

Hochdurchsatz-Phänotypisierung von Weizen unter Hitze- und Trockenstress mit Hilfe von UAVs

KAROLIN KUNZ¹, YUNCAI HU¹ & URS SCHMIDHALTER¹

Zusammenfassung: Um die Auswirkung des Klimawandels auf die Nahrungsmittelproduktion schon heute abschätzen und angepasste Getreidesorten selektieren zu können, wurde in der Saison 2016/17 ein Feldversuch in der Republik Moldau durchgeführt. Im dortigen kontinentalen Klima mit sehr trockenen und heißen Sommern wurden 40 Weizensorten verschiedener Herkunft angebaut und deren Wachstum mit unterschiedlichen Methoden der Hochdurchsatz-Phänotypisierung erfasst. Durch Messungen von Spektralreflexion und Pflanzentemperatur konnte der Einfluss des abiotischen Stresses analysiert werden. Hierbei konnten Unterschiede zwischen Züchtungen aus Osteuropa und Deutschland erkannt und verglichen werden. Die deutschen Sorten – Linien und Hybride – zeigten durch die Einwirkung von Hitze und Trockenheit u.a. starke Ertragseinbußen.

1 Einleitung

Weizen ist eine der wichtigsten Getreidearten weltweit und wird jährlich auf mehr als 220 Mio. ha angebaut (SHIFERAW et al. 2013). Allerdings werden Weizenproduzenten weltweit vor große Herausforderungen gestellt. Bis zum Jahr 2050 wird die Weltbevölkerung auf über 9 Milliarden Menschen und die Nachfrage nach landwirtschaftlichen Produkten um bis zu 50 % ansteigen. Gleichzeitig nimmt die landwirtschaftlich nutzbare Fläche durch Erosion und Versiegelung ab. Um eine ausreichende Versorgung mit Nahrungsmitteln gewährleisten zu können, müssen daher die Erträge pro Fläche deutlich gesteigert werden. Die Erträge werden jedoch durch viele biotische und abiotische Faktoren limitiert. Hierzu zählt auch der Klimawandel, einhergehend mit zunehmenden Hitze- und Trockenheitsereignissen (FAO 2017). Um eine zufriedenstellende Produktion sicher zu stellen, müssen Sorten aller landwirtschaftlichen Kulturen, u.a. Weizen, gezüchtet werden, die an hohe Temperaturen und eine knappe Wasserversorgung angepasst sind und unter diesen Bedingungen hohe Flächenerträge erzielen können. Hierzu ist es einerseits notwendig, Sorten zu sichten, die schon heute in ariden Gebieten angebaut und gezüchtet werden, andererseits Hohertragsorten aus gemäßigten Klimazonen abiotischem Stress in Form von Hitze und Trockenheit auszusetzen und jeweils die Entwicklung und das Wachstum der Pflanzen, sowie den Ertrag zu erfassen. Je nach Anzahl der getesteten Sorten und Größe der Anbaufläche kann die Phänotypisierung sehr arbeits- und zeitaufwändig sein. Eine Erleichterung wird hier durch verschiedene Methoden der Hochdurchsatz-Phänotypisierung geboten. Diese umschließt die Erfassung verschiedener pflanzenphysiologischer Parameter mit Hilfe von Spektrometern und Thermalkameras, die entweder händisch oder mit Hilfe von Drohnen (Unmanned Aerial Vehicle – UAV) durchgeführt werden kann.

¹ Technische Universität München, Lehrstuhl für Pflanzenernährung, Emil-Ramann-Straße 2, D-85354 Freising, E-Mail: [kunz, hu, schmidhalter]@wzw.tum.de

2 Material und Methodik

2.1 Feldversuch

In der Saison 2016/2017 wurde ein Feldversuch im Norden der Republik Moldau in der Stadt Bălți durchgeführt. 40 verschiedene Sorten Winterweizen wurden in drei Wiederholungen angebaut, die Parzellen waren jeweils 5×1 m groß. 20 der getesteten Weizensorten stammen aus osteuropäischen Ländern (Rumänien, Ukraine, Bulgarien und Republik Moldau), bei den anderen 20 Sorten handelt es sich um deutsche Hohertragsorten, davon 16 Linien und vier Hybriden.

