

Institut für Pflanzenkrankheiten
der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

**Erfassung befallsrelevanter Klimafaktoren in Weizenbeständen
mit Hilfe digitaler Infrarot-Thermografie**

Inaugural – Dissertation

zur

Erlangung des Grades

Doktor der Agrarwissenschaften

(Dr. agr.)

der

Hohen Landwirtschaftlichen Fakultät

der

Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität

zu Bonn

vorgelegt am 9.9.2005

von

Dipl.-Ing. agr. Jan-Henrik Lenthe

aus

Hannover

Referent:	Prof. Dr. H.-W. Dehne
Korreferent:	Prof. Dr. W. Kühbauch
Tag der mündlichen Prüfung:	30.1.2006
Gedruckt bei:	Alpha-Copy, Bonn
Erscheinungsjahr:	2006

Diese Dissertation ist auf dem Hochschulschriftenserver der ULB Bonn http://hss.ulb.uni-bonn.de/diss_online elektronisch publiziert.

Meiner Familie
Helga & Anne-Elisa & Manfred

Erfassung befallsrelevanter Klimafaktoren in Weizenbeständen mit Hilfe digitaler Infrarot-Thermografie

Die digitale Infrarot-Thermografie ermöglicht eine abbildende, flächige Messung der Oberflächentemperatur von Pflanzen (-beständen), deren Verteilung in einem Geoinformationssystem untersucht werden kann.

Die Oberflächentemperatur von Pflanzenbeständen wird wesentlich durch die Transpiration der Blattfläche bestimmt. Durch Verdunstung von Wasser kühlt sich vitales Gewebe gegenüber der Umgebungstemperatur bzw. nekrotischem Gewebe ab. Ein teilschlag-spezifisches Pflanzenschutzmanagement beruht auf der Detektion und Lokalisierung von verschiedenen Pathogenese relevanten Faktoren, wie Primärbefall mit Blattkrankheiten, unterschiedlicher Bestandsdichte durch Wasser- und Nährstoffversorgung oder lokalen klimatischen Bedingungen, speziell Blattnässe.

Die Thermografie wurde als Fernerkundungssensor zur Erfassung von heterogen verteilten, ertragsrelevanten Faktoren unter Gewächshausbedingungen und im Freiland untersucht. Durch die Verwendung eines gekühlten Hintergrundes wurde die Temperatur der Blattfläche von Weizenpflanzen reproduzierbar gemessen. Unter Gewächshausbedingungen wurden biotische und abiotische Einflüsse auf die Blattemperatur von Weizen und Bohnen untersucht. Unterschiede in Wasser- und Stickstoffversorgung führten zu deutlichen Veränderungen der Blattemperatur von Weizen im Vergleich zur Umgebungstemperatur. Ein Befall mit Rostkrankheiten an Weizen und Bohne führt hingegen zu relativ geringen Temperaturveränderungen. Die Pathogenese wirkte sich eher auf das thermische Muster der Blättern als auf die absolute Blattemperatur aus.

Weizenbestände wurden thermografisch aus der Luft erfasst. Die Untersuchungen von Bestandstemperatur- und Ertragsverteilung zeigte keine signifikanten Zusammenhänge, wohl aber den Trend, dass lokal niedrigere Bestandstemperaturen auf ein höheres Ertragsniveau hindeuten. Lokal unterschiedliche Dichten von Weizenbeständen waren anhand der Bestandstemperatur deutlich zu erkennen. Biotische Schädigungen der Pflanzen wirkten sich im Freiland kaum auf die Bestandstemperatur aus. Sowohl zwischen behandelten und unbehandelten Flächen als auch in unterschiedlich stark befallenen Teilflächen ließ sich kein eindeutiger Zusammenhang von Bestandstemperatur und Befallsstärke feststellen. In einem homogenen, konventionell bestellten Weizenfeld traten vergleichbare Temperaturunterschiede wie zwischen Beständen mit unterschiedlichem Fungizideinsatz auf. Messungen des Mikroklimas in Weizenbeständen zeigten lokal unterschiedliche Ausprägungen von Pathogenese relevanten Klimaparametern. Speziell Blattnässe, als entscheidender Faktor für die Entwicklung von bedeutenden Blattkrankheiten, konnte durch die Abkühlung des Bestandes thermografisch erfasst werden, sowohl unter Gewächshaus- als auch unter Freilandbedingungen. Mit Hilfe der digitalen Infrarotthermografie kann die Prognose der Entwicklung bedeutender Blattkrankheiten wie Braunrost und Septoriablattdürre in teilflächiger und zeitlicher Hinsicht präzisiert werden.

Detection of yield relevant climatic factors in wheat by digital infrared-thermography

Digital infrared thermography allows the geometrically resolved measurement of surface temperature of large, planar objects such as plant canopies. The data can be fed into a geoinformation system to evaluate the distribution of canopy temperature. The canopy temperature is largely influenced by the cooling effect of transpiration, so that vital leaves appear can be expected to show another leaf temperature than stressed leaves.

A site specific plant protection management depends on the detection of local differences in the occurrence of yield relevant factors such as fungal pathogens, canopy density through availability of water and nutrients or local conditions of microclimate, especially leaf wetness.

The intention of the conducted studies was the application of digital thermography as a sensor for yield relevant factors under greenhouse and field conditions. Biotic and abiotic factors expected to influence leaf temperature of wheat were monitored thermographically. A method to determine the leaf temperature of fragmented leaf area such as wheat plants was developed. The thermal effect of a rust infection on wheat and bean leaves was studied.

Laboratory studies showed different canopy temperature compared to ambient temperature due to differences in supply of water and nitrogen of a wheat plants. The effect of biotic stress factors, rust of wheat and beans, was small compared to abiotic stress. The pathogenesis resulted in changes of the thermal pattern of leaves rather than effecting the absolute leaf temperature. Wheat canopies were thermographically monitored as a whole throughout the growing season. The temperature distribution was compared with yield maps showing little correlation, however hinting at a local correspondence of low canopy temperature and high yield level. In contrast an abiotic factor on yield, canopy density, was readily detectable. The evaluation of local differences in canopy temperature compared to levels of infection by leaf pathogens between fungicide treated and untreated plots and different levels of infection within untreated plots showed little correlation. The signal leaf temperature was found to be very unspecific. Biotic and abiotic factors influenced the transpiration in the same manner. Therefore an identification of the cause of leaf temperature differences was not possible. Even in a very homogenous canopy that was kept healthy by a conventional plant protection management, a considerable heterogeneity of canopy temperature was found. The temperature span leveled with the span between plots with and without fungicide treatment. Local canopy temperatures were compared to micro-climatic parameters measured within the canopy. Of these, leaf wetness, a crucial parameter for the prognosis of important leaf pathogens was detectable by its decreasing effect on canopy temperature, both under greenhouse conditions and in the field. Therefore the method of digital thermography seems to have high potential for the temporal and spatial improvement of prognosis of leaf infections of brown rust and septoria leaf blotch.

Erfassung befallsrelevanter Klimafaktoren in Weizenbeständen mit Hilfe digitaler Infrarot-Thermografie

1 EINLEITUNG	1
2 MATERIAL UND METHODEN	10
2.1 Versuchsorganismen	10
2.1.1 Pflanzen	10
2.1.2 Pathogene	10
2.2 Datenverarbeitung	11
2.3 Anzucht von Pflanzen unter kontrollierten Bedingungen	11
2.4 Anzucht und Vermehrung von Pathogenen	12
2.5 Inokulation von Versuchspflanzen	12
2.6 Erfassung der Pathogenentwicklung	13
2.6.1 Uredosporenkeimung von <i>Puccinia triticina</i>	13
2.6.2 Befallsbonitur	13
2.7 Thermografische Messungen	14
2.7.1 Thermografiesystem	14
2.7.2 Kontrolle der Messbedingungen	14
2.7.3 Messaufbau	14
2.7.3.1 Blattemperatur	14
2.7.3.2 Referenztemperatur	15
2.7.3.3 Blattnäse	15
2.7.3.4 Thermografische Erfassung von Blattnäse	16
2.7.3.5 Differenzierung von Pflanze und Hintergrund	16
2.7.3.6 Untersuchungen zur Blattfragmentierung	17
2.7.4 Messdauer	18
2.7.4.1 Einzelaufnahmen	18
2.7.4.2 Aufnahmeserien	18
2.7.5 Thermografische Messungen im Freiland	18
2.7.6 Auswertung von Thermogrammen	19
2.7.6.1 Pflanzen vor ungekühltem Hintergrund	19
2.7.6.2 Pflanzen vor gekühltem Hintergrund	19
2.8 Gaswechsellmessungen	19
2.9 Durchführung der Freilandversuche	20
2.9.1 Versuchsstandorte	20
2.9.1.1 Dikopshof	20

2.9.1.2 Klein Altendorf	21
2.9.1.3 Meckenheim	22
2.9.1.4 Jülich	22
2.9.2 Messung des Mikroklimas	23
2.9.3 Parzellenmarkierung	23
2.9.4 Ertragsmessung	24
2.10 Verarbeitung von Daten aus Freilandmessungen	24
2.10.1 Befallsdaten	24
2.10.2 Ertragsdaten	24
2.10.3 Stabilität von Bestandstemperaturzonen	25
2.10.4 Auswertung thermografischer Daten mit einem Geoinformationssystem	25
2.10.4.1 Berücksichtigung von Messflächen	25
2.10.4.2 Berücksichtigung von Punktrasterdaten	26
2.10.4.3 Berücksichtigung aller Pixelinformationen	26
2.10.5 Statistische Auswertung	26
3 ERGEBNISSE	27
3.1 Einfluss der Umgebungstemperatur auf die Keimung und das Keimschlauchwachstum von <i>P. triticina</i>	27
3.2 Heterogenität des Mikroklimas in Weizenbeständen	28
3.2.1 Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit	28
3.2.2 Blattnässedauer	32
3.2.3 Abtrocknungsdauer von Niederschlägen	34
3.2.4 Horizontale Schichtung	35
3.2.4.1 Lufttemperatur	35
3.2.4.2 Relative Luftfeuchtigkeit	36
3.2.5 Lufttemperatur und Bestandstemperatur	38
3.3 Thermografische Messung der Blatttemperatur von Weizenpflanzen	40
3.3.1 Differenzierung von Pflanzen und Hintergrund	40
3.3.2 Bestimmung der Trenntemperatur	42
3.3.3 Einfluss des Fragmentierungsgrades	43
3.3.4 Einfluss der Aufnahmerichtung	45
3.4 Einfluss von abiotischen Stressfaktoren auf die Blatttemperatur	46
3.4.1 Einfluss der Wasserversorgung	46
3.4.2 Einfluss der Stickstoffversorgung	48

3.5 Untersuchungen zur thermografischen Erfassung von Blattnässe	49
3.5.1 Abtrocknung von Tropfen	49
3.5.2 Abtrocknung eines Weizenbestandes unter kontrollierten Bedingungen	51
3.5.3 Blattnässe in Freilandbeständen	52
3.5.4 Vergleich von lokaler Bestandstemperatur und Blattnässe	54
3.6 Einfluss von Umweltfaktoren auf die Blatttemperatur	56
3.6.1 Thermografische Untersuchungen an Weizen	56
3.6.1.1 Vergleich biotisch und abiotisch bedingter Blattschäden	56
3.6.1.2 Pathogenese von Braunrost unter kontrollierten Bedingungen	60
3.6.1.3 Entwicklung von Blattkrankheiten im Freiland	62
3.6.1.4 Einflüsse auf die Bestandstemperaturmessung	70
3.6.2 Thermografische Untersuchungen an Bohne	74
3.6.2.1 Temperaturmuster durch abiotische Faktoren	74
3.6.2.2 Charakterisierung des Befallsverlaufs von <i>Uromyces appendiculatus</i>	78
3.7 Thermografie von Weizenbeständen im Freiland	82
3.7.1 Einfluss von Bodenheterogenität auf die Bestandstemperatur	82
3.7.2 Temperaturverteilung in einem homogenen Weizenbestand	86
3.7.2.1 Berücksichtigung von Messflächen	87
3.7.2.2 Berücksichtigung von Punktrasterdaten	87
3.7.2.3 Berücksichtigung aller Pixelinformationen	89
3.7.2.4 Stabilität von Temperaturzonen	91
3.7.3 Bestandstemperatur und Ertrag	95
3.7.3.1 Auf einem homogen bestellten Weizenbestand	95
3.7.3.2 Einfluss von Stickstoffdüngung und Fungizideinsatz	97
3.7.3.3 Einfluss von Fungizideinsatz an verschiedenen Weizensorten	99
4 DISKUSSION	104
5 ZUSAMMENFASSUNG	132
6 LITERATURVERZEICHNIS	135

1 EINLEITUNG

Präzisierte Landwirtschaft

„Precision Farming“ ist ein Anbaumanagement, mit dem Ziel, den Mittel- und Arbeitseinsatz zu reduzieren, indem die zu bearbeitende Fläche in Zonen unterschiedlicher Bearbeitungsintensität eingeteilt wird. Für den Anbauer ist der Gewinn, der sich aus dem Ertrag bei optimalem Faktoreinsatz ableitet, für einen erfolgreichen Anbau entscheidend. Konventionelle Bestellung läuft weitgehend auf eine gleichförmige Bearbeitung eines Schlags gleicher Frucht hinaus, wobei einem erfahrenen Anbauer unterschiedliche Potentiale innerhalb der Flächen bekannt sind, die so weit wie möglich bei der Bearbeitung auch berücksichtigt wurden und werden (Schueller, 1997). Daher ist das Prinzip der präzisierten Landwirtschaft älter als die Satelliten gestützte Navigation auf einem Schlag. Durch die Vergrößerung der Fläche im Zuge der Rationalisierung und Auslastung von großen Maschinen und die damit verbundene überbetriebliche Bestellung von Anbauflächen können langjährige Erfahrungen des Flächenbesitzers bei der Bestellung immer seltener berücksichtigt werden. Die moderne, präzisierte Landwirtschaft stützt sich daher auf digitale, georeferenzierte Schlagkarten, die Informationen zur Verteilung Gewinn relevanter Faktoren eines Schlags für beliebige Nutzer zur Verfügung stellen. Als Vorzüge eines teilflächigen Einsatzes von Faktoren nennen Godwin et al. (2003) neben höherem Gewinn durch bedarfsgerechten Einsatz, die Reduktion des Eintrags von Agrarchemikalien und die genaue Dokumentation der Maßnahmen.

Die Herausforderungen bei der Umsetzung dieses Anbaumanagements liegen a) in der Erfassung von Bestandsparametern. Aus Anwendungssicht müssen diese in ausreichender zeitlicher und räumlicher Auflösung vorliegen; b) in der Interpretation der Karten und ihrer Ableitung zu Applikationskarten; c) in der Applikation von Maßnahmen gemäß der Applikationskarten mit, für einen teilflächigen Einsatz mehr oder weniger geeigneten Maschinen, und d) in der Anpassung von Maschinen und Applikationstechniken an die Anforderungen der präzisierten Landwirtschaft (Dawson, 1997).

Die einzelnen Teilbereiche der Bestellung sind nach heutigem Stand der Technik und nach angebaute Frucht in unterschiedlicher Weise für die Implementierung in ein teilschlagspezifisches Management geeignet (Tab. 1). Für die Eignung sind besonders Orts- und Zeittreue, wie z.B. bei den Faktoren Bodenqualität, Nährstoffversorgung und Unkrautbesatz wichtig, da für ihre Erfassung nur höchstens eine Bonitur pro Saison notwendig ist. Ungünstig auf die Praktikabilität wirken sich der Bonituraufwand und seine Kosten aus, wie bei engmaschigen Bodenproben, auch wenn diese vollmechanisiert durchgeführt werden. Zusätzlich ist die Verteilung von Parametern entscheidend (Dawson, 1997). Ein homogen verteilter Parameter eignet sich prinzipiell nicht für eine

teilschlagspezifische Kontrolle. Die Berücksichtigung von kleinräumiger Heterogenität ist nur sehr begrenzt möglich. Daher wurden Pilzkrankheiten und Insektenbefall als ungünstig verteilt eingestuft, ausgenommen Nematoden, die, außer bei Verschleppung, sehr orts- und zeittreu auftreten (Avenando et al., 2004; Jones, 1980). Günstig sind großflächige, in sich homogene Zonen, die im Idealfall bei guter Identifizierbarkeit nur ein An- und Ausschalten einer Maßnahme erfordern. Die Erfassbarkeit setzt sich aus der Identifizierbarkeit und der Interpretierbarkeit des Signals zusammen. Naturgemäß ist diese für die Ertragsmessung gut. Für die meisten in Überfahrt geernteten Kulturen wie Getreide, Rübe und Kartoffel stehen technische Lösungen bereit, die aber unterschiedlich zur Anwendung kommen. Die Erfassbarkeit von Unkraut ist als mittel einzustufen, etwa bei der Unterscheidung von mono- und dikotyledonen Unkräutern und ggf. Kulturpflanzen. Bei Pilzkrankheiten steckt die Unterscheidung von befallener und unbefallener Blattfläche noch im Forschungsstadium. Sehr begrenzt ist für die Pilze auch die zeitliche Gültigkeit einer Bonitur. Zusammenfassend beschreibt die technische Machbarkeit, wie weit eine Lösung der technischen Schwierigkeiten möglich erscheint. Von Bedeutung ist dabei die Notwendigkeit der Differenzierung, Zeit- und Ortstreue und die Verteilung im Bestand. Für eine Etablierung teilflächiger Maßnahmen ist letztlich der wirtschaftliche Vorteil für den Anbauer entscheidend.

Insektizide sind finanziell relativ günstig und in Deutschland auch nur in geringem Maße notwendig; haben daher geringes wirtschaftliche Potential. Hingegen führen Nematoden im Zuckerrübenanbau zu hohen wirtschaftlichen Schäden. Ellis (1997) untersuchte den Einfluss der räumlichen Variabilität des Feldaufgangs von Sommerweizen und Winterölraps auf den Ertrag und stellte fest, dass dieses ein unbedeutender Faktor ist.

Tab. 1: Einschätzung der Eignung verschiedener Schlag- und Bestandsparameter für eine Berücksichtigung in einem teilschlagspezifischen Anbaumanagement.

	Parameter						
	Boden- qualität	Aussaat	Nährstoffe	PfSch. Unkraut	PfSch. Pilz	PfSch. Schädlinge	Ertrag
Verteilung	+		+	+	-	- / +	o
Erfassbarkeit	o		o	+	-	-	o / +
Gültigkeit	+		o	+	o	- / +	+
Tech. Machbarkeit	+	+	+	+	-	-	+
Wirtschaftl. Potential	+	-	+	+	+	- / +	+

(- = gering, ungünstig, o = mittel, + = hoch, günstig)

Bei allen anderen Maßnahmen ist eine Reduktion des Einsatzes, gerade vor dem Hintergrund sinkender Erzeugerpreise von hohem wirtschaftlichen Interesse. Eine teilschlagspezifische Bekämpfung von Unkräutern (Østergaard, 1997) ist neben der Ertragsmessung und der bedarfsgerechten Stickstoffdüngung der vielversprechendste Einsatzbereich.

Gegenwärtig befinden sich die aufgeführten Anwendungsbereiche in unterschiedlichen Entwicklungsphasen (Tab. 2). Die gängigste Anwendung ist die Ertragserfassung, die auf größeren Mähdreschern zum Standard geworden ist. Im Ertrag bilden sich sämtliche Parameter im Saisonverlauf ab, so dass dieser Parameter einen besonders hohen Informationsgehalt hat. Allerdings ist auch er entsprechend unspezifisch. Ebenfalls praktisch genutzt wird die Online-Erkennung des Stickstoffbedarfs durch den Hydro-N-Sensor (Schwaiberger, 2001). Die Variation der Saatkraft ist durch Öffnen und Schließen der Ablageorgane relativ einfach und wird daher auch als nutzbar angegeben. Ebenfalls technisch einfach ist die Erhebung von Bodenwiderstandsdaten beim Pflügen. Im Stadium der Forschung befinden sich die meisten Anwendungen im Bereich Pflanzenschutz. Die einzige praktische Anwendung eines teilflächigen Fungizideinsatzes beruht auf der Online-Messung der zu benetzenden Blattfläche über einen Pendelsensor in Verbindung mit einer Steuerung des Spritzbrühenausstoßes (Dammer et al., 2001).

Die Unkrautbekämpfung ist dagegen weit fortgeschritten und hat hohes Potential für eine teilschlagspezifische Durchführung, wie schon Nordmeyer et al. (1997) feststellten. Im Bereich Boden sind Techniken zur Messung der elektrischen Leitfähigkeit und der mechanisierten Bodenbeprobung so weit fortgeschritten, dass sie käuflich zu erwerben sind.

Tab. 2: Aktueller Stand der Anwendung verschiedener Schlag- und Bestandsparameter in einem teilschlagspezifischen Anbaumanagement.

	Aktueller Stand der Anwendung						
	Bodenbe- arbeitung	Saat	Düngung	Unkraut- auftreten	Pilzbefall	Schädlings- befall (Nematoden)	Ernte- ertrag
Datenerfassung	F, PT, N		N	F, PT	F, PT	F, PT	N
Dateninterpretation	F			PT	F	F	F, PT
Anwendungstechnik	N	N	N	F, PT	F, PT		N

(F=Forschung, PT=Praxistest, N=Nutzung)

In fast allen Bereichen bedarf es für die Interpretation der Daten weiterer Forschung, speziell was die Verknüpfung von Daten zu unterschiedlichen Parametern betrifft. Die Entscheidung

für bestimmte Maßnahmen muss auf wirtschaftlichen Optimierungskurven beruhen, die für die lokalen Szenarien in einem Bestand getrennt zu bewerten sind. Die Schwerpunkte ergeben sich aus der Frage, welche heterogen verteilten Parameter die Heterogenität des Deckungsbeitrags bedingen und welche von diesen durch Maßnahmen beeinflussbar sind (Dabbert & Kilian, 2002).

Fernerkundung - Methoden der teilschlagspezifischen Datenerfassung

Die Fernerkundung ist eine Art der Datenerfassung, die dem Bedarf in der präzisierten Landwirtschaft sehr entgegen kommt. Die Ferne der Fernerkundung ist nicht näher definiert, die Methode beruht aber auf berührungsloser Erfassung von Zuständen. Für die technische Umsetzung stellt sich die Frage, ob Parameter in einem Online-Verfahren zeitgleich zur Maßnahme oder getrennt voneinander in verschiedenen, d.h. zusätzlichen Arbeitsgängen durchgeführt werden.

Online-Verfahren reduzieren den zeitlichen Aufwand der Datenerfassung und sie messen den aktuellen Zustand. Sie eignen sich daher für die Erfassung von ortsuntreuen Parametern. Nachteilig ist die Datenerfassung über einen längeren Zeitraum, da Veränderungen der Umgebungsbedingungen während der Feldbearbeitung in der rechnerischen Dateninterpretation berücksichtigt werden müssen.

Eine fernerkundliche Datenerfassung kann auch aus großer Ferne von Satelliten oder Flugzeugen aus durchgeführt werden. Diese Methoden sind für ortstreue Parameter geeignet, für deren Erfassung nur einzelne Aufnahmen notwendig sind. Dann sind die begrenzte Verfügbarkeit und die hohen Kosten von geringerer Bedeutung. Im Idealfall erfolgt die Datenaufnahme eines ganzen Bestandes in einem Messvorgang. Diese Daten können mit geringem Aufwand mit einem Geoinformationssystem (GIS) zu Applikationskarten verarbeitet werden. Bei der praktischen Anwendung bestehen die Schwierigkeiten in der Interpretation der Signale. Die passive Fernerkundung stützt sich auf den Empfang von reflektierter oder emittierter elektromagnetischer Strahlung im sichtbaren, nah bis mittel-infraroten und thermisch-infraroten Wellenlängenbereich. Ohne Verarbeitung sind die empfangenen Signale unspezifisch, die zusätzlich von bestimmten störenden Einflüssen, z.B. durch Veränderungen der Sonneneinstrahlungsintensität, beeinflusst werden. Im nah-infraroten Bereich hat sich die multispektrale Methode durchgesetzt, die durch Berechnung von Indizes aus verschiedenen Wellenlängenbereichen einen gewissen Grad der Differenzierung ermöglicht.

Die digitale Infrarot-Thermografie beruht im Gegensatz zur multispektralen Technik nicht auf Reflektion sondern auf Emission. Erfasst wird langwellige Strahlung im Wellen-

längenbereich zwischen 8 und 12 μm , die über entsprechende Algorithmen, die auf dem Planck'schen Strahlungsgesetz beruhen und Wellenlänge mit Temperatur verbinden, in eine Oberflächentemperatur übersetzt werden (Anonym, 2002a). Mit einer abbildenden Technik werden die gemessenen Oberflächentemperaturen als Falschfarbbild dargestellt.

