hashimoto, Y., Ino, T., Kramer, P.J., Naylor, A.W. und Strain, B.R. (1984): Dynamic analysis of water stress of sunflower leaves by means of thermal image processing system. *Plant Physiology*, 76, 266–269.
- Hatfield, J.L. (1983): The utilization of thermal infrared radiation measurements from grain sorghum as a method of assessing their irrigation requirements. *Irrigation Science*, 3, 259–268.
- Hatfield, J.L., Wanjura, D.F. und Barker, G.L. (1985): Canopy temperature response to water stress under partial canopy. *Transactions of the ASAE*, 28, 1607–1611.
- Huston, M.A., Aarssen, L.W., Austin, M.P., Cade, B.S., Fridley, J.D., Garnier, E., Grime, J.P., Hodgson, J., Lauenroth, W.K., Thompson, K., Vandermeer, J.H. und Wardle, D.A. (2000): No consistent effect of plant diversity on productivity. *Science*, 289, 1255a.
- Jackson, R.D., Idso, S.B., Reginato, R.J. und Pinter, P.J. JR. (1981): Canopy Temperature as a Crop Water Stress Indicator. *Water Resources Research*, Vol. 17, 1133–113.
- Jones, H.G. (1999): Use of thermography for quantitative studies of spatial and temporal variation of stomatal conductance over leaf surfaces. *Plant, Cell & Environment*, 22, 1043–1055.
- Kraft, M. (2010): Berührungslose Temperaturmessungen im Versuchsfeld "Aquarius 2010 Winterweizen" zur Abschätzung des Trockenstresses. *Institutsbericht*, Institut für Agrartechnologie und Biosystemtechnik, Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig.
- Mahan, J.R. und Yeater, K.M. (2008): Agricultural applications of a low-cost infrared thermometer. *Computers and electronics in agriculture*, 64, 262–267.
- Nielsen, D.C. und Anderson, R.L. (1989): Infrared thermometry to measure single leaf temperatures for quantification of water stress in sunflower. *Agronomy Journal*, 81, 840–842.
- O'Shaughnessy, S.A., Evett, S.R. und Colaizzi, P.D. (2014): Infrared Thermometry as a Tool for Site-Specific Irrigation Scheduling. *Konferenzbeitrag, Central Plains Irrigation Conference*, Burlington.
- Pieters, G.A. und Schurer, K. (1973): Leaf temperature measurements I: thermocouples. *Acta Botanica Neerlandica*, 22, 569–580.
- Rahkonen, J. und Jokela, H. (2003): Infrared Radiometry for Measuring Plant Leaf Temperature during Thermal Weed Control Treatment. *Biosystems Engineering*, 86, 257–266.
- Sdoodee, S. und Kaewkong, P. (2006): Use of an infrared thermometer for assessment of plant water stress in neck orange (*Citrus reticulata* Blanco). *Songklanakarin Journal of Science Technology*, 28, 1161–1167.
- Tanner, C.B. (1963): Plant temperatures. *Agronomy Journal Notes*, 55, 210–211.
- Wiegand, C.L. und Namken, L.N. (1966): Influences of plant moisture stress, solar radiation and air temperature on cotton leaf temperature. *Agronomy Journal*, 58, 582–586.