Tab. 1: Vergleich der Standorte Freising (D) und Bălți (MD)

	Freising	Bălți
Breitengrad	47,46	48,24
Längengrad	27,56	11,44
Boden	Schluffiger Lehm	Schwarzerde
Jährlicher Niederschlag \varnothing (mm)	530	800
Jahresmitteltemperatur \varnothing (°C)	10,3	7,5
Niederschlag während Vegetationsperiode \varnothing (mm)	200	350
Lufttemperatur im Sommer \varnothing (°C)	18,5 - 21	13,5

Während der Vegetationsperiode ist die Lufttemperatur im Norden Moldaus im Durchschnitt 5-8°C höher (bis 21°C) als in Freising (13,5°C), der Niederschlag jedoch deutlich geringer (Bălți 200 mm, Freising 350 mm) (Tabelle 1). Zum Zeitpunkt der Körnerreife des Weizens herrschen somit Bedingungen, an die die deutschen Weizensorten nicht angepasst sind und unter starkem Hitze- und Trockenstress leiden. Dadurch kommt es zu starken Ertragseinbußen. Die osteuropäischen Sorten sind für solche klimatischen Bedingungen gezüchtet, erbringen allerdings geringere Erträge als die deutschen Sorten in gemäßigttem Klima. Durch die Lage auf nahezu dem gleichen Breitengrad eignet sich der moldawische Standort gut, die Wachstumsbedingungen und die Pflanzenentwicklung mit der in Freising zu vergleichen.

2.2 Messung von Spektralreflexion und Temperatur der Pflanzen

Während des Wachstums wurden von den einzelnen Parzellen regelmäßig mit einem passiven Spektroskop (tec5 HandySpec Field 11-01360xx) die Reflexion der elektromagnetischen Strahlung zwischen 302 und 1148 nm erfasst. Dieses breite Messspektrum ermöglicht die Berechnung sog. Vegetationsindizes, welche Informationen über den Zustand der Pflanzen, Nährstoff- und Wasserhaushalt geben können. Berechnet wurden der Water Index WI ($R900/R970$) (PEÑUELAS et al. 1997), der Normalized Differenced Vegetation Index NDVI ($(R780-R670)/(R780 + R670)$) (ROUSE et al. 1974) und der Red Edge Inflection Point REIP ($700 + 40((R670 + R780)/2 - R700)/(R740 - R700)$) (GUYOT et al. 1974). Der Water Index dient zur Beurteilung des Pflanzenwassergehaltes, der NDVI erlaubt Rückschlüsse über den

Chlorophyllgehalt und die Vitalität der Pflanze. Der REIP ist hingegen abhängig von der Biomasseentwicklung und zeigt zudem einen deutlichen Zusammenhang mit dem Stickstoff (N)-Gehalt der Pflanzen.

Zusätzlich wurden mit Thermalkameras Bilder der Pflanzen gemacht. Hierbei kamen die tragbare Kamera Fluke Ti400 und die Drohne albris der Firma senseFly zum Einsatz. Die technischen Daten sind in Tabelle 2 aufgeführt. Mit der Fluke-Kamera wurde jede Parzelle in einem Winkel von ca. 45° fotografiert, so dass möglichst viel Pflanzenoberfläche erfasst werden konnte. Anschließend wurden mit der Software LabView Fluke (National Instruments, Version 12.0f3) die Pixel von Boden und Pflanzen identifiziert und getrennt, sodass nur die Temperatur der Pflanzenoberfläche in Betracht gezogen wurde. Die Drohne flog in einer Höhe von 17.2 m und fotografierte mit einer Überlappung von 80 %. Dadurch wurde jede Parzelle mehrfach abgebildet. So konnte von jeder Parzelle mindestens eine Thermografie in Nadirposition gemacht werden. Eine Auftrennung nach Boden- und Pflanzentemperatur war hier nicht möglich, die angegebenen Werte sind jeweils Durchschnittswerte für die Temperatur einer ganzen Parzelle.

Tab. 2: Technische Daten der verwendeten Thermalkameras

	Fluke Ti400	Drohne Albris
Auflösung	320 × 240 Pixel	80 × 60 Pixel
Sichtfeld (FOV)	24° × 17°	50° (horizontal)
RGB-Kamera	38 MP	5 MP

3 Ergebnisse und Diskussion

Die berechneten Indizes zeigten deutliche Unterschiede zwischen den Weizensorten aus Deutschland und aus den osteuropäischen Ländern (Abb. 1).

Die Werte des WI und NDVI zeigen über die Vegetationsperiode hinweg einen recht ähnlichen Verlauf: Beide zeigen am 31.5.2017 zur Blüte (Zadoks Skala 55-61) (ZADOKS et al. 1974) ihre höchsten Werte und sinken danach ab. Dabei ist auffällig, dass die Werte der osteuropäischen Sorten jeweils früher und schneller absinken als die der deutschen Linien. Beim WI zeigen die Hybridsorten ab Mitte Juni die geringsten Werte, beim NDVI liegen sie zwischen den osteuropäischen und den deutschen Kultivaren. Auffällig ist, dass bei beiden Indizes die deutschen Sorten am längsten höhere Reflexionswerte aufweisen.