Die teilflächige Bekämpfung von pilzlichen Pathogenen, speziell Blattpathogenen, ist durch die örtliche und zeitliche Variabilität schwierig, angefangen mit der Erfassung von Daten, die die Verteilung in einem Bestand beschreiben. Eine Erfassung durch eine berührungslose Methode, sei es mit dem Auge oder durch einen technischen Sensor, ist auf Symptome angewiesen, deren Auftreten aber bereits einen Schaden an der Pflanze darstellt. Daher ergibt sich der Ansatz, biotische Parameter nicht direkt zu erfassen, sondern ihr Auftreten teilflächig zu prognostizieren. Prognosemodelle berechnen auf Basis von Wetterdaten, entscheidend sind Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Blattnässe, das Befallsrisiko in Abhängigkeit vom Entwicklungsstadium und z.T. der Stickstoffversorgung für verschiedene Erreger, z.B. PRO_PLANT (Volk & Frahm, 1993), SIMPHYT (Gutsche & Kluge, 1995), SIMCERC, TOMCAST (Madden et al., 1978). Diese Daten werden üblicherweise von einem sehr grobmaschigen Netz von Wetterstationen übernommen und die Prognosen haben daher keine schlagspezifische, geschweige denn teilflächige Gültigkeit. Den Ansatz einer schlagspezifischen Prognose bietet nur der Septoria-Timer nach Weihofen, der über die lokal gemessene Blattnässedauer ein Befallsrisiko für Septoria-Blattdürre berechnet (Verreet et al., 2000).

Mikroklima –Entwicklungsbedingungen für Pathogene

Zur Infektion von Weizenpflanzen mit Braunrost und Septoriablattdürre sind die Sporen der Erreger *Puccinia recondita* und *Septoria tritici* auf den Kontakt mit flüssigem Wasser angewiesen (Huber & Gillespie, 1992; Kluge et al., 1999). Je länger Wassertropfen auf den Blättern vorhanden sind, umso höher ist die Wahrscheinlichkeit für eine Infektion. Andererseits führen Unterbrechungen der Blattnässedauer bei Braunrost zum Absterben der keimenden Sporen (DeVallavieille-Pope et al., 1995; Stuckey & Zadoks, 1989). Die Blattnässedauer beginnt mit dem Auftreffen und endet mit der vollständigen Verdunstung eines Tropfens. Eine genaue Erfassung der Blattnässedauer ist daher Grundlage für eine präzise Abschätzung des Infektionsrisikos. Sie wird bedingt durch Niederschlag, relative Luftfeuchtigkeit, Lufttemperatur, Bodentemperatur und Windgeschwindigkeit in Verbindung mit dem Blattflächenindex und dem Pflanzenhabitus. Zur Abschätzung eines Infektionsrisikos für ein teilflächenspezifisches Pflanzenschutzmanagement ist Kenntnis über die Verteilung und Variationsbreite der Ausprägung von mikroklimatischen Parametern im Bestand sowie

ihr Einfluss auf lokale Unterschiede in der epidemischen Entwicklung von pilzlichen Pathogenen von Bedeutung.

Daniel & Shen (1991) nannten verschiedene Autoren, die sich mit der Erstellung von Prognosemodellen zur Abschätzung von Anfang und Dauer von Blattnässeperioden in Apfel-, Kartoffel-, Zwiebel- und Erdnusskulturen befasst haben. Diese Modelle schätzen die Blattnässedauer über die relativen Luftfeuchtigkeit (Schwelle bei 90% rLF), gemessen von einem Netz von Flughafenwetterstationen. Diese Abschätzung ist relativ gut, kann aber auf Grund der Wetterstationsverteilung nur großräumige Prognosen abgeben. Wieringa (1998) nennt für die extrapolierbare Reichweite von Temperaturdaten eine Radius von ca. 2,5 km, vorausgesetzt, dass die Wetterstation in repräsentativer Position aufgestellt ist. Aber auch mit einer Wetterstation direkt neben einem Feld ist eine Beschreibung der mikroklimatischen Heterogenität in einem Bestand nicht möglich. Um diese in einer ausreichenden Auflösung für eine teilflächige Prognose zu erfassen, ist idealerweise ein Messpunktnetz mit Zellgrößen, die deutlich kleiner sind als die Schlaggröße, notwendig.

Gegenwärtig steht keine Sensorik zur Verfügung, die Nässe direkt auf Blättern detektieren kann. Seem et al. (1991) versuchten aus Daten eines großräumigen Wetterstationsnetzes durch Einbeziehung von Landschaftsmodellen ein engmaschiges ($0,1 \text{ km}^2$) Klimadatenetz zu interpolieren, um dem Bedarf von IPS-Systemen (Integriertes Pflanzenschutzsystem) an räumlich hoch aufgelösten Wetterdaten im Pflanzenschutz nachzukommen. Für ein teilschlagspezifisches Pflanzenschutzmanagement ist aber auch eine Zellengröße von ca. $300 \times 300 \text{ m}$ zu groß. Daher wäre eine Methode um Pathogen relevante Klimafaktoren ganzflächig zu messen, wünschenswert.

Blattnässesensoren arbeiten nach dem Prinzip veränderter elektrischer Leitfähigkeit durch Wasser, entweder in einem Textilgewebestreifen oder auf einer mit metallischen Leitbahnen belegten Kunststoffplatte. Der Einsatz von Wetterstationen im Bestand ermöglicht die Aufzeichnung des lokalen Mikroklimas. Jedoch ist die räumliche Auflösung abhängig von der Anzahl der Sensoren und somit stark begrenzt.

Blatttemperatur – Bestimmende Faktoren

Ayeneh et al. (2002) untersuchten die Temperatur verschiedener Pflanzenorgane, u.a. der Blätter, unter Hitzestress. Die Transpirationsrate unterliegt der Wasserversorgung über die Wurzeln und das Xylem sowie dem Wasserdampfsättigungsdefizit der umgebenden Luft. Durch die Verdunstungskälte kühlt sich das transpirierende Blatt gegenüber der Umgebungstemperatur bzw. gegenüber einer nicht transpirierenden Referenzoberfläche ab. Neben morphologischen Anpassungen an Hitzestress, Rollen der Blätter bei Weizen oder paraheliotroper Blattbewegung bei Soja, ist die Transpiration für die Pflanze der einzige Weg

der Temperaturregulation (Isoda & Wang, 2002). Somit eignet sich die Thermografie prinzipiell zur Erkennung von Stress, der durch den Faktor Wasserversorgung auf die Pflanze wirkt. Speziell zur Erkennung von abiotisch bedingtem Wasserstress wurde Thermografie in verschiedenen Arbeiten erfolgreich eingesetzt, (Gebhard, 1984; Hatfield et al., 1984; Inoue, 1990). Darauf aufbauend nutzte Merlot digitale Infrarot-Thermografie (DIT) zur Selektion von Arabidopsis-Mutanten mit einem Defekt in der Stomataregulation (Merlot et al., 2002). Trockenstress tolerante Weizensorten konnten anhand ihrer höheren Blatttemperatur unter ariden Bedingungen von nicht toleranten Sorten unterschieden werden (Rashid, 1999). Ebenfalls konnte biotisch bedingter Wasserstress, verursacht durch Schäden am Wurzelsystem von Zuckerrübe und Baumwolle durch die bodenbürtigen Pathogene *Phythium aphanidermatum* bzw. *Phymatotrichum omnivorum*, thermografisch erkannt werden (Pinter, 1979).

Um die Aspekte des “Precision Farming” auf den Pflanzenschutz gegen pilzliche Pathogene zu übertragen, wurde die DIT u.a. als Werkzeug zur Präzisierung von räumlichen und zeitlichen Prognosen für das Auftreten von Blattkrankheiten angewandt. Als wesentlicher Faktor für die Pathogenese der Erreger bedeutender Blattkrankheiten des Weizens, wie *Puccinia triticina* und *Septoria tritici*, wurde das örtliche Auftreten und die Dauer von Blattnässeperioden betrachtet. Im Sinne eines teilschlagspezifischen Pflanzenschutzmanagements wurden Weizenbestände in der Vegetationsperiode regelmäßig thermografisch aufgenommen. Zur Interpretation dieser Aufnahmen wurden verschiedene “Ground truth”-Daten erhoben, um die DIT zur Identifikation von Risikozonen für den Befall mit Blattkrankheitserregern zu nutzen.

DIT wurde in Arbeiten zur Erkennung von Wasserstress durch biotische und abiotische Ursachen erfolgreich getestet (Inoue, 1990; Jackson, 1986; Pinter et al., 1990). Infrarot-Thermografie wurde schon 1974 zur Erfassung von klimatischen Parametern in Pflanzenbeständen genutzt. Neben der Thermografie von Pflanzenbeständen und daraus abgeleiteten Schlüssen auf das Bestandsmikroklima wurde darin vornehmlich die Thermografie des Bodens und deren Aussage über das Mikroklima behandelt (Derksen, 1974).

Bestandstemperatur – Thermografie von Freilandbeständen

Die Blatttemperatur wird durch externe Wärmequellen bedingt, konvektionell über die Luft und als Strahlungswärme von Sonne und Objekten in der Umgebung, z.B. dem Boden. Kulturpflanzen haben keine Möglichkeit ihre Temperatur anzuheben, sondern nur nach Bedarf durch Transpiration zu kühlen. Die Bestandstemperatur unterliegt den Einstrahlungsbedingungen zum Zeitpunkt der thermografischen Aufnahme, welche sich

kurzfristig verändern können. Dieses muss bei der Interpretation und bei Vergleichen von Aufnahmen zu unterschiedlichen Terminen berücksichtigt werden. Neben diesem externen Faktor, dessen Einfluss auf die Bestandstemperatur als weitgehend einheitlich für den gesamten Bestand betrachtet werden kann, treten Faktoren auf, die lokal Abweichungen von der „normalen“ Bestandstemperatur bewirken. Veränderungen des Bodenbedeckungsgrades durch die Vergrößerung der transpirierenden Blattfläche verändern die Struktur eines Bestandes bzw. das Verhältnis besonders zu beschatteten Bodenanteilen. Die möglichen Gründe für die Veränderung der Bestandsstruktur sind vielfältig, z.B. Veränderungen der Blattstellung, Reduktion der Blattfläche, Lager (Gebhard, 1984) und Wachstumsdepressionen. Sie führen zu thermografisch auffälligen Zonen im Bestand.

Pathogene – Thermografisch erkennbare Symptome

Die Veränderungen der Blattemperatur durch Pathogenbefall beruhen auf Veränderungen der Transpiration (Inoue et al., 1990). Zwar führt eine Infektion zu Veränderungen im pflanzlichen Stoffwechsel, wie bei Dunkel-Respiration und Photosynthese (Bassanezi et al., 2002). Da der Stoffwechsel bei gesunden Pflanzen aber keinen nennenswerten Einfluss auf die Blattemperatur hat (Chaerle & van der Straeten, 2000), steht die Veränderung der Transpiration als Blattemperatur bestimmender Faktor im Vordergrund (Lili et al., 1991). Daher eignet sich die Thermografie besonders für die Erfassung von Welkekrankheiten (Hoffmann et al., 1994) durch a) Pilze, z.B. Verticilium-Welke durch *Verticilium alboatrum* an Kartoffel und Zuckerrübe oder Fusarium-Welke durch *Fusarium oxysporum*, b) Bakterien, z.B. bakterielle Welken: durch *Clavibacter michiganensis* an Mais, c) Nematoden, z.B. *Heterodera schachtii* an Zuckerrübe oder *Meloidogyne naasi* an Weizen und Gerste. Hatfield (1990) nannte Verticilium-Welke, *Phialophora gregata* Gams. und *Phytophthora* spp. an Soja und *Fusarium* spp. an Bohne. Eine Störung der Transpiration tritt auch durch krankheitsbedingte Veränderungen des stomatären Widerstands auf, z.B. durch *Uromyces appendiculatus* an Bohne (Duniway & Durbin, 1971). Neben den physiologischen Symptomen produziert der Bohnenrost auch Schäden an den Blättern durch Uredosporenlager. Dabei kommt es zu Schäden an der Kutikula und zu unkontrolliertem Wasserverlust. Vergleichbare Symptome treten auch durch typische Blattkrankheiten wie Roste oder Echtem Mehltau an Weizen auf. Allerdings muss ein erheblicher Anteil der Blattfläche befallen sein, weit mehr als die üblichen Schadschwellen, damit der Befall sich in einer erfassbaren Veränderung der Blattemperatur bzw. der Bestandstemperatur äußert. Gleiches gilt für eine Verringerung der transpirierenden Blattfläche durch Nekrosen, z.B. durch Septoriablattdürre an Weizen. Zur Bekämpfung in Folge einer direkten Erkennung sind kurativ, erradikativ wirkende Pflanzenschutzmittel wie Quinoxifen von großer Bedeutung

(Oerke & Steiner, 2003). Für eine teilflächige Prognose sind die Krankheiten geeignet, für die bereits Prognosemodelle bestehen. Hauptsächlich sind das Pilzkrankheiten, deren Pathogenese in einem bestimmten Stadium auf Blattnässe angewiesen sind. Für eine Ausweisung von dauerhaften Risikozonen sind ortstreue Pathogene prädestiniert, Nematoden und bodenbürtige Pilze, denen durch teilflächigen Anbau von resistenten Sorten bzw. entsprechende Beizen vorzubeugen ist.

Grundlage für eine erfolgreiche Bekämpfung von Krankheiten ist die Früherkennung. Inkompatibilitätsreaktionen von TMV (Tomato mosaic virus) an Virus resistentem Tabak konnte mit Hilfe der Thermografie unter Laborbedingungen bereits in einem präsymptomatischen Stadium in einem Blattausschnitt erkannt werden (Chaerle et al., 1999). Der Einfluss des pilzlichen Blattpathogens *Puccinia striiformis*, dem Erreger des Gelbrosts, auf die Blattemperatur wurde bereits 1986 untersucht (Smith et al., 1986). In der frühen Pathogenese war die Blattemperatur um 0,2 bis 1,0 K reduziert, was auf erhöhte Transpiration durch lokale Zerstörung der Kutikula zurückgeführt wurde. Die physiologischen Auswirkungen der Infektion sind abhängig vom Pathosystem und dem Infektionsstadium (Bassanezi et al. 2002). Daraus ist eine uneinheitliche Veränderung der Temperatur von infizierten Blättern abzuleiten, je nachdem, wie die Transpiration von Blattzonen oder ganzen Blättern beeinflusst wird. Im Fall der TMV-Inkompatibilität bildeten sich durch Salicylsäure induzierten Stomataschluss um bis zu 0,4 K wärmere Punkte, in deren Bereich später Nekrosen auftraten. TMV-anfällige Pflanzen hingegen zeigten keine thermischen Auffälligkeiten. Durch Nekrosen und induzierten Stomataschluss durch nekrotrophe Pathogene (Shtienberg, 1992) wird die Blattemperatur lokal oder systemisch ansteigen. Zerstörungen der Kutikula, z.B. durch Uredosporenlager von *Puccinia triticina* und pathogeninduzierte Verstärkung des Xylemstroms wird die Blattemperatur lokal oder systemisch verringern (Smith et al., 1986).

Fragestellung

Voraussetzung für einen teilschlagspezifischen Pflanzenschutz gegen biotische Pathogene ist die Differenzierung von Zonen mit und ohne Behandlungsbedarf. Für die Behandlungsentscheidung bieten sich zwei mögliche Ansätze an: die direkte Erkennung des Pathogenbefalls anhand von Symptomen mit Beurteilung des Handlungsbedarfs anhand von Befallsschwellen und die Identifizierung von Risikozonen, die fördernd oder hemmend auf die Pathogenese wirken, mit dem Ziel Prognosemodelle räumlich und zeitlich zu präzisieren. In dieser Arbeit wurde die Eignung der hochauflösenden, digitaler Thermografie als Sensor für die Identifizierung von Befalls- und Befallsrisikozonen in Weizenbeständen untersucht.

2 MATERIAL UND METHODEN

2.1 Versuchsorganismen

2.1.1 Pflanzen

Untersuchungen unter kontrollierten Bedingungen wurden an Weizen (*Triticum aestivum* L.) der Sorten Munk und Kanzler und an Buschbohnen (*Phaseolus vulgaris* L.) der Sorte Saxa durchgeführt.

Die in Freilandversuchen angebauten Winterweizensorten (*Triticum aestivum* L.) sind in Tab. 3 aufgeführt.

Tab. 3: Ausgewählte Eigenschaften der im Freiland angebauten Winterweizensorten nach der beschreibenden Sortenliste des Bundessortenamts.

Sorte	Entwicklung	Habitus	Krankheitsanfälligkeit		
	Ährenschieben	Halmlänge	Mehltau	Septoria	Braunrost
Atoll	4	3	4	7	7
Biscay	5	3	4	6	3
Cortez	6	3	1	5	5
Charger*					
Dekan	5	4	1	4	8
Dream	6	6	2	4	4
Drifter	5	5	3	6	5
Isengrain*					
Novalis	5	5	4	5	8
Maverick	5	3	2	6	3
Ritmo	6	3	5	6	8
Terrier	5	5	6	5	4
Tommi	4	4	2	4	2
Winnetou	5	5	7	4	5

* = keine Angaben in Bundessortenliste; (1=gering, früh; 10=hoch, spät)

2.1.2 Pathogene

Im Labor wurden Untersuchungen zur Entwicklung der Blattkrankheiten Braunrost an Weizen durch *Puccinia triticina* und Bohnenrost durch *Uromyces appendiculatus* durchgeführt.

Im Freiland wurde mit den Erregern des Echten Mehltaus an Weizen, *Blumeria graminis* f.sp. *tritici* March., von Blattseptoria, *Mycosphaerella graminicola* (Müller) Hedjaroud, anam. *Septoria tritici* (Berk.) Berk., und von Braunrost, *Puccinia triticina* Rob. ex Desm., gearbeitet.

2.2 Datenverarbeitung

Folgende Programme wurden zur Datenverarbeitung verwendet.

APS ASSESS[®] (Lamari, 2002, American Phytopathological Society, St.Paul, Minnesota, USA): Grafische Trennung von Pflanze und Hintergrund.

ARCMAP[®] 8.3 (ESRI, Redlands, Kalifornien, USA): Erstellung von GIS-Karten.

DISKUS[®] 4.20 (Hilgers, Königswinter, BRD)

ERDAS IMAGINE[®] (Leica Geosystems GIS & Mapping, LLC, Atlanta, USA): Auswertung von GIS-Karten.

IRBIS PLUS[®] (Infratec GmbH, Dresden, BRD): Auswertung von Thermogrammen.

MICROSOFT EXCEL[®] (Microsoft Corporation, One Microsoft Way, Redmond, Washington 98052-6399 USA) :Tabellenkalkulation.

MICROSOFT ACCESS[®] (Microsoft Corporation, One Microsoft Way, Redmond, Washington 98052-6399 USA): Datenbank.

RDSPF[®] (RDS Technology Ltd., Minchinhampton,UK): Erstellung von Ertragskarten.

SPSS[®] 11.0 (SPSS Inc. Chicago, Illinois, USA), Statistik.

2.3 Anzucht von Pflanzen unter kontrollierten Bedingungen

Weizenpflanzen wurden mit 4 bis 15 Pflanzen pro Topf (7 x 7 cm) und Bohnenpflanzen mit einer Pflanze pro Topf ($\varnothing = 11$) in Einheitserde gesät. Weizen wurde im Gewächshaus bei ca. 20 °C und ca. 60 % rel. Luftfeuchtigkeit, Bohnen nach der Keimung im Gewächshaus in einem Labor bei ca. 20 °C und 40 % rel. Luftfeuchtigkeit und natürlicher Sonneneinstrahlung kultiviert. Um die Seneszens der ersten zwei Laubblätter der Bohnen hinauszuzögern, wurden neu angelegte Triebe entfernt.

In einem Pflanzcontainer (0,8 x 1,2 m) wurde Weizen im Gewächshaus bei ca. 20 °C und ca. 60 % rel. Luftfeuchtigkeit in sieben Reihen, mit 4 cm Kornabstand angezogen. Der Boden wurde aus C-Horizont, Einheitserde und Sand im Verhältnis 7:12:1 gemischt.

Gegen einen Befall mit *Blumeria graminis* wurden die Weizenpflanzen mit Fortress (Wirkstoff Quinoxifen, Dow AgroSciences GmbH) in 0,5 % Lösung bis zur vollständigen Benetzung der Blätter (ca. 150 ml m⁻²) eingesprüht. Zusätzlich wurden die Pflanzen, wo möglich, mit Cellophan vor Infektionen geschützt.

Eine unterschiedliche Stickstoffversorgung der Weizenpflanzen wurde durch Gabe von unterschiedlich konzentrierten Nährstofflösungen erreicht. Vier Pflanzen pro Topf wurden in dem nährstofffreiem Substrat Vermiculit angezogen und bis zum Vierblattstadium (EC 14) nach Bedarf mit einer Nährstofflösungen nach Hoagland mit 224 mg l⁻¹ versorgt und bewässert. Dann wurde für die Variante mit Stickstoffmangel das Substrat ersetzt und fortan die Nährstofflösung ohne Stickstoff appliziert. Diese Behandlung resultierte nach einer

Woche in einem um 42 % reduzierten Stickstoffgehalt der Blätter (Tartachnyk & Rademacher, 2003).

Bewässert wurde nach Bedarf, ggf. mit Zusatz von 0,5 % Düngerlösung (Flori 2, Eufloor, München). Trockengestresste Weizenpflanzen wurden drei Tage vor Versuchsbeginn nicht mehr bewässert, so dass der Boden trocken war.

2.4 Anzucht und Vermehrung von Pathogenen

Puccinia triticina

Der Erreger des Braunrosts wurde auf ca. 14 Tage alten Weizenpflanzen der Sorte Monopol zur Sporengewinnung kultiviert. Zur Inokulation wurden Uredosporen in Wasser mit Zusatz von 0,1 % Tween 20 suspendiert und auf die Pflanzen gesprüht. Zur Schaffung von günstigen Infektionsbedingungen wurden die Pflanzen für 24 Stunden bei 100 % rel. Luftfeuchtigkeit und 20 °C inkubiert und anschließend im Gewächshaus gehalten. Zum Schutz vor einer Infektion mit *Blumeria graminis* wurde über die Pflanzen eine Tüte aus Cellophan gestülpt. Nach ca. 10 Tagen konnten reife Uredosporen geerntet werden. Durch Schütteln der Pflanzen fielen reife Uredosporen von den Sporenlagern ab und konnten auf Backpapier aufgefangen werden. Zur Lagerung wurden die Sporen bei 7 °C in Eppendorfcups aufbewahrt.

Uromyces appendiculatus

Bohnenrost wurde auf ca. 14 Tage alten Buschbohnenpflanzen der Sorte Saxa zur Sporengewinnung kultiviert. Zur Inokulation wurden Uredosporen in Wasser mit Zusatz von 0,1 % Tween 20 suspendiert und auf die Pflanzen aufgesprüht. Zur Infektion wurden die Pflanzen für 48 Stunden bei 100 % rel. Luftfeuchtigkeit und 20 °C und anschließend im Gewächshaus gehalten. Nach ca. 10 Tagen konnten reife Uredosporen von den Pflanzen auf Backpapier geschüttelt werden. Zur Lagerung wurden die Sporen bei -18 °C in Glasfläschchen eingefroren.

2.5 Inokulation von Versuchspflanzen

Puccinia triticina

Zur Infektion von Sommerweizenpflanzen der Sorte Munk mit *Puccinia triticina* wurden Uredosporen in Wasser mit 0,1 % Tween 20 mit einer Konzentration von 10^5 Sporen ml^{-1} suspendiert und auf die Pflanzen gesprüht. Diese wurden anschließend für 24 Stunden bei 100 % rel. Luftfeuchtigkeit und 20 °C aufgestellt.

Uromyces appendiculatus

Zur Infektion von Bohnen der Sorte Saxa mit *Uromyces appendiculatus* wurden Uredosporen in Wasser mit 0,1 % Tween 20 suspendiert und auf die Pflanzen gesprüht, ein Drittel der Pflanzen mit 5×10^4 Uredosporen ml^{-1} , ein Drittel mit 10^5 Uredosporen ml^{-1} . Das letzte Drittel, die Kontrolle, wurde nur mit Wasser besprüht und ebenfalls in einer Feuchteammer

aufgestellt. Diese wurden anschließend für 48 Stunden bei 100 % rel. Luftfeuchtigkeit und 20 °C aufgestellt.

2.6 Erfassung der Pathogenentwicklung

2.6.1 Uredosporenkeimung von *Puccinia triticina*

Die Keimrate und die Entwicklung der Keimschlauchlänge von frisch geernteten Uredosporen von *Puccinia triticina* bei verschiedenen Temperaturen wurden untersucht. Die Sporen wurden dazu in Wasser suspendiert und als Sprühnebel in jeweils 25 kleine Petrischalen ($\varnothing = 35$ mm) aufgetragen, bei 6, 16 und 21 °C inkubiert und in Abständen von 10 bis 30 Minuten aus der Inkubation entnommen und bei 60 °C in einem Trockenschrank getrocknet, um weitere Keimung und Sporenwachstum zu unterbinden. Die Temperatur des Wassers entsprach der vorgesehenen Inkubationstemperatur (6, 16, 21 °C). Transparente Kunststoffschalen wurden ca. 1,5 cm hoch mit entsprechend temperiertem Wasser gefüllt. Die Petrischalen wurden in den Schalen auf ein Drahtgitter gestellt; darunter befand sich das Wasserbad. Die Schalen wurden mit einem transparenten Deckel verschlossen und mit Frischhaltefolie abgedichtet. Die Inkubation fand in beleuchteten Klimakammern statt. Zur Auswertung wurden pro Petrischale 200 Sporen als gekeimt (Keimschlauch länger als halber Sporenradius) oder nicht gekeimt bewertet. bzw. in späterem Entwicklungsstadium die Länge von 30 Keimschläuchen ausgemessen.