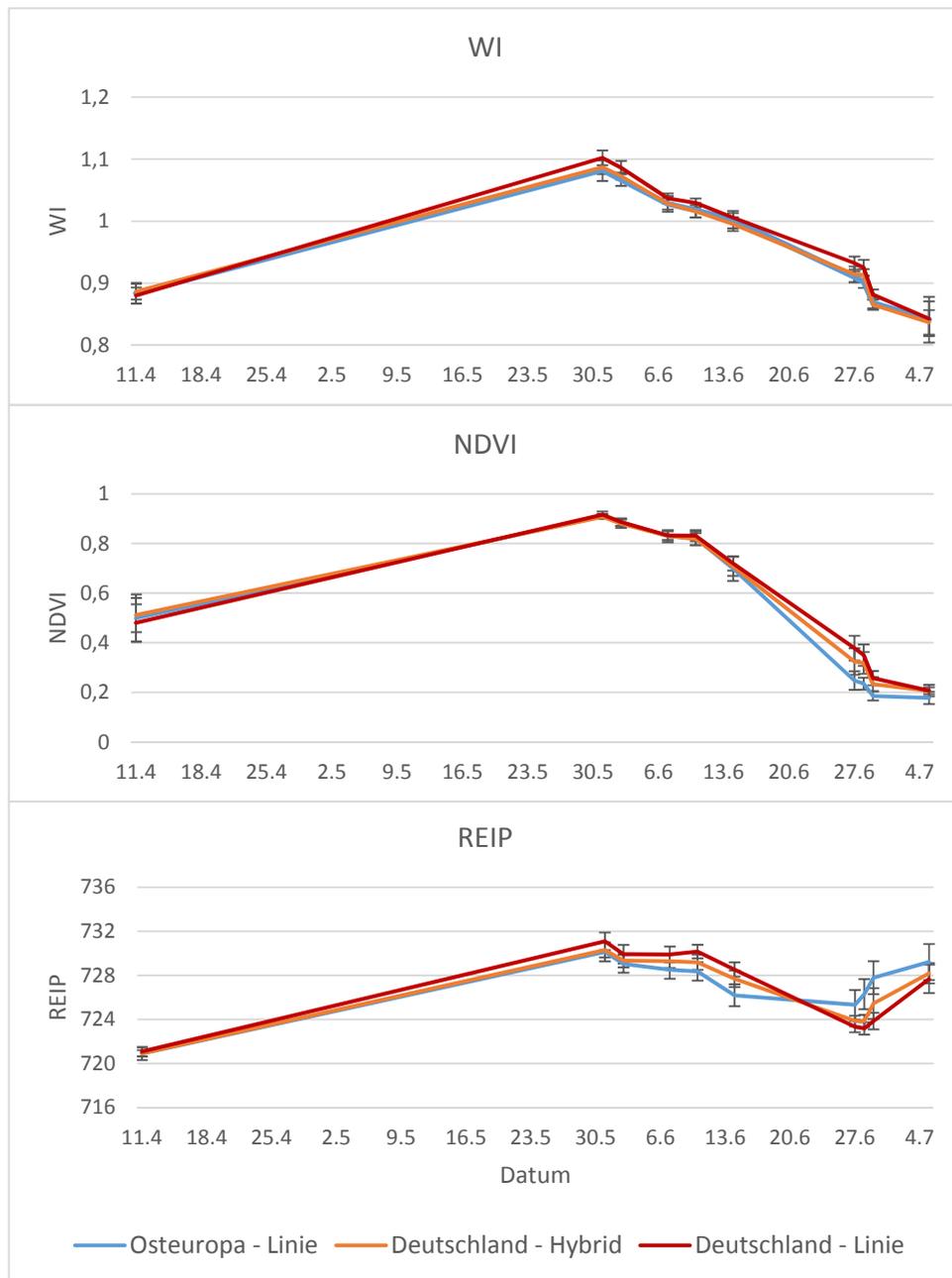


Abb. 1: Water Index, NDVI und REIP osteuropäischer und deutscher Weizensorten im Verlauf der Vegetationsperiode