Die Keimung der Sporen wurde unter einem Lichtmikroskop (Leitz DMRB Fotomikroskop, Leika, Wetzlar) bei 10- bis 40-facher Vergrößerung untersucht. Die Keimschlauchlängen wurden mit der Software Diskus ausgemessen.

2.6.2 Befallsbonitur

An den Standorten Klein Altendorf und Dikopshof wurden Bonituren der Befallsstärke von Blattkrankheiten durch die Pathogene *Blumeria graminis*, *Puccinia triticina* und *Septoria tritici* zeitnah zu den Luftaufnahmetermi- nalen durchgeführt.

Dazu wurde die Befallsstärke (in Prozent befallener Blattfläche) entlang einer 1 Meter langen Bestandsreihe, unterteilt in drei Bestandshöhezonen (unten, Mitte, oben) an vier Stellen um einen zentralen, markierten Bonitурpunkt erfasst. Die Mittelwerte der Befallsstärke repräsentierten somit eine Teilfläche von ca. 4 m².

Am Standort Dikopshof, 2003 wurde die Bonitur an acht Stellen um einen zentralen, markierten Bonitурpunkt durchgeführt. Der Mittelwert repräsentierte somit eine Teilfläche von ca. 16 m².

2.7 Thermografische Messungen

2.7.1 Thermografiesystem

Das digitale Thermografiesystem wurde genutzt, um die Temperaturen von Pflanzen mit hoher räumlicher Auflösung zu messen. Die Pflanzentemperatur wurde als mittlere Oberflächentemperatur aller, im Blickfeld des Objektivs liegenden Pflanzenteile (Blätter und Stängel) bestimmt.

Für thermografische Aufnahmen wurde das digitale Thermografiesystem Varioscan 3021 ST (Jenoptik, Jena) verwendet. Das Gerät erfasst elektromagnetische Strahlung im Wellenlängenbereich von 8 bis 12 μm . Die geometrische Auflösung beträgt 240 x 360 Pixel, die thermische 0,03 K. Der Öffnungswinkel des Objektivs beträgt 20 x 30 °. Das Gerät arbeitet nach dem Scanner-Prinzip und verfügt über einen 6-fachen elektrooptischen Zoom. Die Aufnahme­frequenz liegt dadurch bei ca. 1 Hz. Der Emissionsfaktor wurde auf 1,0 eingestellt.

2.7.2 Kontrolle der Messbedingungen

Zur Kontrolle der Messbedingungen wurden Messungen der Blatttemperatur in einer begehbaren Klimakammer durchgeführt, die von vier Natriumdampflampen (Philips SGR 140) beleuchtet wurde. Die Pflanzen wurden durch einen Schirm aus weißem Papier von der Wärmestrahlung der Klimakammerbeleuchtung abgeschirmt. Die Regulation der Lufttemperatur erfolgte durch ein Luftstrom-Kühlaggregat und die Wärmeabgabe der Klimakammerbeleuchtung. Nach Bedarf wurde zusätzlich ein Warmluftgebläse verwendet. Die Pflanzen wurden mindestens drei Stunden vor der Messung in die Klimakammer gestellt, bzw. blieben bei mehrtägigen Aufnahmeserien in der Kammer. Die rel. Luftfeuchtigkeit wurde nicht kontrolliert und lag in Abhängigkeit von der eingestellten Lufttemperatur zwischen 30 und 80 %, mit einem Schwankungsbereich von $\pm 3\%$ im Bereich von 15 bis 30 °C Lufttemperatur.

Untersuchungen zur Stickstoffversorgung wurden in einer geöffneten Klimakammer mit einem Tag / Nacht-Wechsel von 12 / 12 Stunden mit 25 / 20 °C durchgeführt. In der Tagphase betrug die Lichtintensität 250 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Um im Gewächshaus Freilandbedingungen zu simulieren, wurden die Lüftungs­klappen und die Beschattung geöffnet.

2.7.3 Messaufbau

2.7.3.1 Blatttemperatur

Weizen

Die Messungen der Blatttemperatur von Weizenpflanzen in Töpfen wurde in seitlicher Aufsicht auf die Pflanzen in einem klimatisierten Raum mit und ohne gekühltem Hintergrund durchgeführt. Die Pflanzen wurden in aufrechter Position oder ‚kopfüber‘ mit dem Topf in ein

Stativ eingespannt, so dass die Blätter frei nach unten hingen. Bei Aufnahmeserien über mehrere Tage wurden die Pflanzen immer in der gleichen Ansichtsrichtung aufgenommen.

Zu Vergleichsmessungen von unterschiedlich behandelten Pflanzen wurden zwei Töpfe mit Weizenpflanzen in einem Thermogramm aufgenommen. Die Aufstellung der Töpfe gewährleistete gleiche Umgebungsbedingungen für beide Pflanzengruppen.

Aufnahmen eines Weizenbestandes in einem Pflanzkontainer wurden formatfüllend aus einer Höhe von ca. 2 m bei einem Aufnahmewinkel von ca. 50 ° zur Horizontalen, um 45 ° zur Saatrichtung gedreht, aufgenommen. Das Aufnahmeintervall betrug sechs Minuten.

Bohne

Die Blatttemperatur von Bohnen wurde an der Oberseite der ersten beiden Laubblätter gemessen, sobald diese voll entwickelt waren. Formatfüllende, thermografische Aufnahmen der Bohnenblätter wurden an einem beschatteten Ort durchgeführt, um Erwärmung durch direkte Einstrahlung zu verhindern. Die Luftfeuchtigkeit betrug dabei zwischen 30 und 40 %. Versuchsweise wurden die Pflanzen für die thermografischen Aufnahmen in einen Pappkarton (70 x 50 x 60 cm) gestellt und so vor umgebender Wärmequellen, vor allem aber vor Sonneneinstrahlung abgeschirmt. Da die Pflanzen auf den Mangel an Licht reagierten, wurden die Messungen ab dem zweiten Tag bei Tageslicht und abgeschirmter Sonneneinstrahlung durchgeführt.

Die Blatttemperaturen von Bohnenblättern wurde vor der Inokulation und bis 17 Tage nach der Inokulation mit dem Erreger des Bohnenrosts täglich zwischen 13:00 und 14:00 Uhr thermografisch gemessen.

2.7.3.2 Referenztemperatur

Als Referenztemperatur wurde die Umgebungstemperatur verwendet, die als Oberflächentemperatur eines an einem Stativ frei hängenden, weißen Papierstreifens (ca. 5 x 20 cm) gleichzeitig mit der Blatttemperatur thermografisch gemessen wurde.

Alternativ wurde die Referenztemperatur am Boden eines mit schwarzem Stoff ausgekleideten Kunststoffbechers gemessen.

2.7.3.3 Blattnässe

Weizenblätter wurden in vivo in einen Rahmen waagrecht eingespannt. Wassertropfen mit Volumen zwischen 1 und 15 µl wurden mit einer Pipette appliziert. Das applizierte Wasser hatte eine Temperatur von ca. 20 °C.

Ein Weizenbestand in einem Pflanzkontainer wurde auf der halben Fläche (0,8 x 0,6 m) mit einer Sprühflasche beregnet, bis Tropfen von den Blättern abliefen. Die Temperatur des Wassers betrug 20 °C. Der trockene Weizenbestand in dem Pflanzkontainer wurde über 15 Minuten vor und 120 Minuten nach Wasserapplikation aufgenommen. Das Aufnahmeintervall

betrug 1 Minute und der Blickwinkel 50° zur Horizontalen, bei einem Abstand von ca. 1,8 m zwischen Objektiv und obersten Blättern. Im Aufnahmezeitraum betrug die Lufttemperatur ca. 18°C bei 30 % rel. Luftfeuchtigkeit.

Am Standort Jülich II, 2004 wurde Blattnässe durch Besprühen des Bestandes mit Wasser aus einer Feldspritze appliziert. Die ausgebrachte Wassermenge entsprach ca. 3 mm Niederschlag.

Die Blattnässe in einem Weizenbestand am Standort Klein Altendorf, 2004 zu EC 63 entstand durch ein Regenereignis mit ca. 2 mm Niederschlag.

2.7.3.4 Thermografische Erfassung von Blattnässe

Die benetzten Blätter wurden bei 20°C und 35 % rel. Luftfeuchtigkeit senkrecht von oben in Intervallen von einer Minute bis zur Abtrocknung des letzte Wassertropfens thermografisch aufgenommen.

Der trockene Weizenbestand in dem Pflanzcontainer wurde über 15 Minuten vor und 120 Minuten nach Wasserapplikation aufgenommen. Das Aufnahmeintervall betrug 1 Minute und der Blickwinkel 50° zur Horizontalen, bei einem Abstand von ca. 1,8 m zwischen Objektiv und obersten Blättern. Im Aufnahmezeitraum betrug die Lufttemperatur ca. 18°C bei 30 % rel. Luftfeuchtigkeit.

Der künstlich beregnete Weizenbestand am Standort Jülich II, 2004 wurde unmittelbar nach der Applikation aus ca. 300 m Höhe thermografisch aufgenommen.

Der natürlich beregnete Weizenbestand am Standort Klein Altendorf, 2004 wurde 30 Minuten vor und 20 Minuten nach dem Regenereignis aus ca. 300 m Höhe thermografisch aufgenommen.

2.7.3.5 Differenzierung von Pflanze und Hintergrund

Zur Erhöhung des Temperaturkontrasts zwischen Objekt und Hintergrund wurde ein gekühlter Hintergrund entwickelt. Dieser bestand aus zwei Aluminiumblechen, $1 \times 1 \text{ m}$, die an drei Seiten mit Abstandhaltern (1,5 cm) verklebt und abgedichtet wurden. Zur Stabilisierung wurde mittig auf 50 cm Länge ein weiterer Abstandhalter angebracht. Die Oberfläche der Platten wurde mit einem matt schwarzen Sprühlack beschichtet. Über eine Elektropumpe wurde auf 7°C vorgekühltes Wasser in den Spalt zwischen den Platten gepumpt, welches durch ein Ventil an der Unterkante des Hintergrunds in den Kühlwassertank zurücklief. Eisblöcke im Kühlwassertank sorgten für eine Wassertemperatur von ca. 4°C . Die Weizenpflanzen wurden mit einem Abstand von 30 cm vor dem gekühlten Hintergrund thermografisch aufgenommen (Abb. 1).

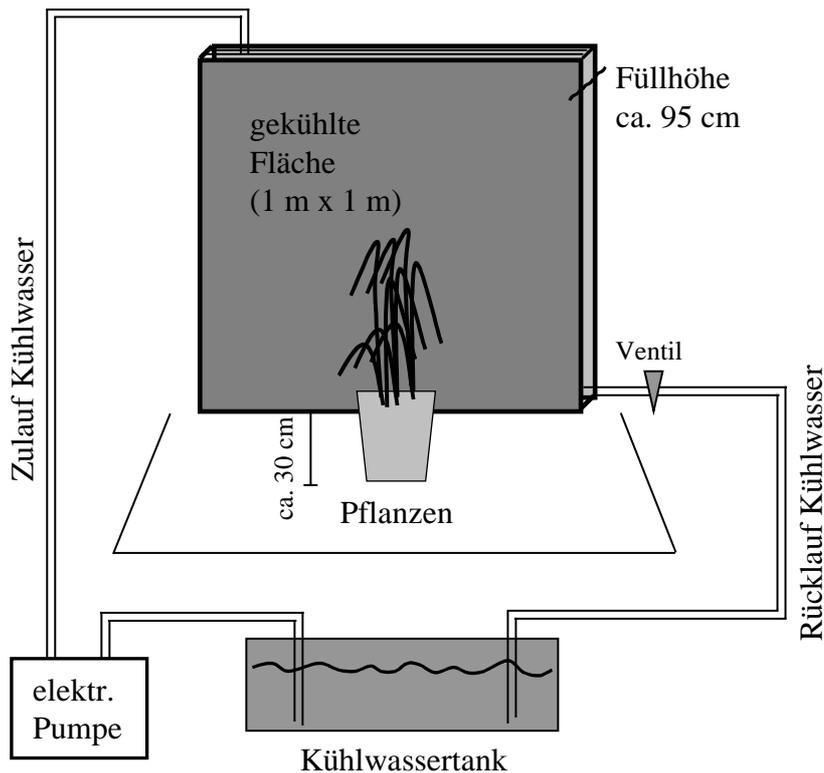


Abb. 1: Aufbauschema gekühlter Hintergrund

2.7.3.6 Untersuchungen zur Blattfragmentierung

Der Einfluss des Fragmentierungsgrades der Blattfläche bei der Bestimmung der Oberflächentemperatur wurde an einer künstlichen Form aus weißem Papier simuliert. Durch die geringe Materialstärke und große Oberfläche war eine schnelle Temperaturanpassung des Papiers an die Lufttemperatur gewährleistet. Die weiße Farbe verhinderte ein Aufheizen der Form durch die Einstrahlung der Kammerbeleuchtung. Papier hat einen Emissionsfaktor nahe 1,0. Das Blatt wurde in vier Felder gleicher Form und Fläche unterteilt. Die Ecken eines jeden Feldes wurden durch Löcher mit 2 mm Durchmesser markiert und 50% der Feldfläche ausgeschnitten. Im ersten Feld wurde diese Fläche in einem Stück entfernt, im zweiten Feld in drei Stücken, im dritten Feld in acht Stücken und im vierten Feld in 60 Stücken (Abb. 2).

Die Papierform wurde an Stativen befestigt und in 30 cm Abstand vor dem gekühlten Hintergrund platziert. Während der Erwärmung des Hintergrunds von 5,3 auf 19,5 °C wurden Thermogramme aufgenommen. Die Temperatur des Papiers betrug dabei 18,3 bis 20,5 °C. Die mittlere Hintergrundtemperatur und Papiertemperatur wurden aus Messpolygonen für jedes Feld bestimmt. Eine Randzone von Hintergrund zu Vordergrund mit der Breite von 10 Pixeln wurde dabei ausgespart.

Um Veränderungen der Umgebungstemperatur bei der Auswertung auszuschließen, wurden die ermittelten Temperaturwerte normiert, indem die gemessene Temperatur gleich 100 gesetzt wurde.

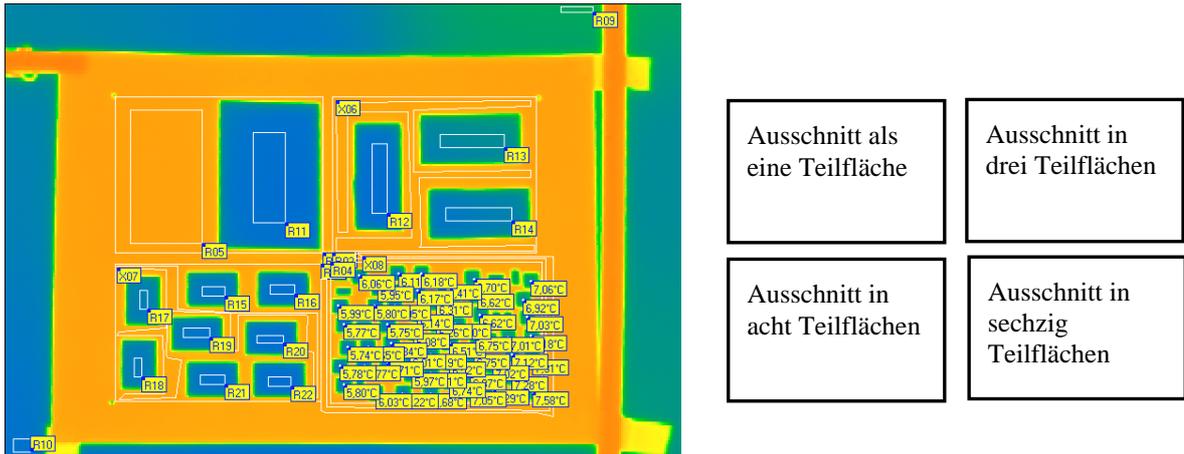


Abb. 2: Links: Thermogramm von unterschiedlich stark fragmentierten Messfeldern (siehe rechts) mit eingezeichneten Messpolygonen.

2.7.4 Messdauer

2.7.4.1 Einzelaufnahmen

Im Labor wurden für jede Einstellung mindestens drei Aufnahmen im Abstand von ca. 15 s gemacht. Dabei wurden die Lufttemperatur, rel. Luftfeuchtigkeit und Beleuchtung gemäß den Versuchsbedingungen konstant gehalten.

2.7.4.2 Aufnahmeserien

Kontinuierliche, thermografische Aufnahmeserien bei konstanten oder variablen Umgebungsbedingungen (Lufttemperatur, thermische Einstrahlung, Licht) wurden mit Zeitintervallen zwischen einer und sechs Minuten über bis zu 36 Stunden aufgenommen.

Bei unterbrochenen Aufnahmeserien über mehrere Tage wurde pro Aufnahmetag wie bei den Momentaufnahmen verfahren. Abhängig von der Fragestellung wurden in 24 bis 48-stündigen Intervallen thermografische Aufnahmen über bis zu 17 Tagen durchgeführt.

2.7.5 Thermografische Messungen im Freiland

Stativaufnahmen

Thermografische Aufnahmen vom Boden aus wurden wöchentlich zwischen 15:00 und 19:00 Uhr aus 2,8 m Höhe mit einem Aufnahmewinkel von 10° zur Bodenoberfläche hangaufwärts in 15 Streifen aufgenommen. Die vordere Bestandsgrenze schloss dabei mit der vorderen Kante des Bildausschnitts ab. Von jeder Fahrspur wurden 4 Thermogramme im Abstand von 15 Sekunden gemacht.

Luftaufnahmen

Thermografische Aufnahmen von Weizenbeständen aus einem Hubschrauber fanden zwischen 11:00 und 12:00 Uhr statt und erlaubten aus Höhen zwischen 300 und 500 m Aufnahmen aus einem Winkel von ca. 50 ° zur Waagerechten. Dieser Winkel ergab sich aus der Position der Kamera, die seitlich aus der geöffneten Tür des Hubschraubers gehalten wurde. Die Flugbahn verlief parallel zu den Feldrändern mit einem seitlichen Versatz, um die Feldfläche formatfüllend aufnehmen zu können. Die Fluggeschwindigkeit wurde so langsam wie möglich gewählt, um ein Verwackeln der Aufnahmen, bedingt durch die Bildscan-Dauer von 1 s, zu vermeiden. Zusätzlich musste auch eine geringe Vorwärtsbewegung durch ein Gegenschwenken der Kamera ausgeglichen werden.

2.7.6 Auswertung von Thermogrammen

2.7.6.1 Pflanzen vor ungekühltem Hintergrund

Als Blatttemperatur wurden die Durchschnittstemperatur der gesamten, im Aufnahmefeld liegenden Blattfläche betrachtet, die bei Aufnahmen mit ungekühltem Hintergrund über Messpunkte oder -polygone ermittelt wurden.

Als Bestandstemperatur wurden die Durchschnittstemperatur der gesamten, im Aufnahmefeld liegenden Bestandsfläche betrachtet, die über Messpolygone ermittelt wurden.

2.7.6.2 Pflanzen vor gekühltem Hintergrund

In IRBIS PLUS wurde die Farbskala des Thermogramms so eingestellt, dass sich ein hoher Kontrast im Farbton ergab. Der Bereich des Thermogramms, in dem sich die Pflanze befand, wurde ausgeschnitten und im Ascii-Format in der Tabellenkalkulationssoftware MICROSOFT EXCEL exportiert. Mit der Software APS ASSESS wurde über den Farbton die zur Pflanze gehörenden Pixel von den Pixeln, die zum Hintergrund gehörten, getrennt. Die Angabe erfolgte als prozentualer Anteil der Pflanze am Gesamtbild. Dieser war dem Anteil der wärmsten Pixel im Bild gleichzusetzen, aus denen die Blatttemperatur gemittelt wurde.

2.8 Gaswechselfmessungen

Die Transpirationsrate der Weizenpflanzen wurde mit einem Porometer (CIRAS-1, PP-Systems, Hitchin, GB) in 10 bis 20 minütigen Intervallen am jüngsten Blatt einer Pflanze im Topf mit einem CO₂-Fluss von 475 ppm und einer Lichtintensität von ca. 120 μmol cm⁻² s⁻¹ gemessen.

2.9 Durchführung der Freilandversuche

2.9.1 Versuchsstandorte

2.9.1.1 Dikopshof

In der Saison 2003 wurde eine Parzelle von von ca. 50 x 58 m Kantenlänge in einem Winterweizenbestand der Sorte Kanzler auf Schlag 8, gesät mit 320 Körnern m^{-2} bei 13 cm Reihenabstand auf 3 m Saatbreite untersucht. Die Parzelle wurde nicht mit Fungiziden behandelt. Die Düngung (70 kg N ha^{-1} zu EC 21, 60 kg N ha^{-1} zu EC 31, 80 kg N ha^{-1} zu EC 49) wurde nach betriebsüblicher Praxis ausgeführt. Die Parzelle lag an einem Hang und war an allen vier Seiten von angrenzendem Bestand umgeben. Sie war in der Mitte, quer zum Hang, durch zwei unterschiedliche Bodenqualitäten geteilt. Hangaufwärts trat sandiger Lehm (sL) auf, während hangabwärts lehmiger Sand (IS) mit hohem Kiesanteil ab 20 cm Tiefe auftrat.

Vor EC 30 wurden vier Wetterstationen im Abstand von 20 m in den Bestand gesetzt. Lokale Klimadaten wurden im Zeitraum vom 29. April bis 27. Juni 2003 erhoben. Fünf Blattnässefühler standen in einer Zone mit hoher Bestandsdichte, vier in einer Zone mit geringer Dichte. Die Niederschlagsdaten stammten von der Wetterstation des Versuchsbetriebs. Der Bestand wurde wöchentlich in zwei Kreisen um die Blattnässefühler und Fühler für rel. Luftfeuchtigkeits / Lufttemperatur-Fühler bonitiert.

In der Saison 2004 wurde Schlag 9 mit eine Diagonalenlänge von ca. 600 x 300 m mit der Sorte Drifter, gesät mit 330 Körnern m^{-2} auf 3 m Saatbreite untersucht, der eine hohe Heterogenität der Bodentypen (IS und sL mit hohem Kiesanteil ab 20 cm Tiefe) aufweist. Pflanzenschutz (2,5 l ha^{-1} Azur zu EC 29, 0,5 l ha^{-1} Cerone + 0,1 l ha^{-1} Moddus + 0,4 l ha^{-1} Juwel (Epoxiconazol + Kresoxim-methyl) + 0,1 l ha^{-1} Fortress (Quinoxifen) zu EC 39, 0,5 Amistar (Azoxystrobin) + 0,5 l ha^{-1} Gladio (Propiconazol + Tebuconazol + Fenpropidin) + 0,5 l ha^{-1} Perfekthion + 0,075 l ha^{-1} Karate zu EC 51) und Düngung (72 kg N ha^{-1} zu EC 21, 40 kg N ha^{-1} zu EC 31, 70 kg N ha^{-1} zu EC 49) erfolgten betriebsüblich.

Auf Schlag 7 waren zwei Parzellen mit Winterweizen, Sorte Kanzler, von je 122 x 49 m Kantenlänge angelegt, gesät mit 330 Körnern m^{-2} bei 3 m Saatbreite. Beide Parzellen wurden betriebsüblich gedüngt (67 kg N ha^{-1} zu EC 13, 40 kg N ha^{-1} zu EC 30, 70 kg N ha^{-1} zu EC 49) und mit Herbiziden und Insektiziden (1,0 l ha^{-1} IPU + 2,5 l ha^{-1} Azur zu EC 29, 0,5 l ha^{-1} Moddus zu EC 30, 0,3 l ha^{-1} Pirimor zur EC 63) behandelt. Eine Parzelle wurde nicht mit Fungiziden behandelt. Auf der zweiten Parzelle wurden Fungizide betriebsüblich appliziert: 0,5 l ha^{-1} Opus Top (Fenpropimorph + Epoxiconazol) + 0,5 l ha^{-1} Juwel Top (Fenpropimorph + Epoxiconazol + Kresoxim-methyl) + 1,0 l ha^{-1} Gladio (Propiconazol + Tebuconazol + Fenpropidin) zu EC 37, 1,5 l ha^{-1} Opus (Epoxiconazol) zu EC 55. Auf Schlag 7 wurden Blattkrankheiten in der unbehandelten und der behandelten Parzelle an je 18 Punkten in einem 9 x 13 m Raster bonitiert.

Beide Schläge wurden thermografisch aufgenommen. Zur Ernte wurde in Schlag 9 an je vier Punkten in beiden Bestandsdichtezonen die Strohmasse von einer Fläche von 0,5 m² bestimmt.

2.9.1.2 Klein Altendorf

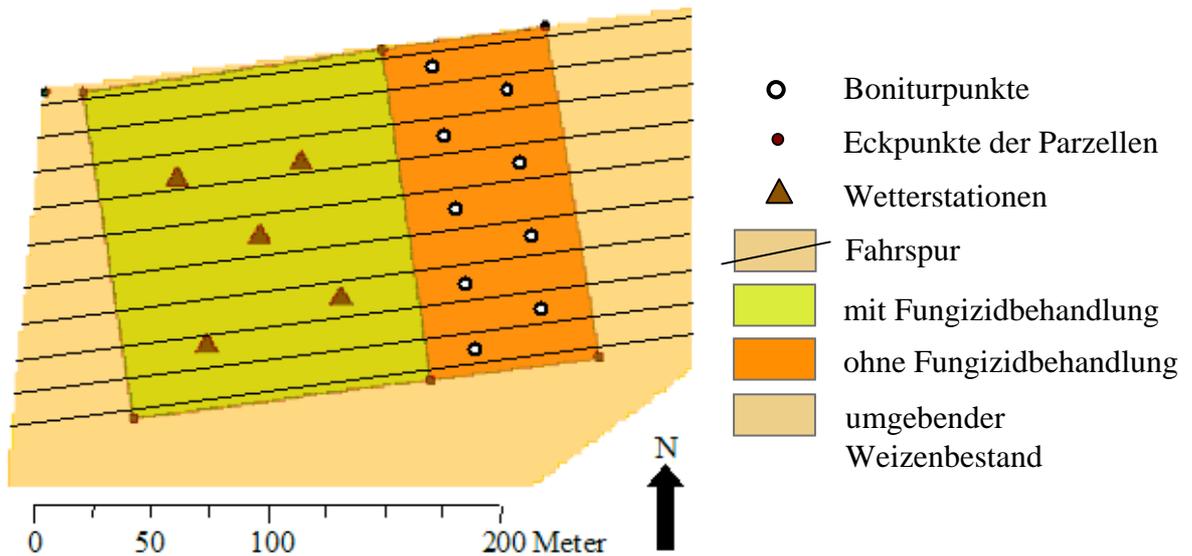
In der Saison 2003 wurde ein Winterweizenbestand der Sorte Novalis mit variierter Gabe von Stickstoff und Fungizideinsatz untersucht. Die Parzellen wurden als Block angelegt, unterteilt in zwölf Parzellen mit 45 x 45 m Kantenlänge, gesät mit 300 Körnern m⁻² auf 3 m Saatbreite. Unkrautkontrolle und Insektenbekämpfung erfolgten betriebsüblich. Die Kontrollparzellen (N+F+) wurden betriebsüblich gedüngt (54 kg N ha⁻¹ zu EC 21, 45 kg N ha⁻¹ zu EC 32, 30 kg N ha⁻¹ zu EC 49) und Fungizid behandelt (Gladio (Fenpropidin + Propiconazol + Tebuconazol) 1,0 l ha⁻¹ zu EC 51). Auf den übrigen Parzellen wurden Stickstoffdüngung und Fungizideinsatz wie folgt variiert: Auf drei Parzellen wurde bei betriebsüblichem Fungizideinsatz die Stickstoffdüngung zu EC 32 weggelassen (N-F+); auf drei Parzellen wurde bei betriebsüblicher Stickstoffdüngung auf Fungizide verzichtet (N+F-) und auf drei Parzellen die Stickstoffgabe wie oben reduziert und auf Fungizide verzichtet (N-F-).

Die Versuchsanlage wurde zu den Entwicklungsstadien EC 57, EC 63, EC 75 und kurz vor der Ernte zu EC 90 thermografisch aufgenommen. Zur Auswertung wurden die mittleren Bestandstemperaturen der Parzellen statistisch verglichen. Die Temperaturwerte von jeweils drei Wiederholungen pro Behandlung wurden gemittelt und normiert (geringstes Temperaturmittel pro Aufnahme =100).

In der Saison 2004 wurde eine Großparzelle von 135 x 150 m Kantenlänge in einem Winterweizenbestand der Sorte Drifter, gesät mit 313 Körnern m⁻² auf 3 m Saatbreite, untersucht (Abb. 3). Die Parzelle wurde von 10 Fahrspuren im Abstand von 15 m durchquert. Drei Seiten der Parzelle grenzten an den umgebenden Weizenbestand, die vierte Seite an eine mit Zuckerrüben bestellte Fläche. Der Standort wies keine Erhebungen oder Senken auf. Es wurden folgende Maßnahmen durchgeführt: Herbizide Hoestar + Azur 165 Tage nach der Saat, Fungizide Matador (Triadimenol + Tebuconazol) 1,0 l ha⁻¹ zu EC 39 und Juwel Top (Fenpropimorph + Epoxiconazol + Kresoxim-methyl) 1,0 l ha⁻¹, Insektizid Karate Zeon zu EC 63, Stickstoffdüngung mit 55, 47 und 27 kg N ha⁻¹ zwischen EC 31 und EC 59. Westlich angrenzend lag eine nicht mit Fungiziden behandelte, sonst gleich bestellte Parzelle von 70 x 150 m. Im Abstand von 20 m zur behandelten Parzelle waren neun Boniturpunkte im Abstand von 36 m zueinander markiert.

Vor EC 30 wurden fünf Wetterstationen im Abstand von 30 bis 50 m in den Bestand gestellt, die vom 5. Mai bis 1. Juli stündlich lokale Klimabedingungen erfassten. Sie waren ausgestattet mit je zwei Fühlern für Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit und einem Fühler für Bodentemperatur und Blattnässe. Zusätzlich wurden an einer Station die Nieder-

schlagsmengen aufgezeichnet. In der unbehandelten Parzelle wurde die Befallsstärke von Blattkrankheiten bonitiert.



2.9.1.3 Meckenheim

In der Saison 2003 wurden drei Winterweizenparzellen mit je 15 x 50 Meter Kantenlänge mit der planophilen Sorte Dream, der erektophilen Sorte Drifter und der breitblättrigen Sorte Cortez, gesät mit 350 Körnern m^{-2} angelegt. Pflanzenschutz und Düngung wurden für alle drei Sorten in gleicher, betriebsüblicher Weise durchgeführt.

In den drei Sorten wurden zu EC 77 Lufttemperatur und -feuchtigkeit in 20, 60 und 100 cm Abstand vom Boden mit einer Wetterstation (DL15, Thies GmbH) gemessen.

2.9.1.4 Jülich

In der Saison 2004 wurden am Standort Jülich I zwei Parzellen mit 50 x 50 m Kantenlänge in einen Winterweizenbestand der Sorte Ritmo, gesät mit 330 Körnern m^{-2} auf 3 m Saatbreite mit drei Fahrgassen im Abstand von 15 m angelegt. Pflanzenschutz und Düngung wurden auf diesen Parzellen betriebsüblich durchgeführt. Angeschlossen an beide Parzellen war je eine Parzelle von 15 x 50 m ohne Fungizidbehandlung. Beide Parzellenblöcke trennte ein betriebsüblich bestellter Bestandsstreifen mit Fungizideinsatz von 30 m.

In den behandelten Parzellen der beiden Blöcke auf Jülich I stand je eine Wetterstation. Beide registrierten die Blattnässe an je fünf Stellen in Abständen von 5 bis 33 m im jeweiligen Bestand. Zu EC 75 wurde einer der beiden Blöcke unmittelbar vor der thermischen Aufnahme mit Wasser aus einer Feldspritze besprüht.

Am Standort Jülich II war ein Parzellenversuch mit den 10 Winterweizensorten, Charger, Tommi, Atoll, Maverick, Terrier, Dekan, Drifter, Biscay, Winnetou und Isengrain auf Parzellen von 6 x 18 m Seitenlänge angelegt. Jede Sorte war auf vier Parzellen angebaut,

wobei eine Parzelle als Kontrolle unbehandelt blieb und auf drei Zellen unterschiedliche Fungizidbehandlungen gegen Blattkrankheiten, wie folgt durchgeführt wurden: PS1 mit 0,5 l ha⁻¹ + 1 l ha⁻¹ Versuchspräparat zu EC 32 und 1,25 l ha⁻¹ Opera Star (Epoconazol + Pyraclostrobin) zu EC 49, PS2 mit 0,7 l ha⁻¹ Jewel Top (Fenpropimorph + Epoconazol + Kresoxim-methyl) + 0,5 l ha⁻¹ Corbel (Fenpropimorph) zu EC 32 und Opera Star mit 1,25 l ha⁻¹ zu EC 49, PS3 mit 1 PPL + 0,35 l ha⁻¹ zu EC 32 und Twist (Trifloxystrobin) mit 1,25 l ha⁻¹ zu EC 49.

2.9.2 Messung des Mikroklimas

Wetterstationen

Zur Aufzeichnung des Mikroklimas wurden Wetterstationen (Thies GmbH, Göttingen) verwendet, bestehend aus einem Datenlogger (nach Weihhofen) mit 2 Fühlern für rel. Luftfeuchtigkeit und Lufttemperatur, 1 bis 5 Blattnässefühlern (Prinzip Septoria-Timer), 2 Fühlern für Bodentemperatur und einem Anschluss für einen Niederschlagsmesser. Die Luftfeuchtigkeitssensoren wurden vor dem Einsatz im Feld auf 100% rLF kalibriert, indem sie luftdicht in eine Plastiktüte mit einem tropfnassen Schwamm eingeschlossen wurden. Die Kalibrierung wurde bei 40% rLF, gemessen mit einem Psychrometer, abgeglichen. Die Lufttemperaturmessungen variierten um $\pm 0,1$ K. Im Feld wurden die Sensoreinheiten für Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit mit Aluminiumfolie gegen Aufheizung durch Sonneneinstrahlung abgedeckt.

Eine Wetterstation (DL15, Thies, GmbH, Göttingen) war mit 3 kombinierten Luftfeuchtigkeits- und Lufttemperaturfühlern, angebracht in 20, 60 und 100 cm Höhe ausgestattet. Die Klimaparameter wurden mit 10-minütigem Takt aufgezeichnet.

Blattnässe

Die Blattnässesensoren wurden in der Höhe an den Aufwuchs des Bestandes an die F-1 Blattetage angepasst. Die Blattnässedaten aus den Sensoren (nach Weihhofen) im Freiland wurden auf einer einheitslosen Skala zwischen 0 und 100 gemäß der Angabe des Herstellers (<20 = trocken; >80 = nass) interpretiert. Blattnässephasen begannen, sobald der Sensorwert 80 überstieg. In den folgenden Abtrocknungsphasen wurden Werte > 20 als nass gewertet. Ereignisse von Folgeniederschlägen in einen bereits nassen Bestand wurden von der Auswertung ausgeschlossen. Niederschläge innerhalb von 2 Stunden wurden zu einem Niederschlagsereignis summiert.

2.9.3 Parzellenmarkierung

Auf Grund von Schwierigkeiten bei der Erkennung von Parzellengrenzen in der Saison 2003 wurde um die Parzellen der Saison 2004, abhängig von der Parzellengröße und der daraus

resultierenden Flughöhe, 0,5 bis 1,5 m breite, abgemähte oder mit Totalherbizidbehandlungen bewuchsfrei gehaltene Randstreifen angelegt.

2.9.4 Ertragsmessung

Die Ertragsdaten 2003 wurden mit einem Ertragsmesssystem von RDSPF (RDS Technology Ltd., Minchinhampton, UK) erfasst und mit der Software RDSPF in einer Ertragskarte dargestellt.

In der Saison 2004 wurde der Kornertrag mit dem System ACT II-60 (Agrocom, Bielefeld) erfasst, das den Ertragsdaten GPS-Koordinaten unter Berücksichtigung von 15 Sekunden Laufzeit zuweist.

2.10 Verarbeitung von Daten aus Freilandmessungen

2.10.1 Befallsdaten

Die Interpolation der Boniturwerte für den Standort Dikopshof, 2003 erfolgte mit dem Inverse-Distance-Weighting (IDW)-Verfahren mit den Faktoren Potenz 2, fester Suchradius, Anzahl der Punkte 2, maximale Entfernung 5. Die Grenze zwischen den zwei Bestandsdichten wurde als Interpolationsbarriere berücksichtigt.

Boniturdaten und Bestandstemperaturdaten vom Standort Dikopshof, 2004 wurden zonal einander gegenübergestellt. Betrachtet wurden zwei Zonen pro Parzelle, eine am oberen Parzellenrand (A) und eine am unteren (B), so dass der Bereich des Schattens eines Stromleitungsmasts ausgeschlossen wurde. Die Bestandstemperatur der Zonen wurde mit IRBIS PLUS über Messfelder ermittelt. Die Befallsstärke in den Zonen wurde aus je sechs Boniturstärken gemittelt. Dabei wurden die Werte für die oberen und mittleren Blatttagen verwendet.

Boniturdaten und Bestandstemperaturen vom Standort Klein Altendorf, 2004 wurden ebenfalls in zwei Zonen A und B verglichen. Die Befallsstärke in den Zonen wurde an je drei Boniturstärken ermittelt.

2.10.2 Ertragsdaten

Die Ertragsdaten 2004 wurden als Textdatei in die GIS-Software ARCMAP übertragen. Sie lagen zunächst als Punktdaten vor und wurden mit IDW mit Power 1 und einem Umfeld von 15 Punkten zu einer Ertragskarte interpoliert.

Zur Berechnung von Korrelationen von Bestandstemperaturen und Ertrag wurden die Karten in ERDAS IMAGINE importiert und dort der Ausschnitt des Korrelationsbereichs definiert. Das Ergebnis, bestehend aus X-,Y- und Z-Koordinaten wurde im Ascii-Format in eine Datenbank übertragen. Über eine Abfrage wurden damit die Ertragsdaten und Temperatur-

daten mit den gleichen X,Y-Koordinaten gegebenübergestellt und in einer Tabellenkalkulation der Korrelationskoeffizient berechnet.

2.10.3 Stabilität von Bestandstemperaturzonen

Die Stabilität von Temperaturzonen wurde durch eine Maßzahl (MRD = Mittlere Rangdifferenz) beschrieben, die auf dem relativen Rang einer Temperaturzone über mehrere Termine basierte. Es wurde die Differenz von aufeinanderfolgenden Rängen aufsummiert und durch die Anzahl der Ränge geteilt. Das Ergebnis wurde als Prozentsatz der höchst möglichen MRD angegeben (%MRD). Im Vergleich zur Standardabweichung berücksichtigt dieser Wert nicht nur die Streuung, sondern auch die Abstände zwischen aufeinander folgenden Werten.

2.10.4 Auswertung thermografischer Daten mit einem Geoinformationssystem

Aus den thermografisch gemessenen Bestandstemperaturen am Standort Klein Altendorf, 2004 wurden mit der Software ARCMAP Temperaturkarten erstellt. Dem lagen fünf Thermogramme zugrunde, die aus der gleichen Richtung, rechtwinkelig zu den Fahrspuren von Süd nach Nord blickend, aus ca. 350 m Höhe aufgenommen wurden. Die Übertragung der Temperaturwerte in die Karte erfolgte mit drei verschiedenen Methoden. Die Zuordnung der Temperaturwerte zu X-Koordinaten erfolgte bei diesen beiden Methoden unter Berücksichtigung der perspektivischen Verzerrung des Thermogramms entlang der Y-Achse gemäß des Verhältnisses von realer Feldbreite zur dargestellten Feldbreite in Pixel. Die Y-Koordinate orientierte sich an den bekannten, realen Fahrspurabständen.

2.10.4.1 Berücksichtigung von Messflächen

Die erste Methode beruhte auf einer indirekten, informationsreduzierenden Übertragung von Temperaturdaten aus dem Thermogramm in die GIS-Software. Mit Hilfe von Funktionen der Thermografiesoftware IRBIS PLUS wurden Messfelder in das Thermogramm gelegt. Vierzig rechteckige Messfelder, acht pro Reihe, parallel zur X-Achse, lieferten den thermischen Mittelwert der markierten Messfläche (Abb. 4 links). Die Messflächen wurden jeweils von einer Fahrspur durchquert.

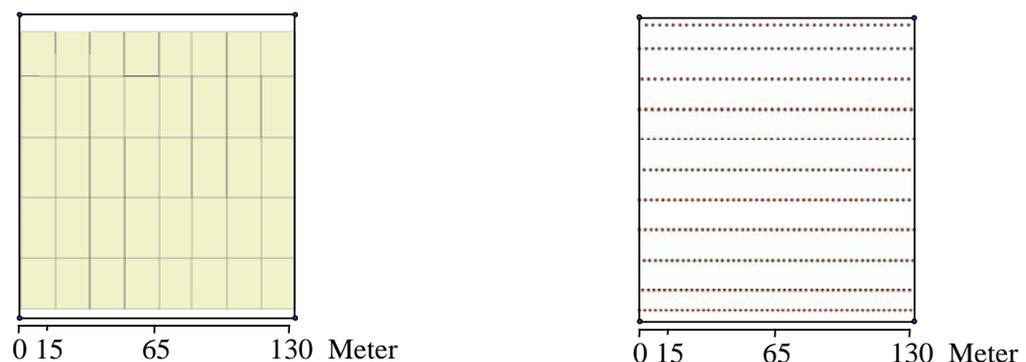


Abb. 4: Links: 40 Messfelder, jeweils 16 x 30 m. Rechts: Messpunkteraster 3 x 15 m.

2.10.4.2 Berücksichtigung von Punktrasterdaten

In der zweiten Methode wurden elf Messlinien in das Thermogramm gelegt, die pixelweise Temperaturinformationen enthielten (Abb. 4 rechts). Die Vielzahl der Messpunkte, zwischen 170 und 280 pro Messlinie wurde um den Faktor 5 reduziert, so dass die Punkte die Bestandstemperatur in Zonen von 0,45 x 0,45 m im vorderen Bildbereich und bis zu 0,6 x 0,6 m im hinteren Bildbereich beschreiben, mit jeweils 3 m Abstand in der Reihe und 15 m Abstand zwischen den Reihen.

Die Interpolation des 3 x 15 m Rasters erfolgte mit IDW mit festem Suchradius von 4 Punkten und einer Gewichtung der Nachbarpunkte mit fünfter Potenz.

2.10.4.3 Berücksichtigung aller Pixelinformationen

Die dritte Methode beruhte auf der direkten, pixelweisen Übertragung der Temperaturdaten aus dem Thermogramm in die GIS-Software. Die interessierenden Bereiche des Thermogramms wurde in IRBIS PLUS markiert und im Ascii-Format in die GIS-Software ARCMAP übertragen, um dort als Rasterdatei dargestellt zu werden. Mit Hilfe eines Passpunktegitters, das sich an den Eckpunkten der Parzelle und den Fahrspurabständen orientierte, wurden die Punktdaten an GPS-ausgemessenen Parzellenumrissen georeferenziert. Die entstandenen Karten hatten eine Auflösung von 0,7 x 0,7 m pro Pixel. Eine Glättung der Daten wurde mit der Methode des „gleitenden Fensters“ mit den Parametern von 7 x 7 Zellen Fenstergröße und einer Ausgabezellengröße von 2 x 2 m durchgeführt. Um, durch die Glättung verursacht, Temperaturwerte von Pixeln außerhalb der Parzelle nicht in die äußeren Bereiche der geglätteten Karte einzurechnen, musste entlang des Parzellenrandes nach innen eine Pufferzone von acht Metern Breite um die Parzelle gezogen werden. Eine weitere Vereinfachung der Temperaturkarte erfolgte durch eine Klassifizierung der Bestandstemperaturen in acht Klassen. Diese Klassengrenzen wurden so gesetzt, dass die einzelnen Klassen gleich viele Pixel enthielten. So war gewährleistet, dass die Temperaturzonen, unabhängig vom Temperaturniveau am Aufnahmeterrain, gleich stark besetzt und ihre räumliche Ausdehnung somit vergleichbar war.

Zur Berechnung von Korrelationen wurden die Temperaturkarten in die Software ERDAS IMAGINE exportiert.

2.10.5 Statistische Auswertung

Statistische Berechnungen, Tukey-Test und Spearman-Rangkorrelationstest wurden mit der Software SPSS 11.0 durchgeführt.

3 ERGEBNISSE

3.1 Einfluss der Umgebungstemperatur auf die Keimung und das Keimschlauchwachstum von *P. triticina*

Für die Infektion von Weizenblättern sind Uredosporen von *P. triticina* auf Blattnäse angewiesen. Während der Blattnässedauer muss die Spore keimen und der Keimschlauch die Distanz zwischen der Spore und dem Penetrationsort, einer Stomataöffnung, überbrücken. Die Geschwindigkeit von Keimung und Keimschlauchlängenwachstum wird wesentlich durch die Temperatur bestimmt, so dass sich aus der Temperatur die erforderliche Blattnässedauer ergibt.

Keimrate

Die Keimung von Uredosporen von *Puccinia triticina* setzte innerhalb von 30 bis 120 min ein, gestaffelt nach der Umgebungstemperatur (Abb. 5). Auch der zeitliche Verlauf der Keimrate war abhängig von der Temperatur.

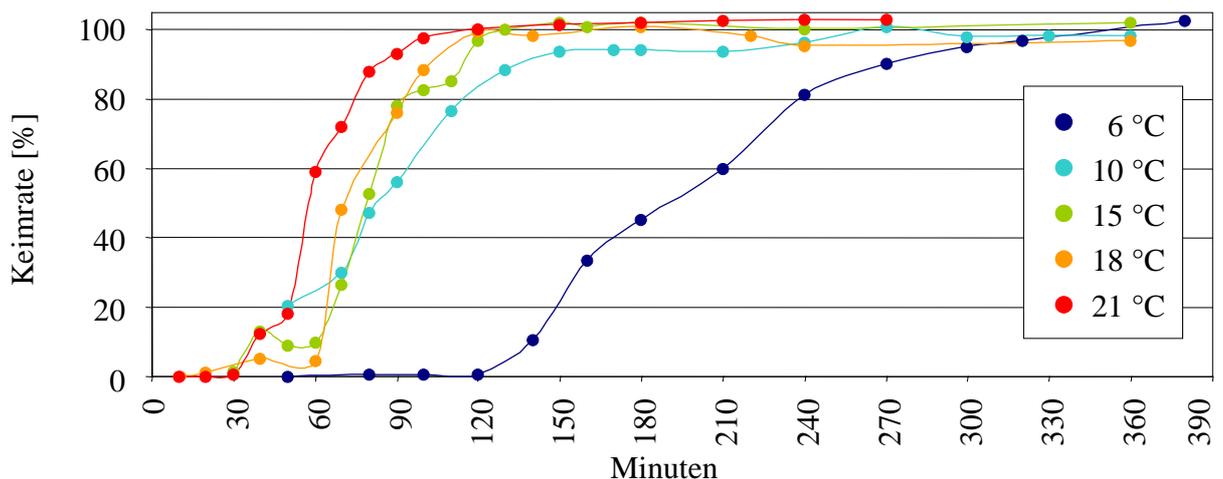


Abb. 5: Einfluss der Umgebungstemperatur auf die Keimrate von Uredosporen von *Puccinia triticina*.

Rund 50 % der Sporen waren bei 21 °C nach ca. 55 Minuten gekeimt, nach ca. 70 Minuten bei 18 °C, nach ca. 80 Minuten bei 15 °C, nach 85 Minuten bei 10 °C und nach 190 Minuten bei 6 °C.

Keimschlauchlänge

Wie die Keimrate wies auch das Wachstum der Keimschläuche in einem Wassertropfen in einer Petrischale eine hohe Temperaturabhängigkeit auf (Abb. 6). 65 % der Sporen überbrückten eine Entfernung von 100 µm bei 21 °C nach 120 und bei 15 °C nach 150 Minuten. Bei 6 °C vergingen 320 min bis 5% der Keimschläuche die kritischen Länge erreicht hatten.

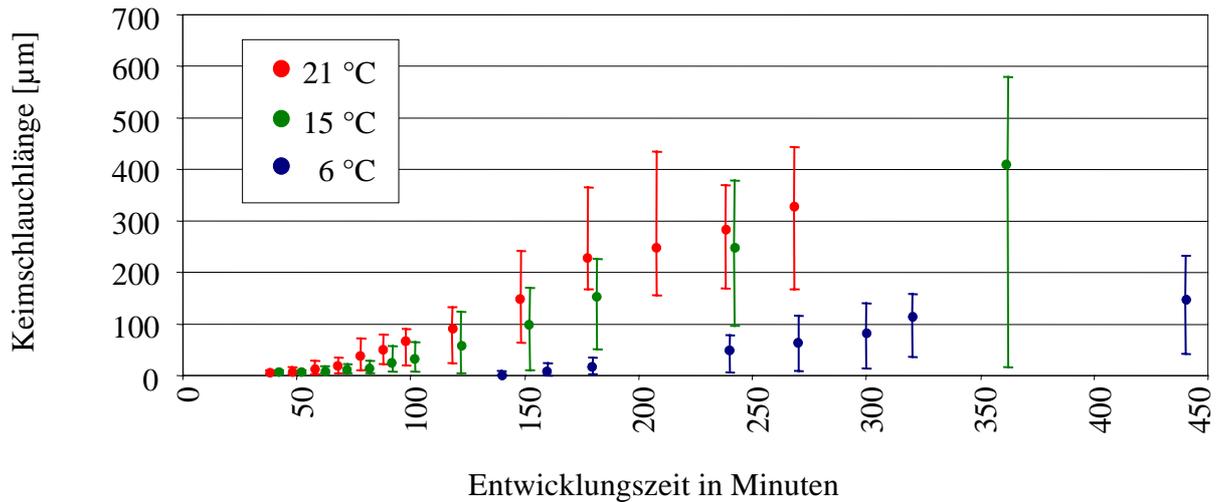


Abb. 6: Einfluss der Umgebungstemperatur auf das Wachstum der Keimschläuche von *Puccinia triticina* (Balken stellen die Variationsbreite dar).