Die Werte des REIP-Index zeigen einen anderen Verlauf. Zwar erreichen auch sie am 31.5. zur Blüte ihr Maximum, jedoch sinken sie anschließend nicht ganz so schnell ab und zeigen sogar ab Ende Juni wieder einen raschen und deutlichen Anstieg. Hierbei ist auffällig, dass die Werte der deutschen Linien und Hybriden stärker absinken und diesen Unterschied bis zur Ernte nicht mehr kompensieren können. Hingegen bleiben die Werte der osteuropäischen Linien etwas stabiler,

sinken nicht ganz so weit ab und sind am Ende der Vegetationsperiode auf einem deutlich höheren Level als die deutschen Sorten. Auch hier liegen die Hybridsorten wieder zwischen den deutschen und den osteuropäischen Linien. Es ist zu vermuten, dass die REIP-Werte der osteuropäischen Sorten am Ende der Vegetationsperiode höher sind als die der deutschen Sorten, da letztere einen geringeren N-Gehalt aufweisen. Die entsprechenden Untersuchungen sind zum Zeitpunkt der Publikation noch nicht abgeschlossen. Daher kann diese Vermutung noch nicht bestätigt werden.

Da die deutschen Sorten für ein gemäßigtes Klima gezüchtet wurden, sind sie auch an eine längere Vegetationsperiode angepasst. Das heißt, dass v.a. der Zeitraum zwischen Blüte und Reife länger ist. Dies spiegelt sich in den Vegetationsindizes wider. Besonders am WI und NDVI kann man erkennen, dass die deutschen Sorten, sowohl Linien als auch Hybride, länger grün bleiben. Dadurch sinkt der NDVI später ab. Durch die Züchtung auf einen späteren Erntezeitpunkt, eine spätere Abreife und damit einen längeren Wachstumszeitraum, bleibt auch der Wassergehalt der deutschen Sorten länger auf einem höheren Niveau. Die Hybridsorten scheinen besser mit den Stressbedingungen des moldawischen Klimas zurecht zu kommen. Ihre Indizes verhalten sich ähnlicher wie die der osteuropäischen Sorten. Durch den Heterosiseffekt der Hybridzüchtung sind diese Sorten robuster und weniger empfindlich gegenüber abiotischen Stressoren.

Zwischen 29.6.2017 und 5.7.2017 kann man eine rasche Abnahme des NDVI der deutschen Sorten, v.a. Linien, erkennen, während die Werte der osteuropäischen Sorten nahezu gleichbleiben. Der Unterschied zwischen den beiden Gruppen wird geringer. Das ist ein Hinweis auf die sog. Notreife in den deutschen Weizensorten. Dabei trocknet das Getreide ab, die Körner bleiben klein und leicht, da vor der Abreife nicht mehr ausreichend Stärke eingelagert werden kann (vgl. Abb. 2). Dadurch kommt es zu Ertragsverlusten. Ursache für Notreife kann eine Unterbrechung der Nährstoffzufuhr sein, wie sie bei Trockenheit eintreten kann.

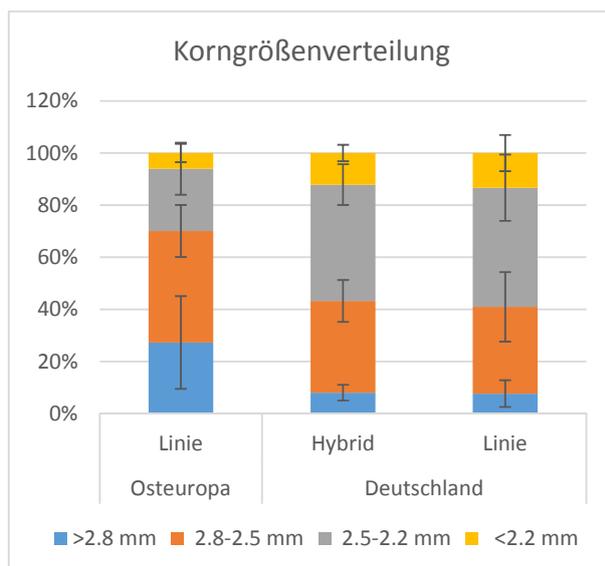


Abb. 2: Anteile der einzelnen Korngrößen am Gesamtertrag (%)