3.2 Heterogenität des Mikroklimas in Weizenbeständen

In der Präinfektionsphase sind die Blattkrankheiten Braunrost und Blattseptoria auf 100 % rel. Luftfeuchtigkeit, d.h. tropfbares Wasser angewiesen. Die Dauer solcher Blattnässeperioden ist an die Lufttemperatur, die daraus resultierende rel. Luftfeuchtigkeit und die Abtrocknungsdauer von Niederschlägen gekoppelt, so dass ein heterogenes Bestandsklima ein zonal unterschiedliches Infektionsrisiko bedingt. Das Auftreten von Zonen mit unterschiedlich starkem Befallsdruck sind Voraussetzung für einen teilschlagspezifischen Fungizideinsatz.

Das Mikroklima wurde in einem homogenen und einem heterogenen Weizenbestand untersucht. Die Bestandsheterogenität war auf unterschiedliche Bodentypen zurückzuführen, die sich auf die Bestandsdichte und -höhe auswirkten.

3.2.1 Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit

Homogener Bestand

Zur Charakterisierung des Mikroklimas im Winterweizenbestand Klein Altendorf in der Vegetationsperiode 2004 vom 5. Mai bis 1. Juli wurden die Lufttemperatur und die relative Luftfeuchtigkeit an fünf Messpunkten im Bestand verglichen (Abb. 7, Abb. 8). Die Heterogenität des jeweiligen Parameters wurde durch die Summen der positiven Abweichungen und die Summe der negativen Abweichungen vom Mittelwert aller Messpunkte beschrieben.

Die mittlere Lufttemperatur unterschied sich an den Positionen HR (-25), HL (-49) und VL (-13) kaum. Deutliche Unterschiede traten aber in der Variationsbreite an diesen Punkten auf. Die geringste Variationsbreite hatte Position HR. HL und VL sind Beispiele für eine

wesentlich höhere Amplitude der Lufttemperatur bei fast gleichem Mittelwert. Die Punkte VR und M fielen dagegen durch ihre Abweichung von der jeweils aktuellen Mitteltemperatur auf. Die größten Abweichungen der stündlichen Messwerte von der Mitteltemperatur betragen +1,8 und -1,6 K. An VR (-296) war die Lufttemperatur im Bestand häufig geringer, an M (+288) höher als der Mittelwert (Abb. 7).

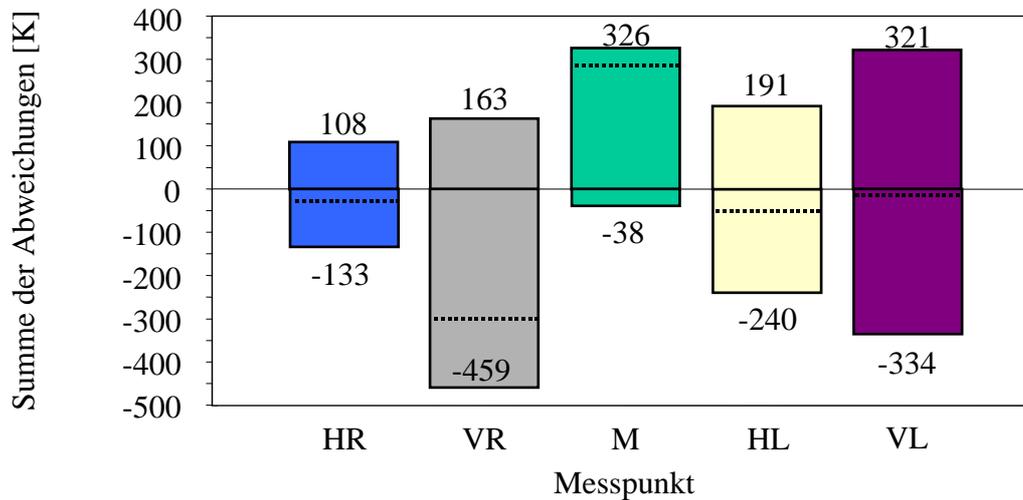


Abb. 7: Heterogenität der Lufttemperatur an fünf Messpunkten (HR, VR, M, HL, VL) in einem Weizenbestand, als Summe der positiven, bzw. negativen Abweichungen vom stündlichen Mittelwert (Sorte Drifter, Klein Altendorf, 2004; gestrichelte Linien zeigen das Mittel der Abweichungen).

Lokale Unterschiede traten auch in der relativen Luftfeuchtigkeit auf, die nur teilweise durch die entsprechende Lufttemperatur zu erklären waren. Das geringere Temperaturniveau an VR prägte sich in überdurchschnittlich hoher rel. Luftfeuchtigkeit aus (Abb. 8).

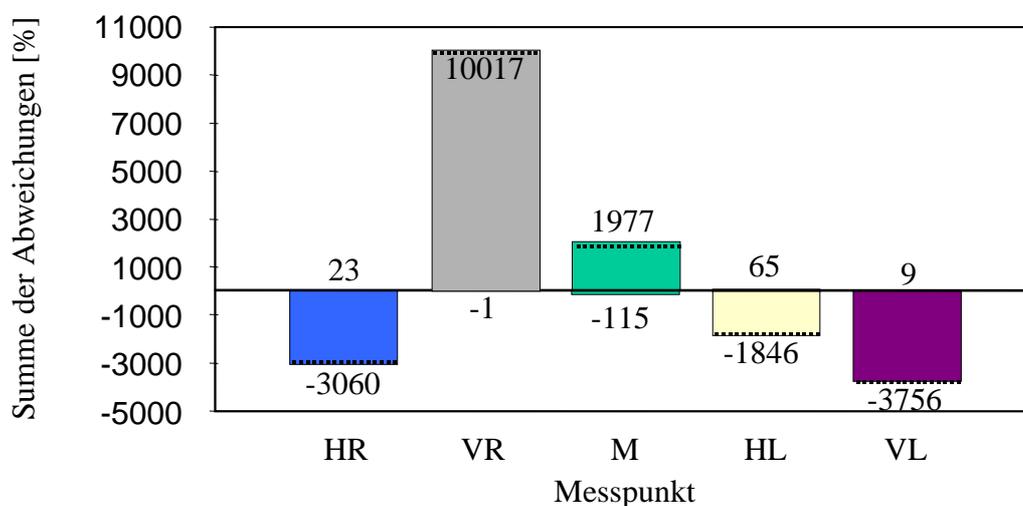


Abb. 8: Heterogenität der Luftfeuchtigkeit an fünf Messpunkten (HR, VR, M, HL, VL) in einem Weizenbestand als Summe der positiven, bzw. negativen Abweichungen vom stündlichen Mittelwert (Sorte Drifter, Klein Altendorf, 2004; gestrichelte Linien zeigen das Mittel der Abweichungen).

Hingegen kamen bei Messpunkt M trotz höchster Lufttemperaturen vereinzelt überdurchschnittliche Luftfeuchtigkeit vor. Die größten Abweichungen von dem mittleren Wert betragen +15 und -11 %. Trotz der großen Unterschiede in der Temperaturamplitude an den HR (241) und VL (655) traten ähnliche Feuchtigkeitswerte an HR (-3048) und VL (-3745) auf.

Heterogener Bestand

Am Standort Dikopshof, 2003 wurde die rel. Luftfeuchtigkeit im Bestand in zwei Zonen unterschiedlicher Bestandsdichten gemessen (Abb. 9).

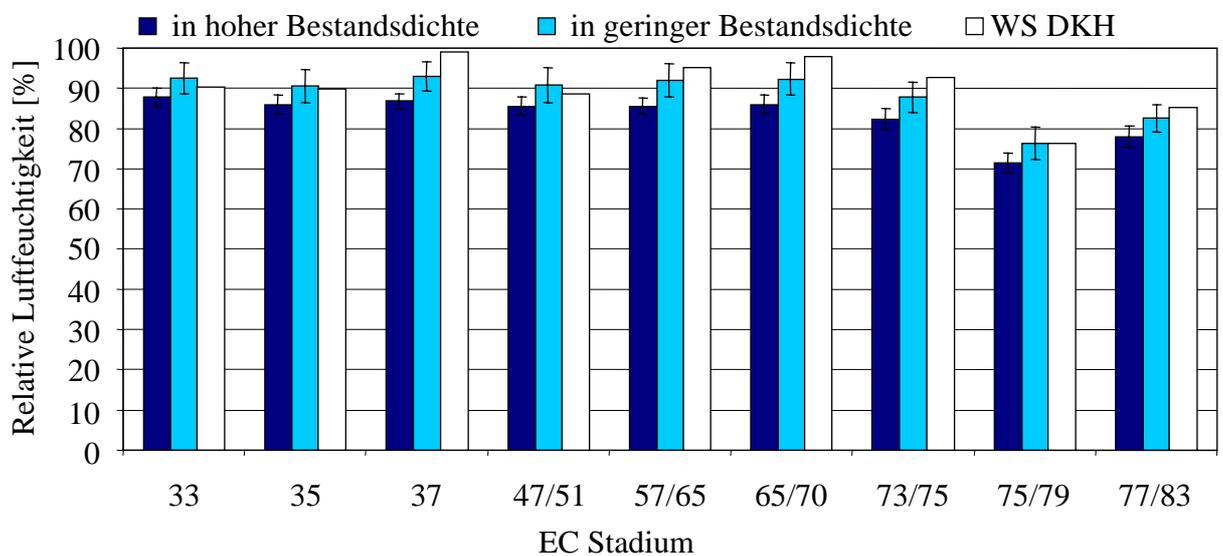


Abb. 9: Mittlere rel. Luftfeuchtigkeit, nachts zwischen 0:40 und 5:40 Uhr, in Zonen hoher und geringer Bestandsdichte und in 500 m Entfernung zum Bestand (Sorte Kanzler, Dikopshof, 2003; Balken zeigen den Standardfehler).

In der Zone mit hoher Bestandsdichte betrug die Anzahl ährentragender Halme 400 m^{-1} und die Halmlänge durchschnittlich 98,9 cm zu EC 90, resultierend in einer Biomasse von 169 g m^{-2} . In der Zone mit geringerer Bestandsdichte standen 320 Halme m^{-1} mit 77,9 cm Länge und 95 g m^{-2} . In beiden Zonen lag die relative Luftfeuchtigkeit nachts (0:40 bis 5:40 Uhr) häufig über 80 %. Bei höherer Bestandsdichte wurde nachts eine geringere Luftfeuchtigkeit gemessen als bei geringerer Bestandsdichte. Die Unterschiede betragen aber weniger als 6 % bei überlappendem Standardfehler. Die Werte der Klimaaufzeichnung ausserhalb des Bestandes lagen weitgehend über den lokalen Werten. Tagsüber (12:40 bis 17:40 Uhr) traten grössere Feuchtigkeitsunterschiede von bis zu 18 % auf (Abb. 10). Dabei lag das Feuchtigkeitsniveau mit Werten zwischen 15 und 60 % aber deutlich niedriger als nachts. Die bestandsexternen Messwerte zeigten keinen konstanten Unterschied zu den Messwerten aus dem Weizenbestand; die Differenzen betragen ca. $\pm 15 \%$.

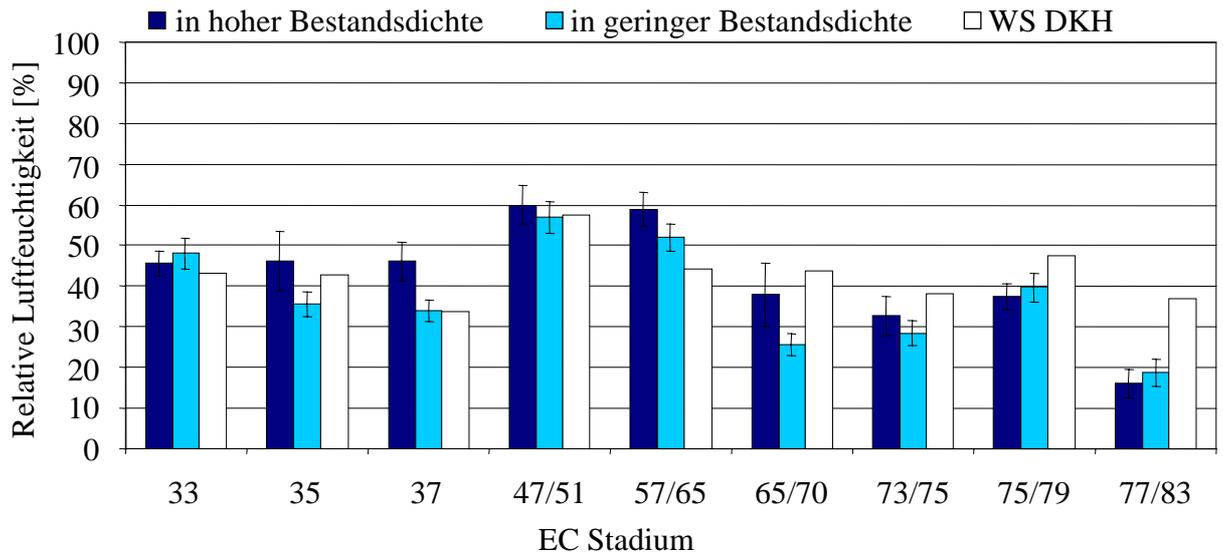


Abb. 10: Mittlere rel. Luftfeuchtigkeit, tags zwischen 12:40 und 17:40 Uhr, in Zonen hoher und geringer Bestandsdichte und in 500 m Entfernung zum Bestand (Sorte Kanzler, Dikopshof, 2003; Balken zeigen den Standardfehler).

Die parallel gemessenen Lufttemperaturen waren nachts in beiden Bestandsdichten nahezu gleich (Abb. 11). Am Tag traten im Bestand mit geringer Pflanzendichte dagegen durchgehend höhere Lufttemperaturen von bis zu 3,3 K auf (Abb. 12).

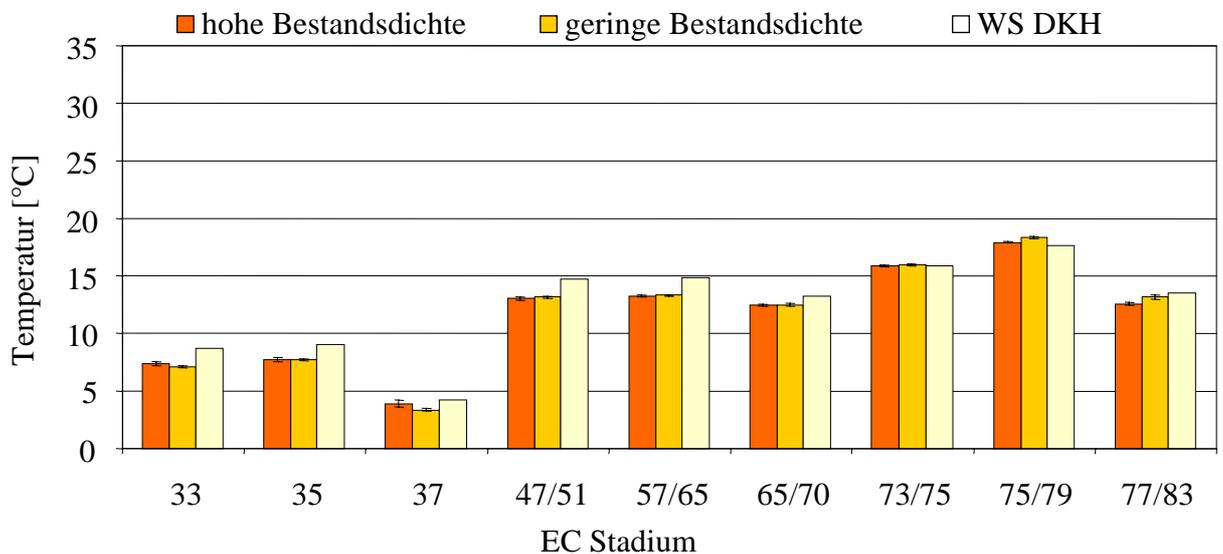


Abb. 11: Mittlere Lufttemperatur, nachts zwischen 0:40 und 5:40 Uhr, in Zonen hoher und geringer Bestandsdichte und in 500 m Entfernung zum Bestand (Sorte Kanzler, Dikopshof, 2003; Balken zeigen den Standardfehler).

Die außerhalb des Bestands in ca. 500 m Entfernung gemessene Temperatur, bewegte sich zwischen 17,1 und 27,7 °C und lag damit meistens unter den lokal im Bestand gemessenen Werten. Die größten Differenzen zwischen den Bestandsdichten traten bei hohem Temperaturniveau auf. Ein Zusammenhang zwischen absolutem Temperaturniveau und der Temperaturdifferenz zwischen den Bestandsdichten ließ sich aber nicht erkennen.

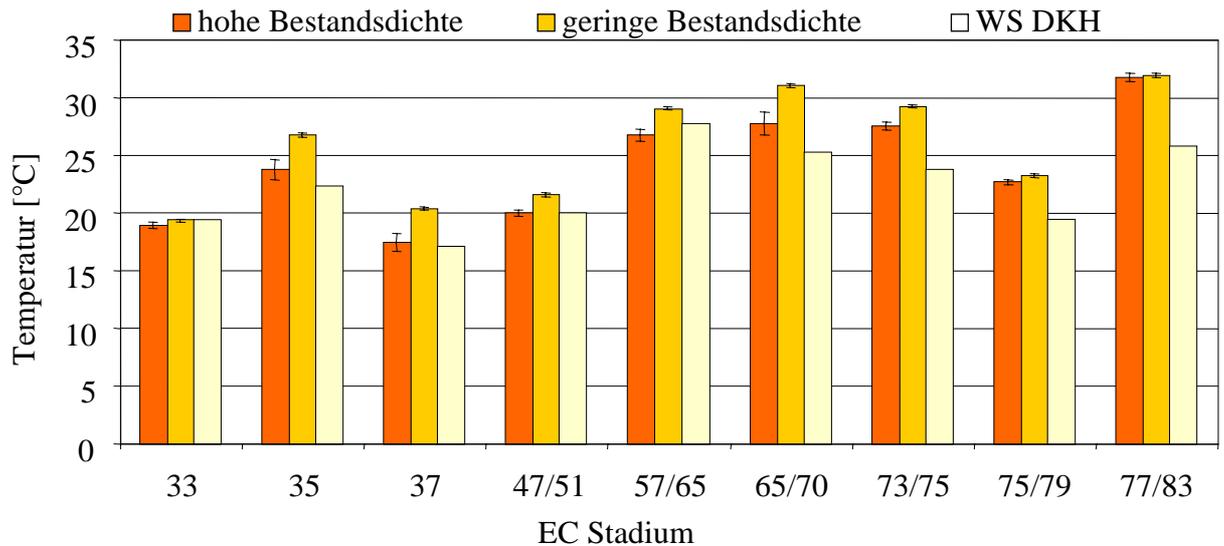


Abb. 12: Mittlere Lufttemperatur, tags zwischen 12:40 bis 17:40 Uhr, in Zonen hoher und geringer Bestandsdichte und in 500 m Entfernung zum Bestand (Sorte Kanzler, Dikopshof, 2003; Balken zeigen den Standardfehler).

3.2.2 Blattnässedauer

Heterogener Bestand

Die Verteilung von Blattnässe in einem heterogenen Bestand wurde in der Zeit vom 29.4. bis 27.6.2003 am Standort Dikopshof, 2003 aufgezeichnet. In hoher Bestandsdichte trat Blattnässe dabei zu 22 % der Messdauer auf, in geringer Bestandsdichte zu 16 %; das entsprach 85 Stunden mehr Blattnässe. Zusätzlich traten zu 6,8, bzw. 6,2 % der Messdauer, Blattnässe während eines Regenereignisses auf (Abb. 13).

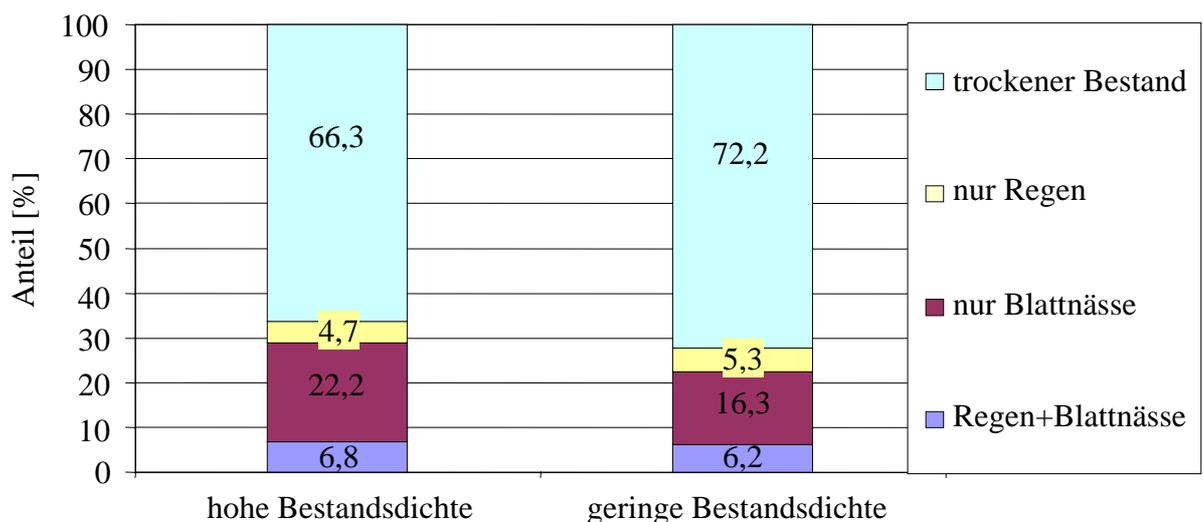


Abb. 13: Anteil von Trocken- und Nässeperioden in einem Weizenbestand über eine Messdauer von 59 Tage, EC 30 bis EC 80 (Sorte Kanzler, Dikopshof, 2003).

Nur in der Hälfte der Fälle ließ sich die Dauer von Blattnässeperioden, also die Abtrocknungsdauer, einem einzelnen, vorangegangenen Niederschlagsereignis zuordnen. So

wurden nur Ereignisse gewertet, zu denen Niederschlag auf einen trockenen Bestand fiel und die folgende Abtrocknung in eine Trockenperiode überging. Bei den übrigen Blattnässeperioden fiel Niederschlag in einen bereits nassen Bestand, oder die Abtrocknung wurde durch einen folgenden Niederschlag vorzeitig beendet.

Homogener Bestand

Die klimatischen Unterschiede im homogenen Bestand Klein Altendorf, 2004 spiegelten sich in der heterogenen Verteilung des Auftretens von Blattnässe wieder (Abb. 14).

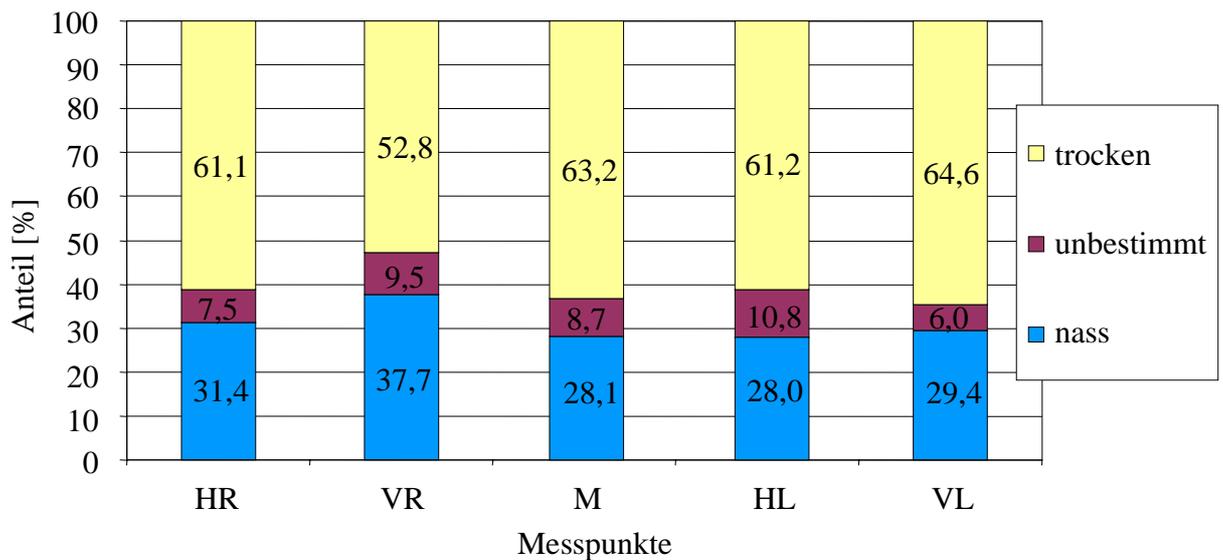


Abb. 14: Räumlich heterogenes Auftreten von Nass- / Trockenperioden in einem Weizenbestand, aufgezeichnet über ca. 57 Tage (Sorte Drifter, Klein Altendorf, 2004).

Am Messpunkt VR, der die höchste Luftfeuchtigkeit aufwies, wurde auch am häufigsten Blattnässe, nämlich an 520 von 1379 Stunden, 37,7 % der Messdauer entsprechend, aufgezeichnet. An allen anderen Messpunkten trat Blattnässe zu weniger als 31,4 % der Messdauer auf, bis zu 28,0 % an Position HL. Das bedeutete einen Unterschied von bis zu 133 Stunden Nässe. Die beiden trockensten Punkte HL und M wiesen relativ geringe Abweichungen in der Luftfeuchtigkeit auf, die allerdings gegensätzlich ausgeprägt waren (Abb. 14).

Am Standort Klein Altendorf, 2004 wurden zwischen dem 5.5. und 1.7.2004 128 Blattnässeperioden, verteilt auf 5 Messpunkte im Bestand, von 1 bis 59 Stunden aufgezeichnet. 90 % der Blattnässeperioden waren kürzer als 23 Stunden, 65 % kürzer als 13 Stunden. Zu 23 % war die Blattnässeperiode kürzer als die zur Infektion von *Puccinia recondita* benötigte Zeit von ca. 4 Stunden. Blattnässedauern von über 48 Stunden, wie von *Septoria tritici* zur Infektion benötigt, traten nur einmal auf. Die Verteilung der Blattnässedauer an den fünf Messpunkten war übereinstimmend mit den Nass/Trocken-Anteilen (Abb. 14) aus Abb. 15.

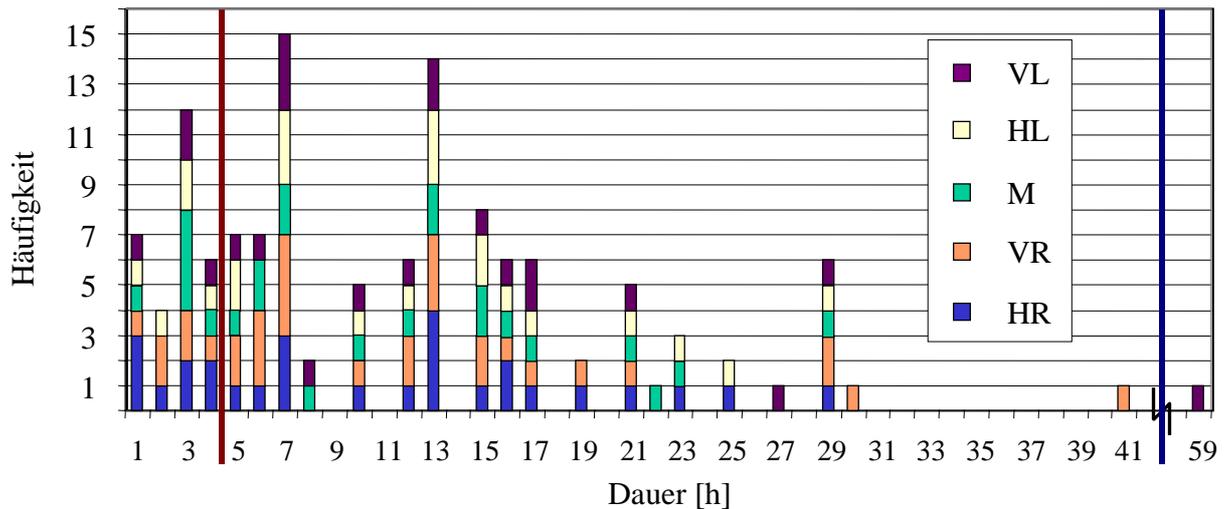


Abb. 15: Häufigkeit von Blattnässeperioden sortiert nach der Blattnässedauer, gemessen an fünf Messpunkten in einem Weizenbestand (Sorte Drifter, Klein Altendorf, 2004; senkrechte Balken markieren die, für eine Infektion benötigte Blattnässedauer von *Puccinia triticina* (rot) und *Septoria tritici* (blau)).

Die räumliche Verteilung von Blattnässedauern in einem homogenen Weizenbestand wurde am Standort Jülich I, 2004 zwischen dem 3.5. und 2.7.2004 untersucht. Dazu wurde die Blattnässedauer an jedem von acht Messpunkten aufsummiert. Zwischen den Messpunkten ergaben sich dabei zeitliche Blattnässeanteile von 36 bis 53 %, was einen Unterschied zwischen den Messpunkten von 2 und 256 Stunden bedeutete. Die Unterschiede wurden mit Bezug zum Abstand zwischen den Messpunkten, der zwischen 8 und 137 Meter betrug, verglichen, um den räumlichen Zusammenhang der Blattnässedauer in einem Weizenbestand zu beschreiben. Eine Korrelation vom Abstand der Messpunkte und dem Unterschied der Blattnässedauer konnte dabei nicht festgestellt werden. Im Bereich zwischen 8 und 36 m trat eine vergleichbare Variationsbreite der Nässedauer auf, wie im Bereich von 84 bis 137 m (ohne Abb.).

3.2.3 Abtrocknungsdauer von Niederschlägen

Die Dauer der Abtrocknung des Weizenbestands nach Niederschlägen zwischen 0,3 und 22,5 mm in Zonen unterschiedlicher Bestandsdichte eines Weizenbestands im Freiland wurde durch Blattnässesensoren (nach Weihhofen) erfasst (Abb. 16). Die Bestandsdichte beeinflusste die Dauer der Abtrocknung des Weizenbestands. 22,5 mm Niederschlag trocknete bei geringer Bestandsdichte in 20,5 Stunden ab, bei hoher Bestandsdichte erst nach 38,2 Stunden. Mit zunehmender Niederschlagsmenge stieg die Abtrocknungsdauer in beiden Bestandsdichten an. Bei Niederschlägen über 2 mm führte die höhere Bestandsdichte zu einer ca. doppelten Abtrocknungsdauer.

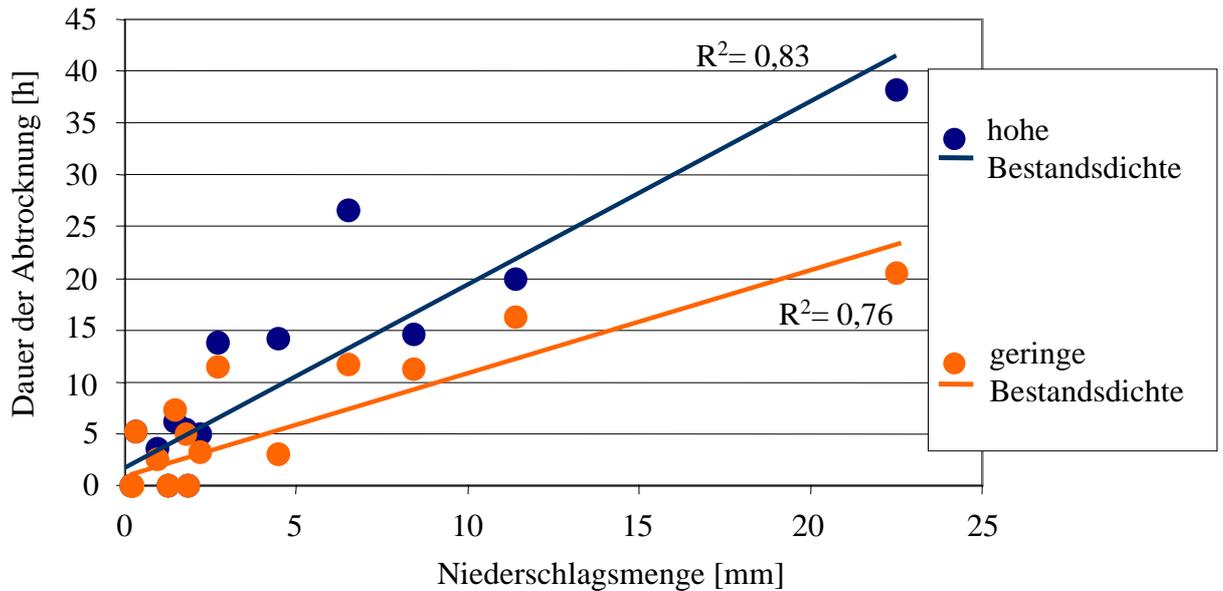


Abb. 16: Zusammenhang zwischen Niederschlagsmenge und Abtrocknungsdauer bei hoher und geringer Bestandsdichte, (Sorte Kanzler, Dikopshof, 2003).

3.2.4 Geschichtetes Bestandsklima im Weizen

Zur Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Sortenhabiti auf das Mikroklima wurden Luftfeuchtigkeit und Lufttemperatur in drei Höhen in drei Weizensorten mit verschiedenen Blattstellungen verglichen.

3.2.4.1 Lufttemperatur

Im unteren Blattbereich und der Temperatur über dem Bestand betragen die Unterschiede in der Lufttemperatur bis zu 2,3 K und traten tagsüber zwischen 12:00 und 16:00 Uhr auf. Die größten Unterschiede traten in der erektophilen Sorte auf, die geringsten in der breitblättrigen. Die Abstufung in der Bestandshöhe war weniger ausgeprägt. Überlagerungen der Kurven traten sowohl zwischen Messwerten aus 20 cm und 60 cm Höhe, als auch zwischen 60 cm und 100 cm Höhe auf (Abb. 17).

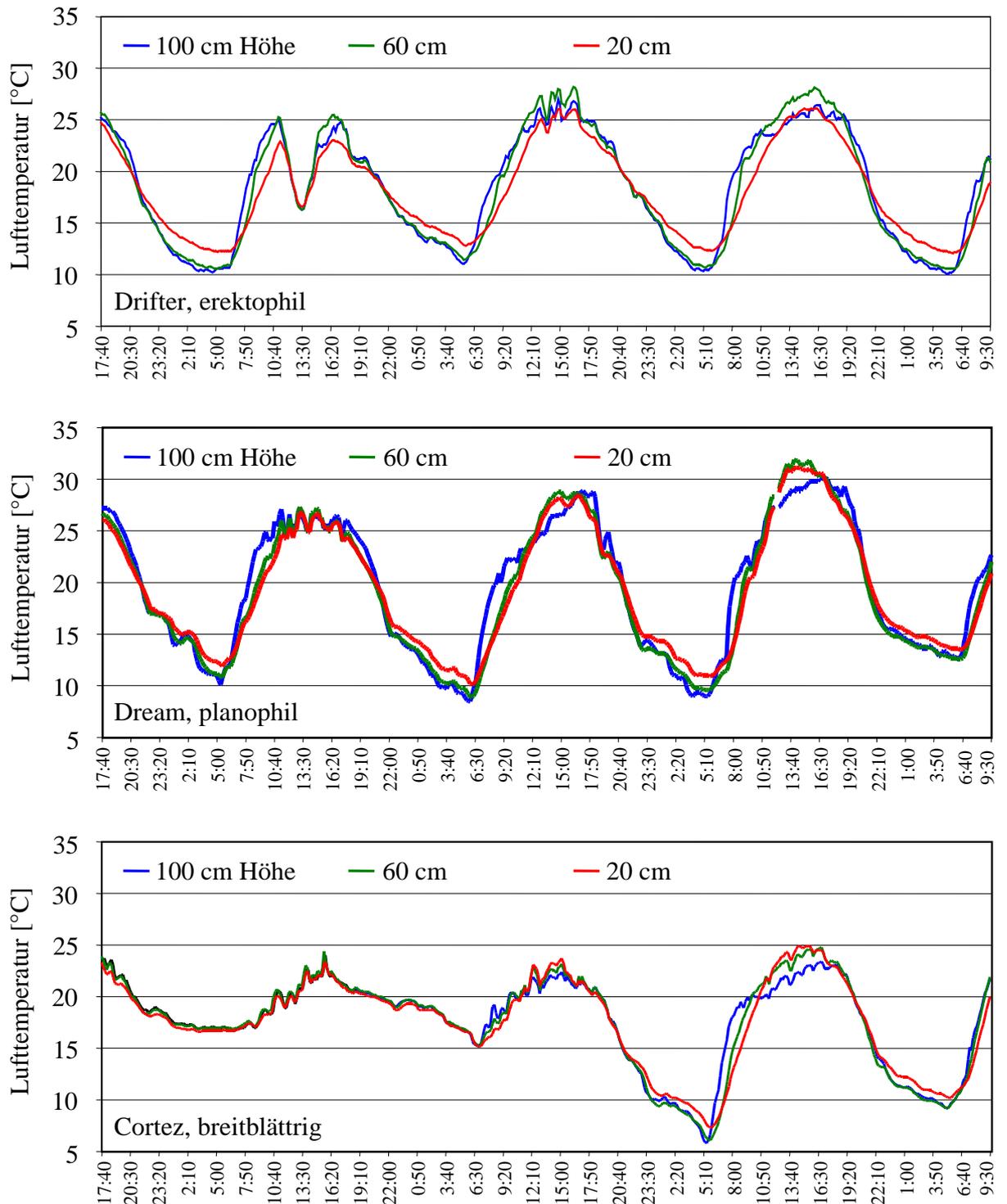


Abb. 17: Verlauf der Lufttemperatur in den Winterweizensorten Drifter, Dream und Cortez, gemessen in 20, 60 und 100 cm Höhe über dem Boden (Meckenheim, 2003).

3.2.4.2 Relative Luftfeuchtigkeit

Zwischen den Messpunkten im unteren Bestandsbereich (20 cm), dem oberen Bestandsbereich (60 cm) und über dem Bestand (100 cm), traten im Tagesverlauf wiederholt Unterschiede in der Luftfeuchtigkeit auf (Abb. 18).

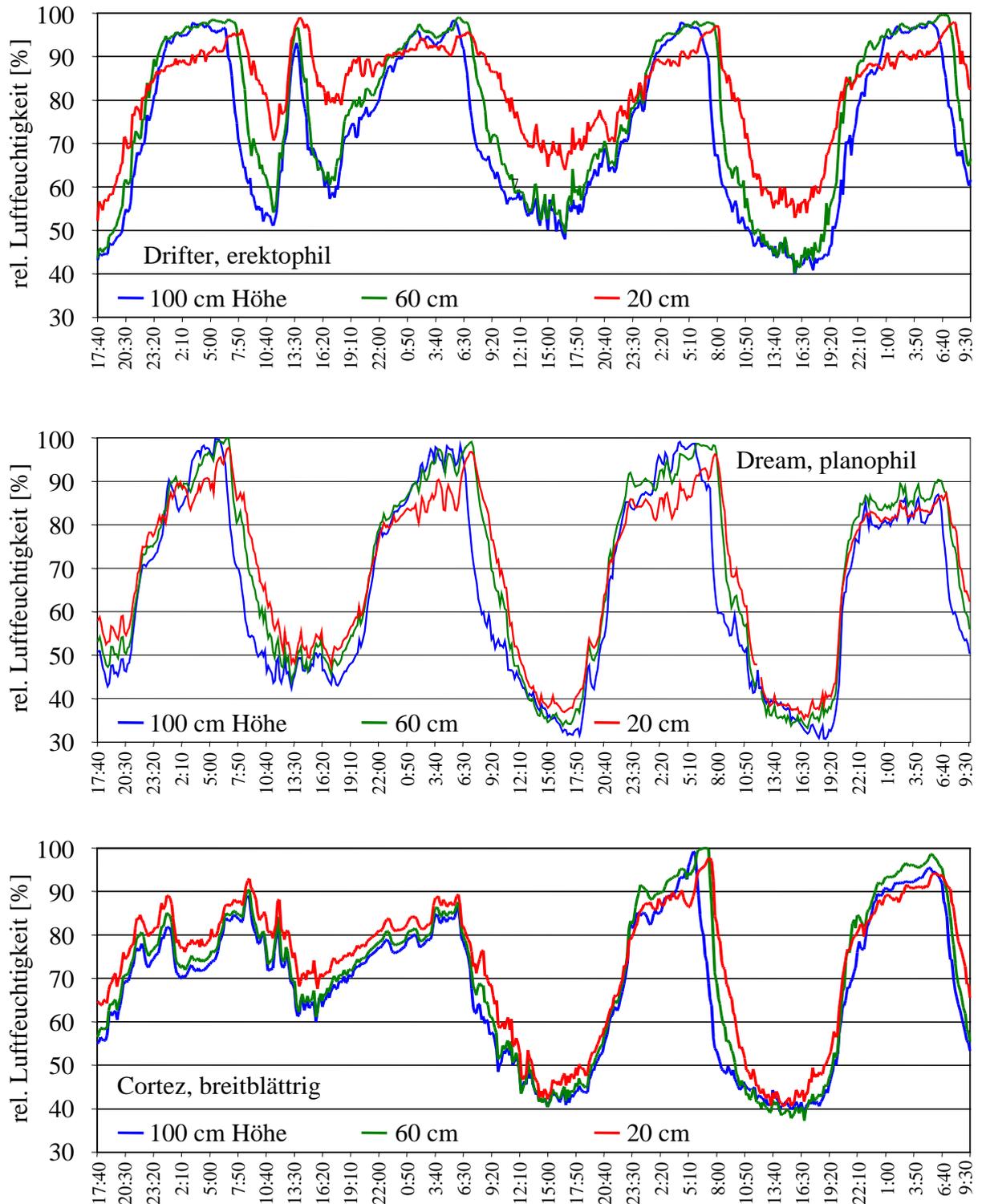


Abb. 18: Verlauf der rel. Luftfeuchtigkeit in den Winterweizensorten Drifter, Dream und Cortez, gemessen 20, 60 und 100 cm über dem Boden (Meckenheim, 2003).

Zwischen 9:00 und 17:00 Uhr war die Luftfeuchtigkeit in Bodennähe um 5 bis 20 % höher als über dem Bestand. Zwischen 24:00 und 7:00 Uhr kehrte sich der Unterschied um, mit Differenzen von 2 bis 10 %. Größere Differenzen traten am frühen Morgen auf, am späten

Abend waren sie vergleichsweise geringer. Dieser Verlauf war im erektophilen Bestand am stärksten ausgeprägt. Weniger stark fiel er im planophilen Bestand und im Bestand der breitblättrige Sorte Cortez aus. Die drei Messhöhen lieferten weitgehend abgestufte Werte in plausibler Reihenfolge.

3.2.5 Lufttemperatur und Bestandstemperatur

Um die Ortstreue von Temperaturzonen in einem Weizenbestand zu untersuchen und diese mit thermografischen Temperaturdaten zu vergleichen, wurden „Ground Truth“-Daten an fünf Punkten im Bestand, über die Vegetationsperiode mit stationären Wetterstationen aufgezeichnet. In Abb. 19 sind die im Bestand gemessenen Lufttemperaturen in 14-tägigem Abstand zu der Zeit der thermografischen Aufnahmen, gemittelt zwischen 10:13 und 12:13 Uhr, dargestellt.

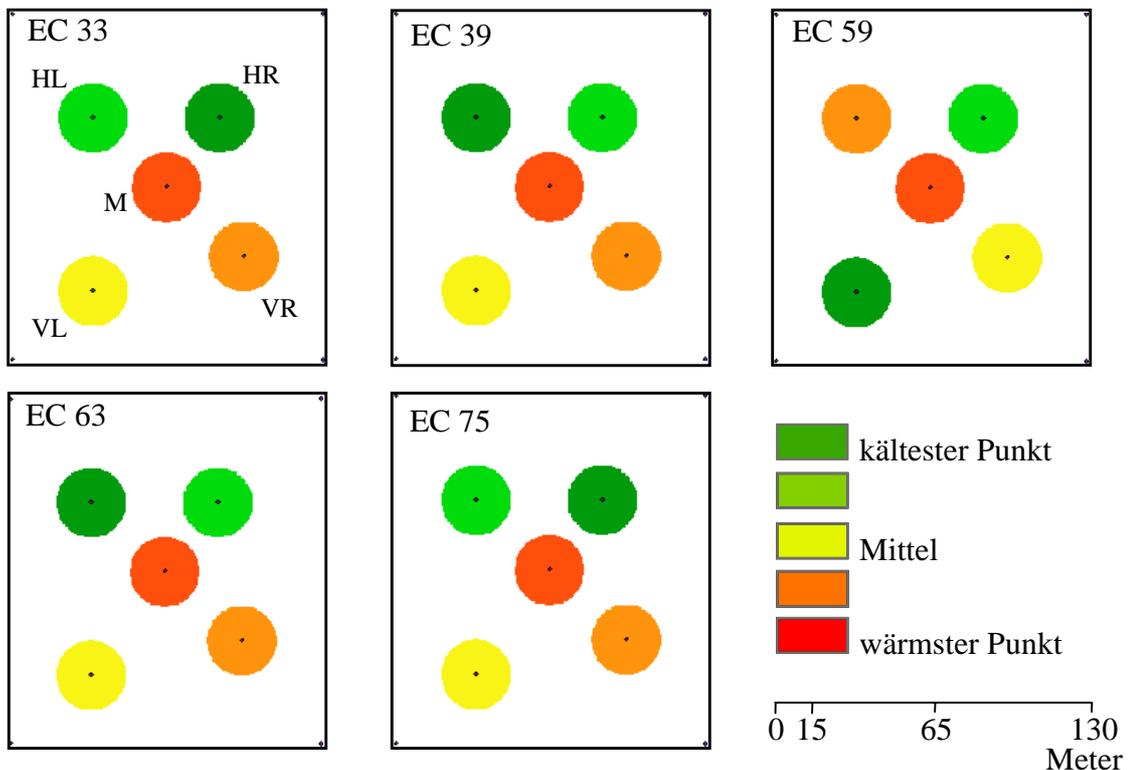


Abb. 19: Heterogenität der Lufttemperatur an 5 Punkten (HR, VR, M, HL, VL) in einem Weizenbestand zu fünf Entwicklungsstadien als Abweichung vom Mittelwert des Feldes (Sorte Drifter, Klein Altendorf, 2004).

Zu den ausgewählten fünf Terminen unterschieden sich die Lufttemperaturen an den fünf Messpunkten. Der Temperaturunterschied zwischen dem jeweils wärmsten und kältesten Punkt lag zwischen 0,45 K zu EC 39 und 0,87 K zu EC 59. Die Stabilität der Temperaturverhältnisse war hoch. Das Stabilitätsmaß %MRD betrug an Position HR 12,5 %, an VR 25 %, an M 0 %, an HL 12,5 % und VL 50 %. Der Punkt in der Feldmitte (M) war zu allen

fünf Terminen der wärmste im Bestand. Ebenfalls stabil waren die Lufttemperaturen an HR und HL.

Zum Vergleich der Temperaturverteilung und der im Bestand gemessenen Lufttemperaturen wurden diese in Abb. 19 gegenübergestellt. Die thermografisch ermittelte Bestandstemperatur war zu den fünf Terminen um 1,0 bis 3,0 K niedriger als die gemessene Lufttemperatur, die zwischen 15,5 und 22,5 °C lag. Ein enger Zusammenhang bestand nur zwischen der Lufttemperatur und der mittlere Bestandstemperatur der gesamten Fläche, dargestellt im Gesamttrend in Abb. 20. Zu zwei Terminen mit gleicher Lufttemperatur um 22 °C wies auch die Bestandstemperatur entsprechend gleiche Werte auf. Lokale Unterschiede der Lufttemperatur an den fünf Messpunkten waren für diesen Gesamttrend kaum von Bedeutung (Abb. 20). Entsprechend konnte eine einheitliche Trendrichtung für den Zusammenhang der lokalen Bestandstemperatur mit an entsprechendem Ort (HR, VR, M, HL, VL) gemessener Lufttemperatur nicht festgestellt werden. Die Unterschiede der lokalen Bestandstemperatur, mit bis zu 0,3 K und der lokalen Lufttemperatur, mit bis 0,9 K, waren zu gering, als dass aus ihnen, unter den Messbedingungen im Freiland, differenzierbare Trends abzuleiten gewesen wären.

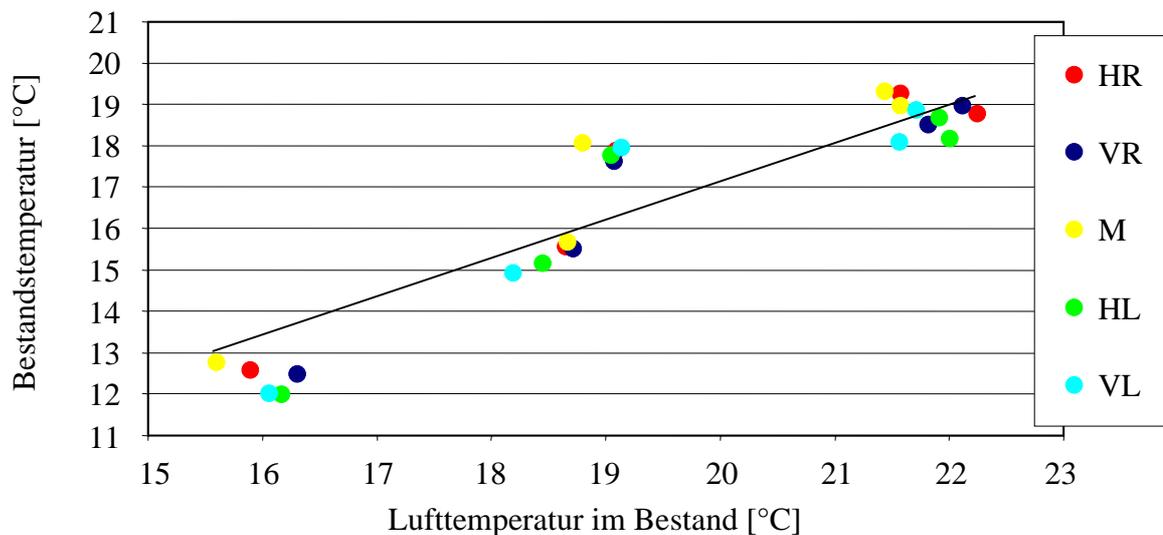


Abb. 20: Zusammenhang zwischen der thermografisch gemessenen Bestandstemperatur und der sensorisch an fünf Punkten im Bestand gemessenen Lufttemperatur in einem Weizenfeld, (Sorte Drifter, Klein Altendorf, 2004; die schwarze Linie markiert den Gesamttrend).