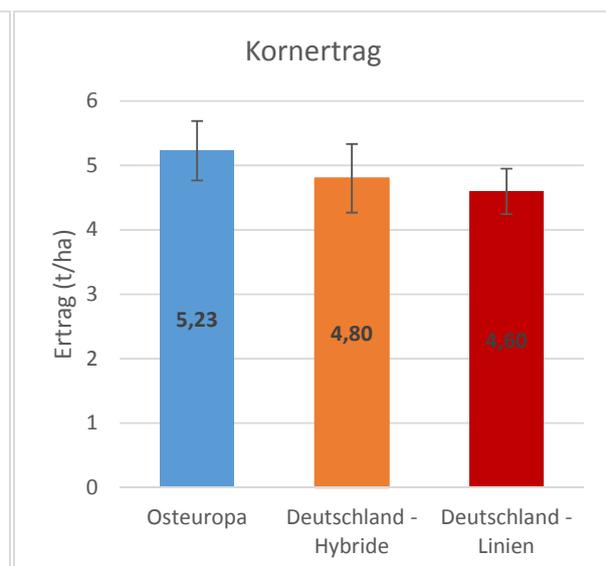


Abb. 3: Kornertrag (t/ha) der getesteten Weizensorten

Die Ertragseinbußen sind in Abbildung 3 deutlich erkennbar. Die osteuropäischen Sorten zeigen normale Ertragslevel, während die deutschen Sorten deutlich weniger Kornertrag bringen, verglichen mit einem Anbau im gemäßigten Klima Süddeutschlands. Dort sind je nach Sorte bis zu 9 t/ha möglich.

Korrelationen zwischen den Vegetationsindizes und dem Kornertrag zeigten sich vor allem zu Beginn und ganz am Ende der Vegetationsperiode (Abb. 4).

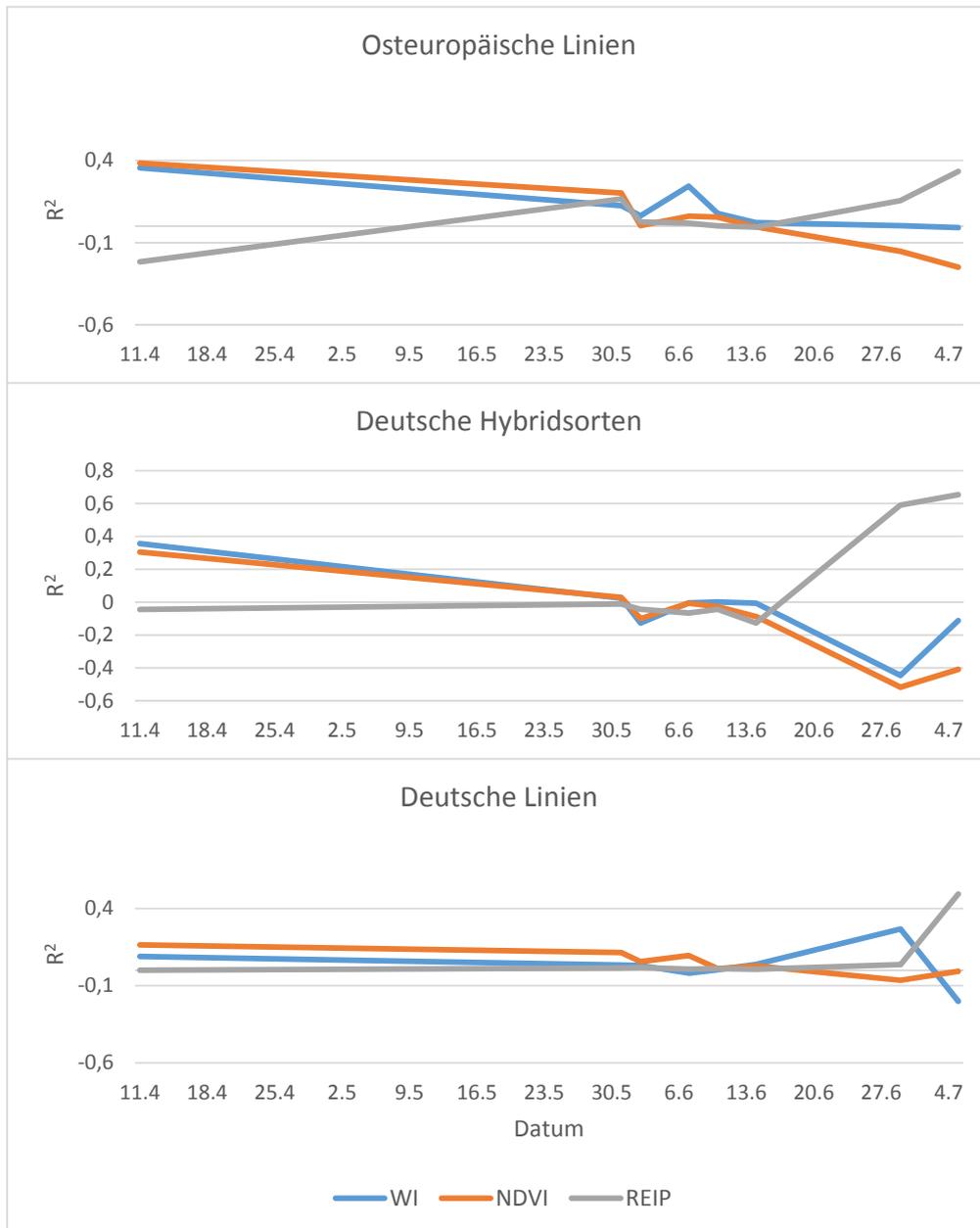


Abb. 4: Verlauf der Korrelation zwischen Ertrag (t/ha) und ausgewählten Spektralindizes nach Herkunft der Züchtungen

Auch bei den Korrelationen zeigt sich wieder bei den osteuropäischen Sorten und den deutschen Hybriden ein ähnlicher Verlauf. Zu Beginn zeigen der WI und NDVI einen Zusammenhang mit dem Ertrag, der dann während der Vegetationsperiode immer geringer wird. Nach dem Stadium der Milchreife (ZS 79, Messung vom 20.6.2017) werden die Werte negativ. Je höher der nun ermittelte NDVI- bzw. WI-Wert ist, mit desto geringeren Kornerträgen muss gerechnet werden. Die NDVI- und WI-Werte sind hoch, so lange die Pflanze noch grün und vital ist. Wenn dies zu einem späten Zeitpunkt noch der Fall ist, wird der Effekt der Notreife stärker und die Erträge sinken umso stärker ab. Der REIP verhält sich umgekehrt, ist gegen Ende der Vegetationsperiode deutlich stärker korreliert als zu Beginn. Dies bekräftigt den Zusammenhang mit der Biomasseentwicklung. Allerdings ist eine solche Entwicklung des REIP für eine frühzeitige Vorhersage der zu erwartenden Kornerträge nicht hilfreich. Die deutschen Linien zeigen nur kurz vor der Getreideernte nennenswerte Korrelationen zwischen den Vegetationsindizes und dem Ertrag. Es ist also davon auszugehen, dass die Vorhersage des Ertrages schwieriger und ungenauer wird, je stärker der abiotische Stress auf die Pflanze einwirkt.

Mit Hilfe der Thermalkameras sollte untersucht werden, ob sich die Temperaturen der Weizensorten je nach Herkunft unterscheidet und ob die Hybridsorten auch hier einen physiologischen Vorteil aufzeigen. Abbildung 5 zeigt die gemessenen Temperaturen der zwei Thermalkameras im zeitlichen Verlauf.

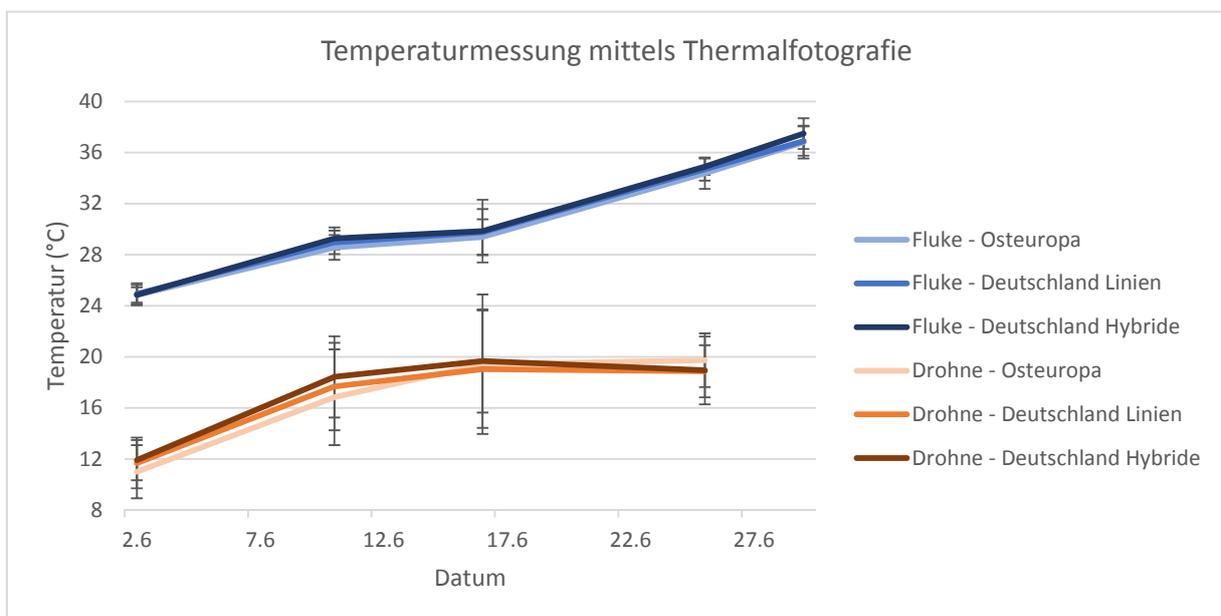


Abb. 5: Gemessene Temperatur der Weizensorten mit Fluke Ti400 bzw. Drohne "albris"