3.3 Thermografische Erfassung der Blatttemperatur von Weizenpflanzen

3.3.1 Differenzierung von Pflanze und Hintergrund

Die lange, schmale Form der Blätter und der hohe Fragmentierungsgrad der Blattfläche von Weizenpflanzen führte bei der Messung der Blatttemperatur zu Schwierigkeiten, bei der Trennung von Temperaturen auf der Pflanze und Temperaturen des Hintergrunds. Durch einen hohen Temperaturkontrast wurde die thermografische Differenzierung von Pflanze und Hintergrund wesentlich erleichtert.

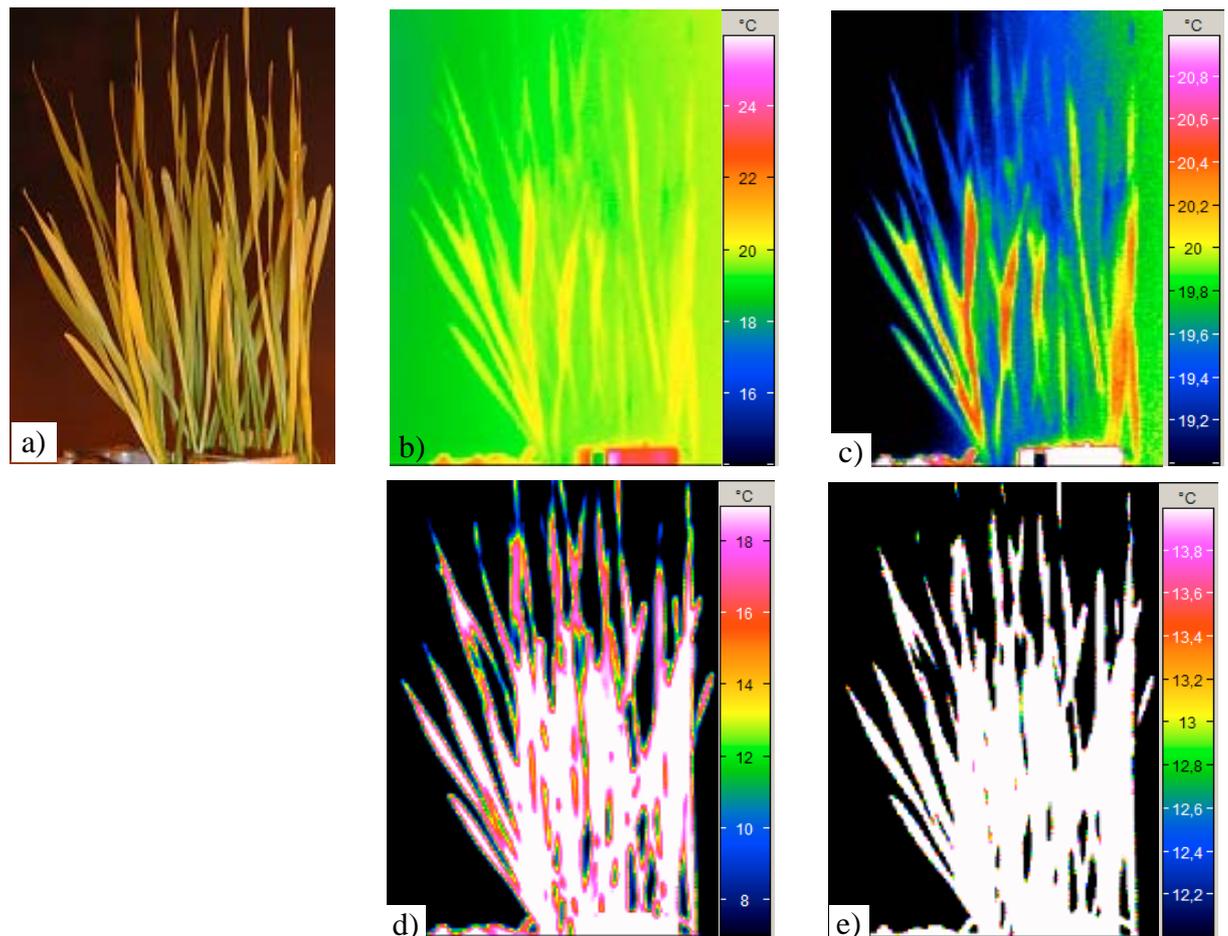


Abb. 21: Thermogramme einer Gruppe von Weizenpflanzen. a) Lichtbild; oben: Kontrast 2 K, Temperaturniveau 20 °C bei b) einer Spanne 12 K und c) einer Spanne 2 K; unten: Kontrast 14 K, Temperaturniveau 13 °C bei d) einer Spanne von 12 K und e) einer Spanne von 2 K.

Bei geringem Temperaturkontrast von 2 K (Abb. 21a) konnten die Pflanzen durch Verringerung des dargestellten Temperaturbereichs im thermischen Falschfarbbild sichtbar gemacht werden. Dabei wurden besonders die wärmsten Pixel hervorgehoben, und es zeigten sich Temperaturunterschiede des Hintergrundes (Abb. 21b). Pflanze und Hintergrund ließen sich dadurch nicht klarer voneinander differenzieren. Besser war dies durch einen größeren Temperaturkontrast von 14 K (Abb. 21c). Auch bei einer geringen Temperaturspanne (Abb. 21d) blieb so der Hintergrund einheitlich gefärbt und die Pflanzen traten kontrastreich hervor.

Im Thermogramm stellte sich der Übergang von Objektfläche zum Hintergrund fließend dar. Weizenblätter wiesen in Abhängigkeit von der Hintergrundtemperatur ein annähernd glockenförmiges thermisches Profil auf (Abb. 22).

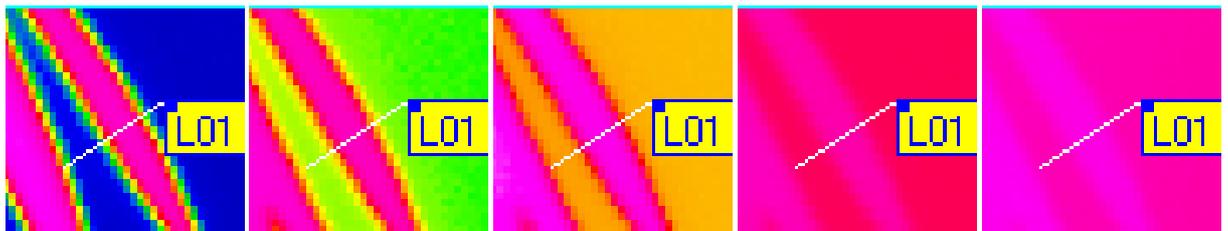
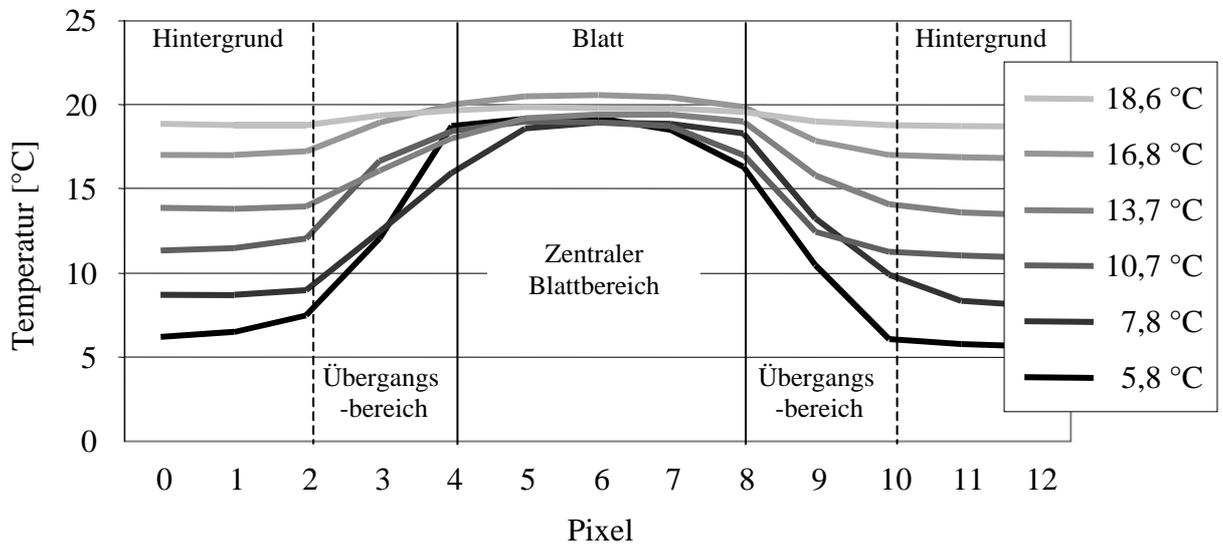


Abb. 22: Oben: Temperaturprofile eines Weizenblatts bei unterschiedlich temperiertem Hintergrund. Unten: Thermogramm eines Weizenblatts vor unterschiedlich temperiertem Hintergrund von 6,5 °C über 10,7 °C, 13,7 °C, 16,7 °C bis 18,5 °C bei einer Blatte Temperatur von ca. 20 °C (Die Linie L01 markiert den Ort des Temperaturprofils).

Die Blattbreite in Abb. 22 betrug ca. 8 Pixel (Zone innerhalb der gestrichelten Linien). Im zentralen Blattbereich (Zone innerhalb der durchgezogenen Linien) war ein thermisches Plateau im Bereich des Blattzentrums zu erkennen, welches ca. 4 Pixel breit war. Je größer der Temperaturkontrast, umso schärfer verliefen die Grenzen des Plateaus. Der Übergangsbereich zwischen Blatt und Hintergrund (Zone zwischen gestrichelter und durchgezogener Linie) war links und recht ca. 2 Pixel breit. Diese Pixel stellten eine Mischtemperatur mit Hintergrund- und Blattanteilen dar. Die Breite von 2 Pixeln ergab sich durch den nichtparallelen Verlauf der Blattkanten zum Pixelraster der Wärmebildkamera.

Zur thermischen Differenzierung zwischen Objekt und Hintergrund musste ein möglichst hoher thermischer Kontrast erzeugt werden, so dass alle zur Pflanze gehörenden Pixel wärmer waren als der Hintergrund. Bei einer Hintergrundtemperatur von ca. 13 °C konnten lokale Blatttemperaturen bis ca. 6 K unter der höchsten lokalen Blatttemperatur von ca. 21 °C

erkannt werden. Bei einem kleinen Temperaturkontrast von 1,5 K waren Blattanteile kaum noch vom Hintergrund zu differenzieren und somit die Grenze zwischen Blatt und Hintergrund sehr unscharf (Abb. 23).

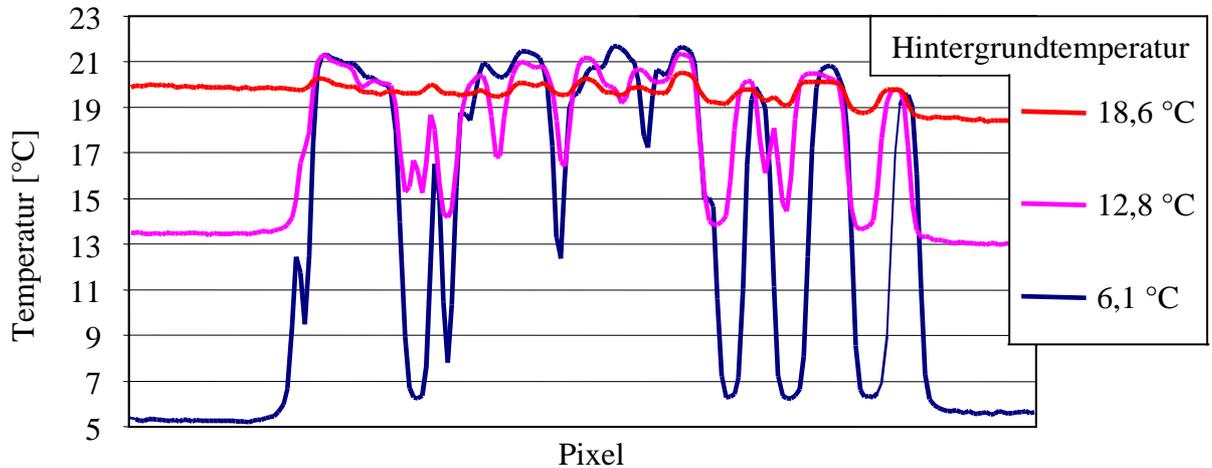


Abb. 23: Temperaturprofile von Weizenpflanzen bei unterschiedlicher Hintergrundtemperatur.

3.3.2 Bestimmung der Trenntemperatur

Eine Trenntemperatur diente bei der Auswertung der Thermogramme zur Identifizierung der Pixel. Pixel mit einem Temperaturwert kleiner als der Trenntemperatur wurden dem Hintergrund zugeordnet, Pixel mit einer Temperatur größer als der Trenntemperatur wurden der Pflanze zugeordnet und für die Berechnung der Blattemperatur verwandt (Abb. 24).

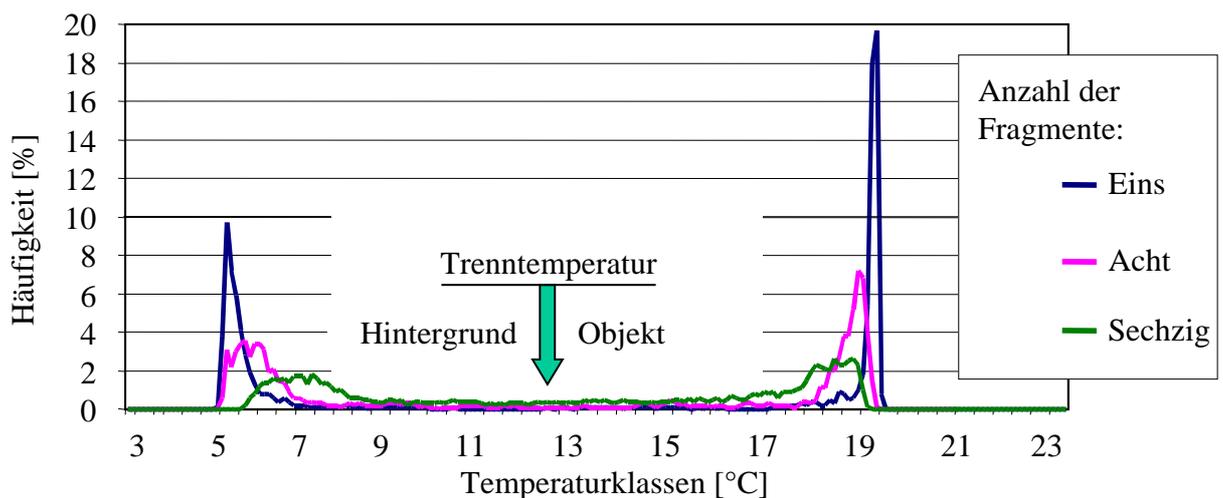


Abb. 24: Thermische Histogramme der Messfläche bei unterschiedlichem Fragmentierungsgrad des aufgenommenen Objekts.

Ein Versuch, die Genauigkeit bei der Temperaturbestimmung zu verbessern, bestand darin, die Trenntemperatur aus dem jeweiligen Thermogramm als Messwert zu entnehmen, statt sie

aufgrund einer grafisch ermittelten Blattfläche zu bestimmen. Als Messwert wurde das Maximum der Hintergrundtemperatur, gemittelt aus den Maxima mehrerer Messflächen gewählt. Dieser Wert ließ sich über die Funktion der Wärmebildserienauswertung für jedes einzelne Thermogramm ermitteln. Die Trenntemperatur wurde jeweils so eingestellt, dass die errechnete mittlere Hintergrundtemperatur der gemessenen maximalen Hintergrundtemperatur entsprach. In diesem Versuch wurden Pflanzen ebenfalls durch ein Papiernetz ersetzt. Der Vergleich der beiden Methoden zeigte aber, dass die alternative Methode der gleichen Problematik unterlag und ungenauere Berechnungswerte lieferte, als die Methode der grafisch ermittelten Blattfläche (Abb. 25).

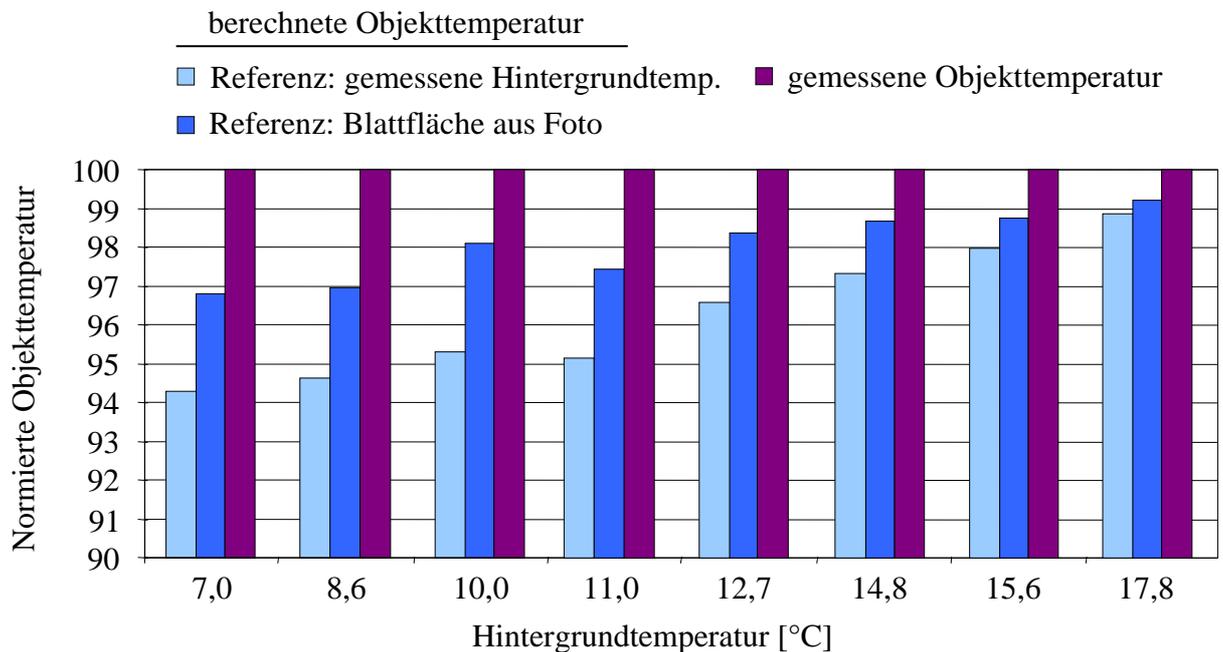


Abb. 25: Vergleich zweier Referenzmethoden zur Berechnung der Objekttemperatur, Temperaturwerte wurden normiert (gemessene Objekttemperatur = 100).

3.3.3 Einfluss des Fragmentierungsgrads

Um die Heterogenität der Temperaturen auf Pflanzenblättern, z.B. durch variierende Querschnitte, Wölbungen, Verwindungen und Überlagerungen auszuschließen, wurden die Versuche zur Messmethodik mit einem Netz aus weißem Papier simuliert. Auch konnte auf diese Weise die reale Blattemperatur direkt gemessen werden; sie wird daher als gemessene Objekttemperatur angegeben.

Der Fragmentierungsgrad des Objekts spielte bei der Bestimmung der Objekttemperatur eine wesentliche Rolle. Den Unterschied im thermischen Profil einer zusammenhängenden und einer fragmentierten Oberfläche vor einem kälteren Hintergrund zeigt Abb. 26.

Die dem Objekt zuzuordnenden Temperaturen waren in dem oberen Plateau der Kurven zu finden.

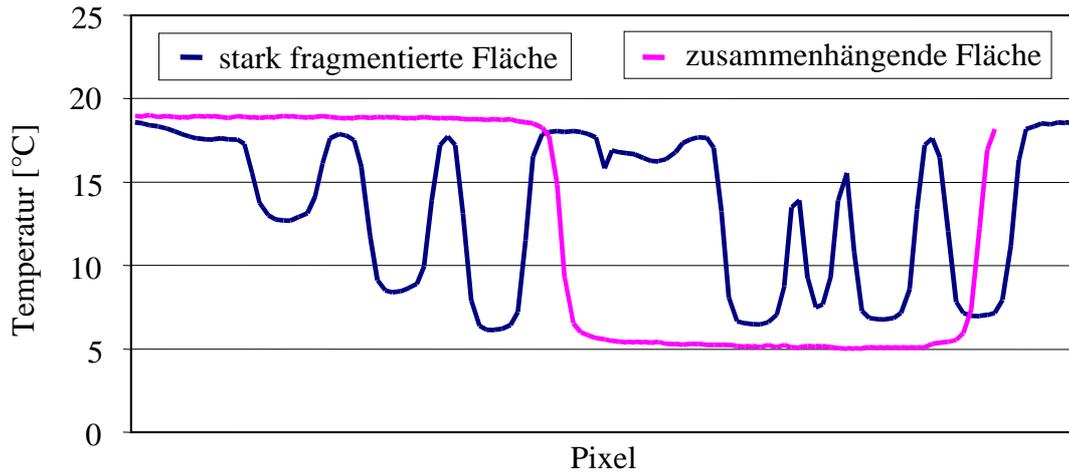


Abb. 26: Thermische Profile von unterschiedlich stark fragmentierten Messflächen.

Die Kurve für die stark fragmentierte Fläche veranschaulicht den großen Anteil an Übergangsbereichen, während das Profil einer zusammenhängenden Oberfläche nur zwei Übergangszonen aufweist. Den Einfluss auf die Ausprägung der Temperaturverteilung zeigt Abb. 23. Je geringer die Summe der Umfänge der Teilflächen, beschrieben als Anzahl der Teilflächen, umso schmäler fiel der Temperaturbereich aus, in dem Pixel des Hintergrundes, bzw. Pixel des Objekts zu finden waren.

Im Versuchsaufbau betrug die simulierte Blattfläche in allen Fällen 50 %. Variiert wurde das Verhältnis von Fläche zu Umfang (Fragmentierungsgrad), benannt nach der Anzahl zusammenhängender Blattflächenfragmente (Eins, Acht, Sechzig).

Durch die Mischtemperaturpixel im Randbereich zwischen Blatt und Hintergrund führte eine zu niedrig gewählte Trenntemperatur zu einer Absenkung der ermittelten Blatttemperatur, weil in die Berechnung der Blatttemperatur Pixel mit Anteil am kalten Hintergrund einbezogen wurden. Eine zu hoch gewählte Trenntemperatur führte entsprechend zu einer Erhöhung der Blatttemperatur, da nur relativ warme Pixel für ihre Berechnung ausgewählt wurden.

Je größer der Anteil der Mischpixel war, also bei zunehmendem Fragmentierungsgrad, umso größer wurde die Differenz zwischen der gemessenen und berechneter Objekttemperatur. Neben dem Fragmentierungsgrad hatte auch die Temperaturdifferenz zwischen Objekt und Hintergrund einen Einfluss auf die Genauigkeit bei der Temperaturbestimmung: Mit zunehmender Differenz reduzierten die Mischpixel am Rand des Objekts die berechnete Objekttemperatur (Abb. 27).

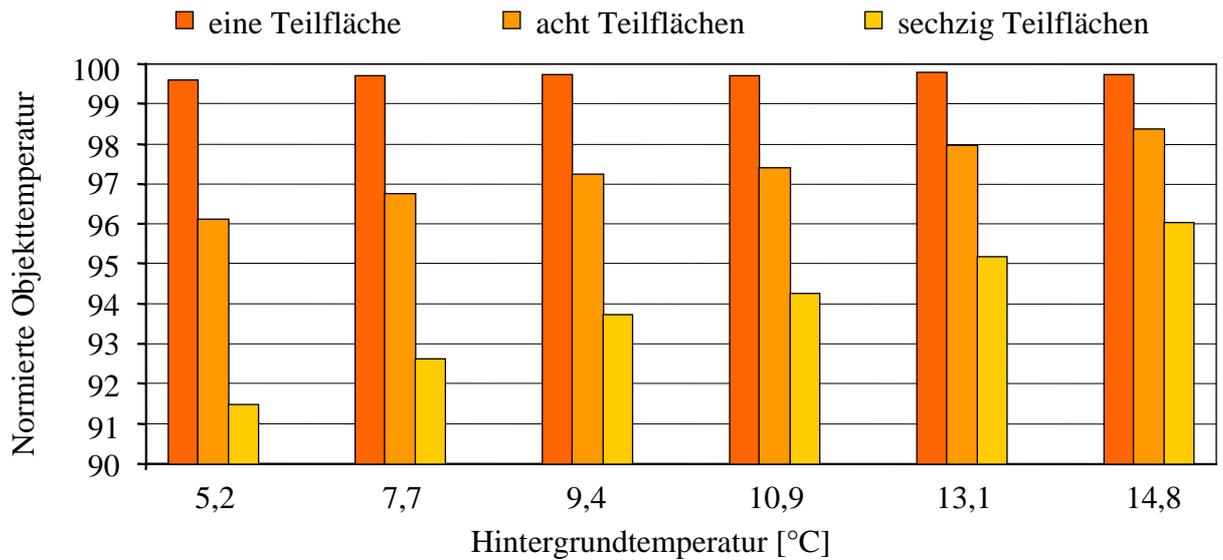


Abb. 27: Einfluss des Fragmentierungsgrades (eine, acht, sechzig Teilflächen) auf die Genauigkeit der berechneten Objekttemperaturen, Temperaturwerte wurden normiert, (gemessene Objekttemperatur = 100).