Wie in Abbildung 5 ersichtlich ist, sind die gemessenen Temperaturen zwischen den beiden Thermalkameras sehr unterschiedlich. Die Differenzen zwischen Fluke und Drohne lagen für die einzelnen Parzellen zwischen 1-20 °C. Die handgehaltene Thermalkamera Fluke hat eine um ein Vielfaches höhere Auflösung und kann dadurch viel genauer differenzieren.

Während des Wachstums, solange die Pflanze noch grün ist, dient Wasser als Kühlmittel, um die Temperatur der Pflanze zu regulieren. Zudem werden die Spaltöffnungen geöffnet, damit ein ausreichender Gasaustausch zusätzlich vor zu starkem Temperaturanstieg schützt. Im Falle anhaltender Trockenheit schließt die Pflanze die Spaltöffnungen der Blätter, um Wasserverlust durch Transpiration zu verringern (TAIZ et al. 2015). Bei einer Kombination aus Trockenheit und Hitze, wie sie während des Feldversuches auftrat, kommen die Pflanzen in physiologischen Stress, da es an Wasser mangelt, um die Temperatur zu regulieren, die Stomata aber geschlossen bleiben, um zusätzlichen Wasserverlust zu verhindern. Weizensorten, die an ein trockenes und heißes Klima angepasst sind, kommen unter solchen Bedingungen nicht so schnell in physiologischen Stress, als Sorten, die an kühlere Standorte gewöhnt sind. Demnach war zu erwarten, dass die osteuropäischen Weizensorten eine geringere Oberflächentemperatur zeigen, als die deutschen Sorten. In Abbildung 4 ist eine entsprechende Tendenz erkennbar, sowohl bei Messungen mit der Fluke als auch mit der Drohne. Statistisch signifikant sind die Unterschiede jedoch nicht. Der deutliche Anstieg der Temperatur, die mit der Fluke-Kamera gemessen wurde, ab 16. Juni (ZS 73-75, Milchreife) geht mit der beginnenden Seneszenz einher. Die Pflanzen beginnen abzusterben und vertrocknen. Dadurch ist immer weniger Wasser zur Temperaturregulation vorhanden und die Pflanzentemperatur steigt an.

Die Temperaturwerte, welche mit der Drohne albris erfasst wurden, zeigen diesen Anstieg nicht. Sie liegen über den gesamten Zeitraum der Messungen deutlich unter jenen der Fluke-Messungen.

Parallel stattfindende Untersuchungen zeigten die Schwierigkeiten auf, die sich aus der geringen Auflösung der Thermalkamera der Drohne ergeben (BARMEIER & MÖNICH 2017). Dabei wurden Versuchsobjekte mit 1 bzw. 0.5 m² Grundfläche aus verschiedenen Entfernungen thermografiert und die Überblendung der Aufnahmen verglichen (Abb. 6). Als Überblendung wird die Wahrnehmung der Wärmestrahlung über das Objekt hinaus bezeichnet.

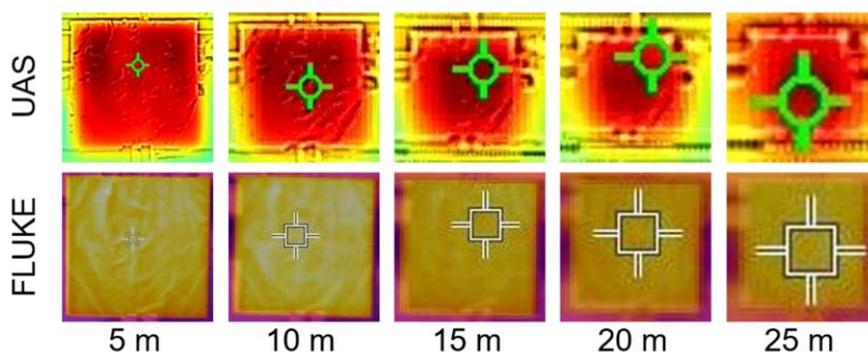


Abb. 6: Thermalaufnahmen einer Fläche von 1 m² nach verwendeter Kamera und Entfernung

Hierbei wurde deutlich, dass bei den Aufnahmen mit der Fluke auch in 25 m Entfernung noch klare Kanten und die Form eines Quadrates erkennbar waren. Bei der Drohne hingegen war die Form des Quadrates ab einer Entfernung von 20 m nur noch schwer erkennbar, die Wärmequelle scheint die Form eines Kreises anzunehmen. Die Überblendung war bei der Drohne deutlich stärker ausgeprägt als bei den Aufnahmen mit der Fluke.

Eine klare Abgrenzung des fotografierten Bereiches ist auch in der Auswertung der Weizenparzellen schwierig. Die Flughöhe der Drohne betrug 17 m. In Abbildung 6 wird erkennbar, dass auch bei dieser Entfernung die Überblendung deutlich negativen Einfluss auf die Qualität der Aufnahme hat. An den Aufnahmen mit der Fluke sieht man, dass eine höhere Auflösung hier Abhilfe schaffen kann. Dadurch wird die Auswertung der einzelnen Temperaturbereiche vereinfacht und die Abgrenzung der Parzellen zueinander eindeutiger, was Fehler und Abweichungen verringert.

Bei den Thermalfotografien konnte keine starke Korrelation zum Ertrag festgestellt werden. Dies deutet darauf hin, dass die Temperatur keinen konstant negativen Einfluss auf den Kornertrag hat.

4 Fazit & Ausblick

Verschiedene Ansätze der Hochdurchsatz-Phänotypisierung bieten die Möglichkeit, wichtige pflanzenphysiologische Parameter nicht-destruktiv und schnell zu erfassen. Dies spielt eine wichtige Rolle in der Beurteilung des Einflusses abiotischer Stressfaktoren, wie hohe Temperaturen, auf Pflanzen. Dabei stehen vor allem der geringere Arbeitsaufwand und der flexible Einsatz im Vordergrund. Im durchgeführten Feldversuch konnten Unterschiede zwischen den Weizensorten je nach Herkunft der Züchtung festgestellt werden. Eine Vorhersage des Kornertrages war aber schwierig und unpräzise. Es waren deutliche Ertragseinbuße bei den deutschen Weizensorten vorhanden, jedoch waren diese nur zu einem geringen Grad mit den Spektral- bzw. Thermalmessungen korreliert.

Für die Erfassung von Spektralreflexionen und Oberflächentemperatur können entsprechende Sensoren auf UAVs angebracht werden, so dass größere Flächen in sehr kurzer Zeit beurteilt werden können. Spektralindizes können ohne großen Aufwand errechnet und ausgewertet werden und werden häufig zur Vorhersage des Kornertrages oder auch Nährstoffbedarfes herangezogen. Bei der Thermalfotografie ist zu beachten, dass die Kameras eine ausreichende Auflösung haben, damit der Grad der Überblendung möglichst gering ist und die zu untersuchenden Flächen scharf abgegrenzt abgebildet werden können. Allerdings ist bei diesen bildgebenden Verfahren eine zeitaufwändige Nachbereitung und die Verfügbarkeit und Kenntnis entsprechender Software notwendig. Wenn jedoch die technischen Voraussetzungen geschaffen sind können Drohnen bei der Beurteilung des Zustandes von Getreidepflanzen zielgerichtet eingesetzt werden.

5 Literaturverzeichnis

- BARMEIER, G. & MÖNICH, T., 2017: Können Drohnen traditionelle Boniturmethode im Feldversuchswesen ersetzen? Lehrstuhl für Pflanzenernährung, Technische Universität München.
- FAO, 2017: The future of food and agriculture – Trends and Challenges. Rome.
- GUYOT, G., BARET, F. & MAJOR D.J., 1988: High Spectral Resolution: Determination of Spectral Shifts Between the Red and Near Infrared. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, **11**, 750-760

- PEÑUELAS, J., PIÑOL, J., OGAYA, R. & FILELLA, I., 1997: Estimation of plant water concentration by the reflectance Water Index WI (R900/R970). *International Journal of Remote Sensing* **18**(13) 2869-2875.
- ROUSE, J.W., HAAS, J.R.H., SCHELL, J.A. & DEERING, D.W., 1974: Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Third ERTS-1 Symposium NASA, Washington, DC, 309-317.
- SHIFERAW, B., SMALE, M., BRAUN, H.J., DUVEILLER, E., REYNOLDS, M. & MURICHO, G., 2013: Crops that feed the world 10. Past success and future challenges to the role played by wheat in global food security. *Food Security*, **5**, 291-31.
- TAIZ, L., ZEIGER, E., MOLLER, I.M. & MURPHY, A., 2015: *Plant Physiology and Development*. Sinauer Associates, Incorporated.
- ZADOKS, J.C., CHANG, T.T. & KONZAK, C.F., 1974: A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Research*, **14**(6), 415-421.