3.3.4 Einfluss der Aufnahme­richtung

Die durch die Methodik bedingten Ungenauigkeiten bei der Ermittlung der Blattemperatur wirkten sich auch auf die Wiederholbarkeit von Messungen an derselben Pflanzengruppe aus. Bei konstantem Blattflächenanteil war die Streuung zwischen thermografisch gemessenen Blattemperaturen ebenso groß, wie die Streuung der Referenztemperatur (Abb. 28). Somit war die Streuung der Blattemperatur auf Veränderungen der Lufttemperatur zurückzuführen.

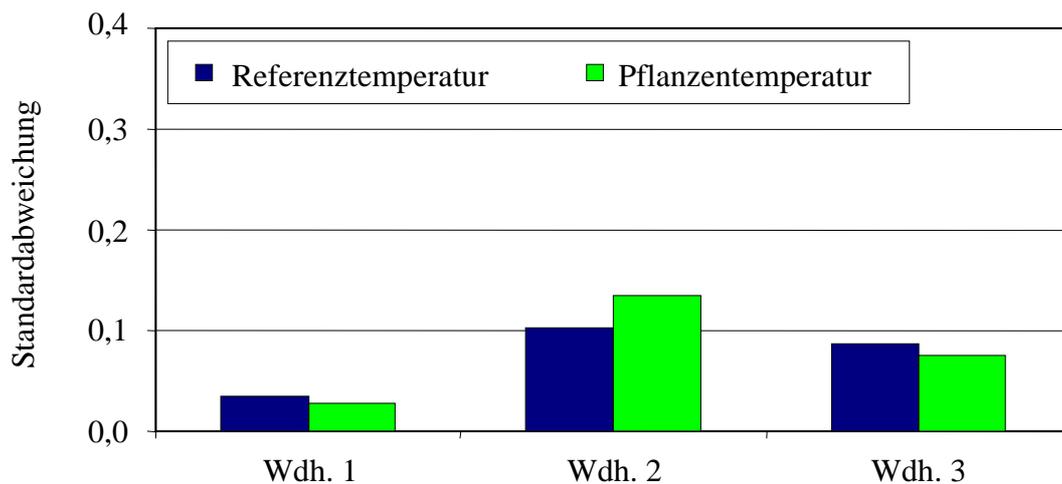


Abb. 28: Streuung der thermografisch gemessenen Pflanzentemperatur aus derselben Blickrichtung, verglichen mit der Streuung der Referenztemperatur (Sommerweizen Sorte Munk). Dargestellt sind drei Wiederholungen.

Wurden die thermografischen Aufnahmen von einer Pflanzengruppe aber aus verschiedenen Blickrichtungen gemacht, so veränderte sich der Anteil der Blattfläche im Thermogramm.

Dies führte zu einer erhöhten Streuung der berechneten Blatttemperatur, die bis Faktor vier über der Streuung der Referenztemperatur lag (Abb. 29).

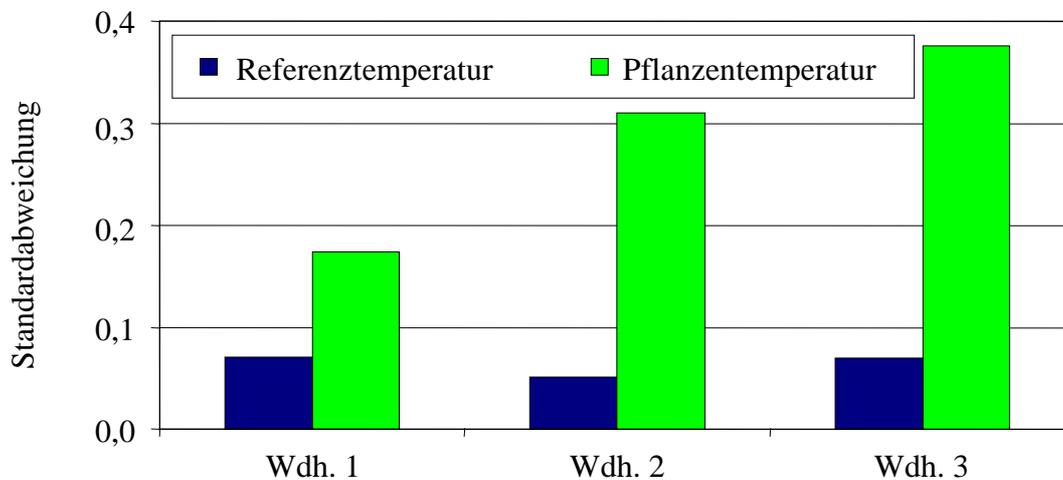


Abb. 29: Streuung der thermografisch gemessenen Pflanzentemperatur aus variierten Blickrichtungen, verglichen mit der Streuung der Referenztemperatur (Sommerweizen Sorte Munk). Dargestellt sind drei Wiederholungen.

3.4 Einfluss von abiotischen Stressfaktoren auf die Blatttemperatur

3.4.1 Einfluss der Wasserversorgung

Die Bedeutung der Wasserversorgung für die Blatttemperatur wurde durch Porometermessungen und Thermografie von trockengestressten und bewässerten Weizenpflanzen deutlich. Die Trockenstressbedingungen führten zu einer deutlich reduzierten Transpirationsrate. Der Unterschied zur bewässerten Variante betrug bei steigender Referenztemperatur mindestens Faktor zwei. Betrachtet man die Kurven abschnittsweise, so stieg die Transpirationsrate der bewässerten Pflanzen bis ca. 24 °C fast linear an. Bei weiter ansteigender Umgebungstemperatur blieb sie annähernd unverändert. Die Transpirationsrate der trockengestressten Variante erreichte bei ca. 28 °C ein Plateau (Abb. 30).

Bei beiden Varianten reduzierte die Transpiration die Blatttemperatur (T_B) unter den Wert der Lufttemperatur (T_L), während die bewässerten Pflanzen über den gesamten Temperaturbereich eine geringere Blatttemperatur aufwiesen als die trockengestressten Pflanzen. Bis 25 °C lag der Temperaturunterschied zwischen -0,1 und -0,7 K und nahm bis auf -2,7 K zu. Im Temperaturverlauf der Pflanzen war zu erkennen, dass sich der Unterschied zwischen Lufttemperatur und Blatttemperatur mit ansteigender Lufttemperatur vergrößerte. Lag der Unterschied für $T_L=17,5$ °C bei 0,8 K für die trockengestresste bzw. 1,7 K für die bewässerte Variante, so nahm der Unterschied für $T_L=23,3$ °C auf 2,8 K, bzw. 4,2 K zu, für $T_L=29,5$ °C auf 2,5 K, bzw. 5,0 K. Die unterschiedlichen Transpirationsraten führten zu einem unterschiedlichen Verhältnis von Blatt- und Lufttemperatur.

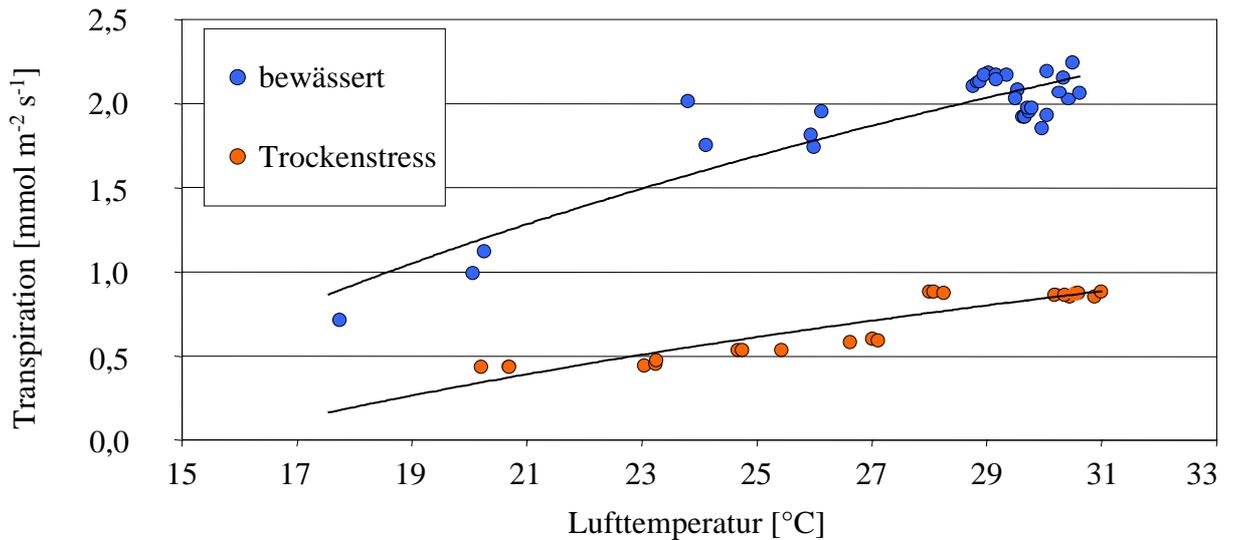


Abb. 30: Einfluss der Lufttemperatur auf die Transpirationsrate von bewässerten und trocken gestressten Weizenpflanzen (Sommerweizen Sorte Munk).

Während die Temperatur der Referenzfläche über 160 Minuten linear von 17,6 °C auf 30,0 °C ($\Delta T_L=12,4$ K) anstieg, nahm die Blattemperatur der bewässerten Pflanzen von 15,9 °C auf 24,9 °C ($\Delta T_W=9,0$ K) zu. Die Blattemperatur der trocken gestressten Pflanzen nahm von 16,7 °C auf 27,5 °C ($\Delta T_T=10,8$ K) zu. Der Anstieg der Blattemperatur beider Pflanzen verlief bis zu einer Referenztemperatur von 25 °C nahezu parallel. Darüber hinaus wurde der Anstieg der Blattemperatur für die gestressten Pflanzen ab 25 °C größer und für die bewässerten Pflanzen kleiner (Abb. 31).

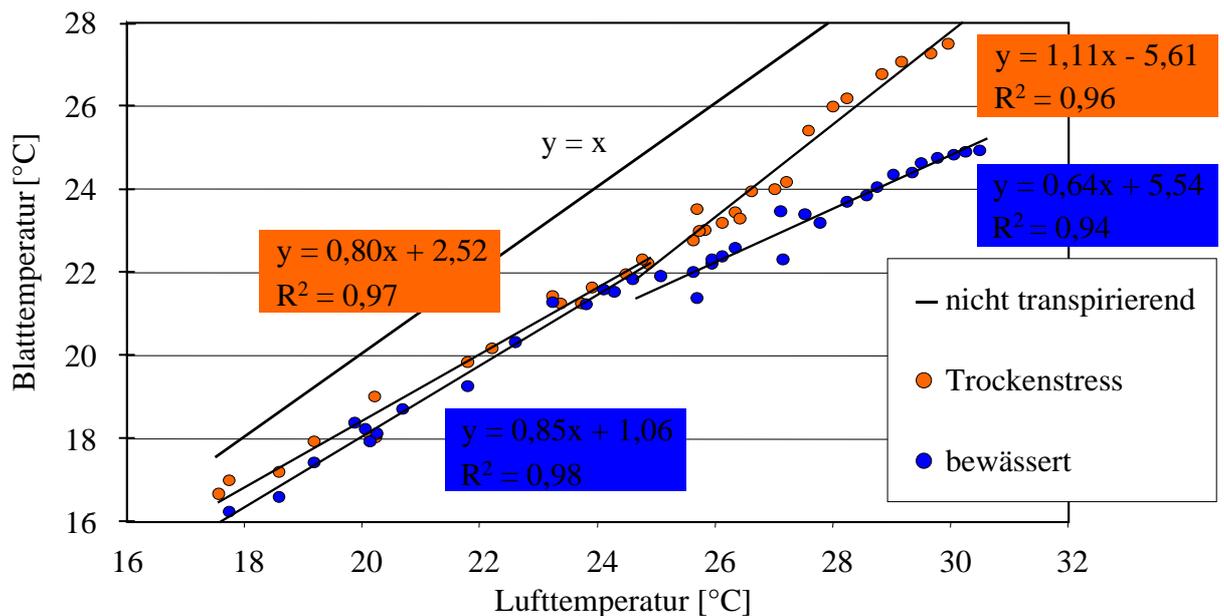


Abb. 31: Einfluss der Wasserversorgung auf die Reaktion der Blattemperatur von Weizenpflanzen auf eine ansteigende Lufttemperatur (Sommerweizen Sorte Munk).

3.4.2 Einfluss der Stickstoffversorgung

Wasser- und Stickstoffversorgung sind die zwei wesentlichen abiotischen, ertragsrelevanten Faktoren, die bei unterschiedlicher Verfügbarkeit zu Heterogenität in der Bestandsentwicklung führen können. Unterschiedlich versorgte Weizenpflanzen wurden bei einer Tag/Nacht-Photoperiode thermografisch und porometrisch untersucht (Abb. 32).

Beide Pflanzengruppen, mit und ohne Stickstoffversorgung, waren während der Licht- und der Dunkelphase kälter als die Referenztemperatur. Während der Lichtphase betrug die Abkühlung der stickstoffversorgten Pflanzen bis zu 2,0 K und war damit wesentlich stärker, als die der Pflanzen mit Stickstoffmangel. In der Dunkelphase unterschied sich die Blatttemperatur nicht. Auf Schwankungen der Lufttemperatur reagierten beide Pflanzengruppen in gleicher Weise, und beide Temperaturkurven verliefen weitgehend parallel zu der Kurve der Referenztemperatur. Das Abschalten der Beleuchtung führte zu einem Abfall der Referenztemperatur um 4,0 K auf 18,5 °C. Mit Einsätzen der Dunkelphase glichen sich die Blatttemperaturen auf nahezu identische Werte an und blieben dabei ca. 0,3 K kälter als die Referenz. Demnach konnten die gut stickstoffversorgten Pflanzen ihre Blatttemperatur wesentlich konstanter halten als die Pflanzen mit Stickstoffmangel, deren Blatttemperatur eine weit größere Variabilität über eine Tag/Nacht-Periode aufwies.

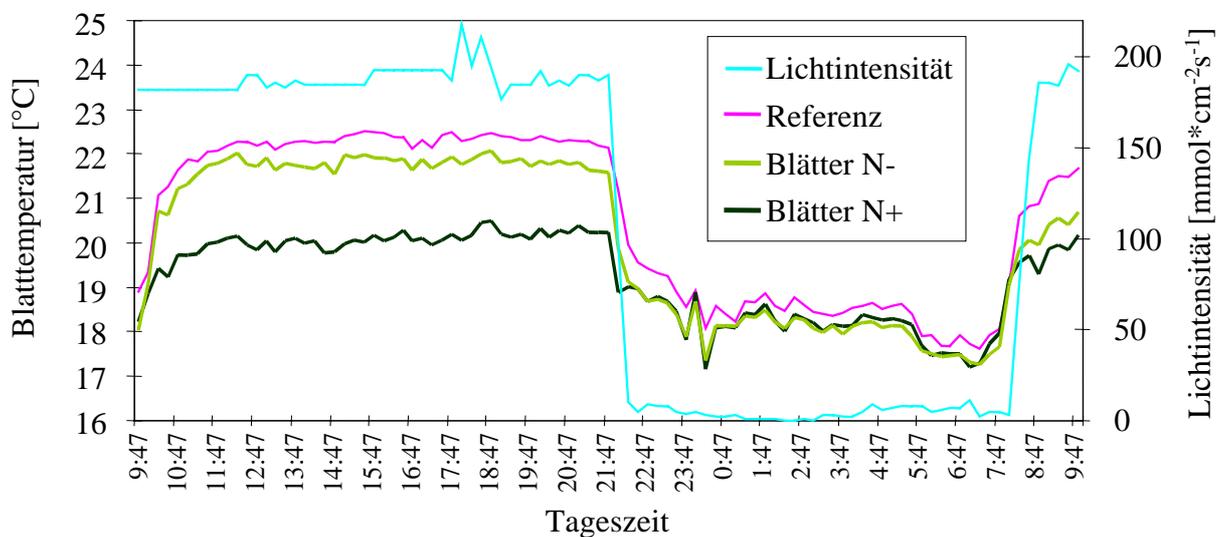


Abb. 32: Einfluss der Stickstoffversorgung auf die Blatttemperatur von Weizenpflanzen während einer Photoperiode von 14 Stunden. (Sommerweizen Sorte Munk).

3.5 Untersuchungen zur thermografischen Erfassung von Blattnässe

Blattnässesensoren erfassen Blattnässe nur lokal und ein flächendeckender Einsatz ist nicht möglich. Die digitale Infrarothermografie wurde auf ihre Eignung untersucht, um Blattnässe flächendeckend und hochauflösend zu erfassen.

3.5.1 Abtrocknung von Tropfen

Vergleich von einzelnen Tropfen und einer aufgesprühten Tropfenschar

Wassertropfen auf Weizenblättern stellten sich thermografisch als runde, kalte Flächen dar (Abb. 33a, 33b, 33c). Es wurde zwischen drei einzelnen Tropfen und einer flächig aufgesprühten Tropfenschar unterschieden. Beide Varianten führten zu einer gleich hohen Abkühlung gegen das umliegende, nicht benetzte Blattgewebes um bis zu 4,0 K (Abb. 33d) bzw. 4.2 K (Abb. 33e).

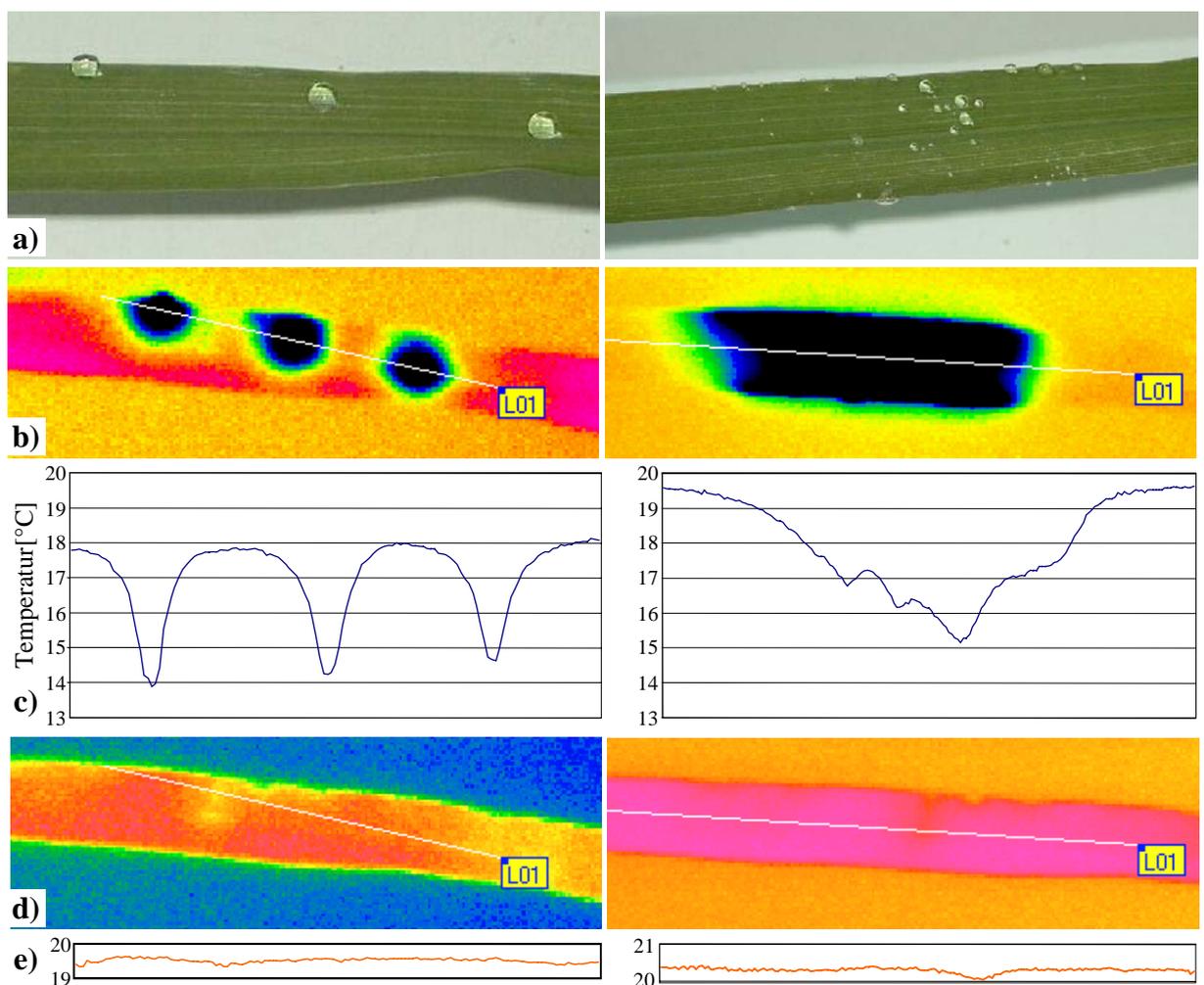


Abb. 33: a) Einzelne Tropfen (je 7 μ l) und flächig aufgesprühte Blattbenetzung; b) Thermogramme der nassen Blätter mit Profillinien. c) Thermische Profile bei nassen Blättern. d) Thermogramme der abgetrockneten Blätter. e) Thermische Profile bei abgetrockneter Blattnässe.

Abtrocknung von Tropfen unterschiedlicher Volumina

Der thermische Effekt der Abtrocknung von Wassertropfen mit Volumen von 1, 2, 4, 7, 10 und 15 μl ist in der Bilderserie in Abb. 34 dargestellt. Die Tropfen führten zu einer lokalen Abkühlung des Blattes. Der Abkühlungseffekt dehnte sich von der benetzten Fläche auf das umliegende Gewebe kreisförmig aus und erstreckte sich auf das ca. fünffache des Radius der benetzten Fläche. Nach Abtrocknung zeigten die Blätter keine thermischen Auffälligkeiten und wiesen wieder eine vergleichsweise homogene Temperaturverteilung auf. Die Abkühlung um ca. 4,5 K im Zentrum des benetzten Gewebes blieben bis zur vollständigen Abtrocknung thermisch nachweisbar.

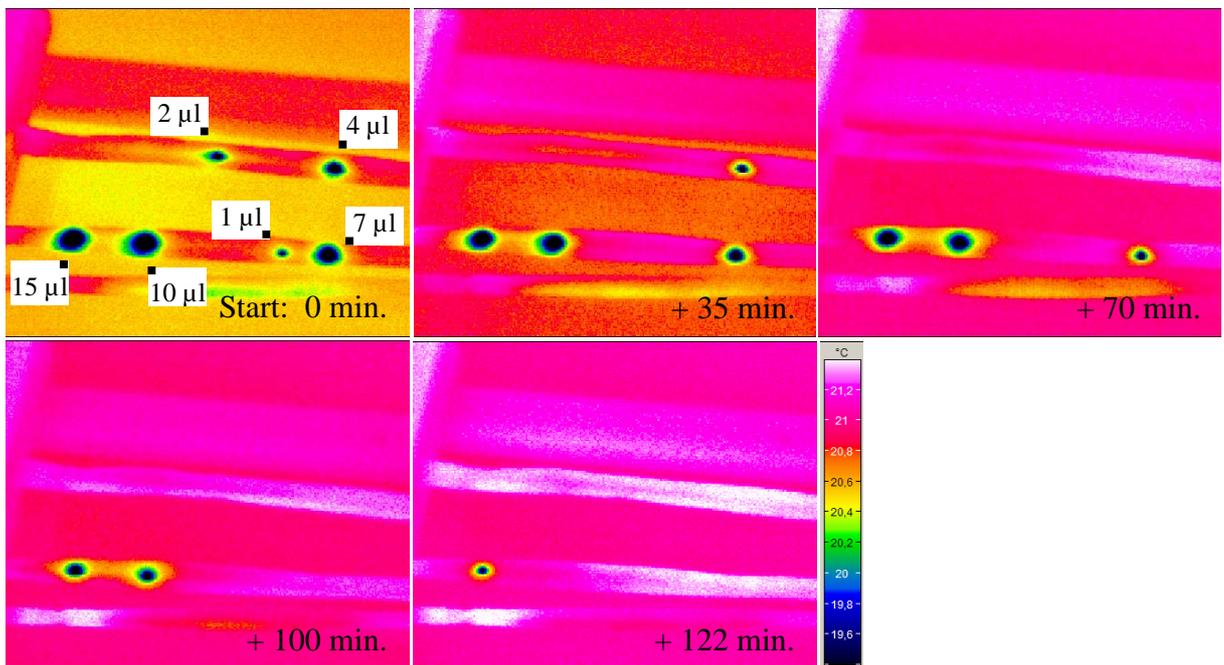


Abb. 34: Thermografische Erfassung der Abtrocknung einzelner Wassertropfen mit verschiedenen Volumina auf eingespannten Weizenblättern über 122 Minuten.

Abhängig von den unterschiedlichen Volumina der Tropfen dauerte die Abtrocknung zwischen 16 Minuten bei 1 μl Volumen und 128 Minuten bei 10 μl Volumen (Abb. 35). Als abgetrocknet galt der Tropfen, wenn die Temperatur in seinem Zentrum bis auf die Temperatur des trockenen Blattes angestiegen war.

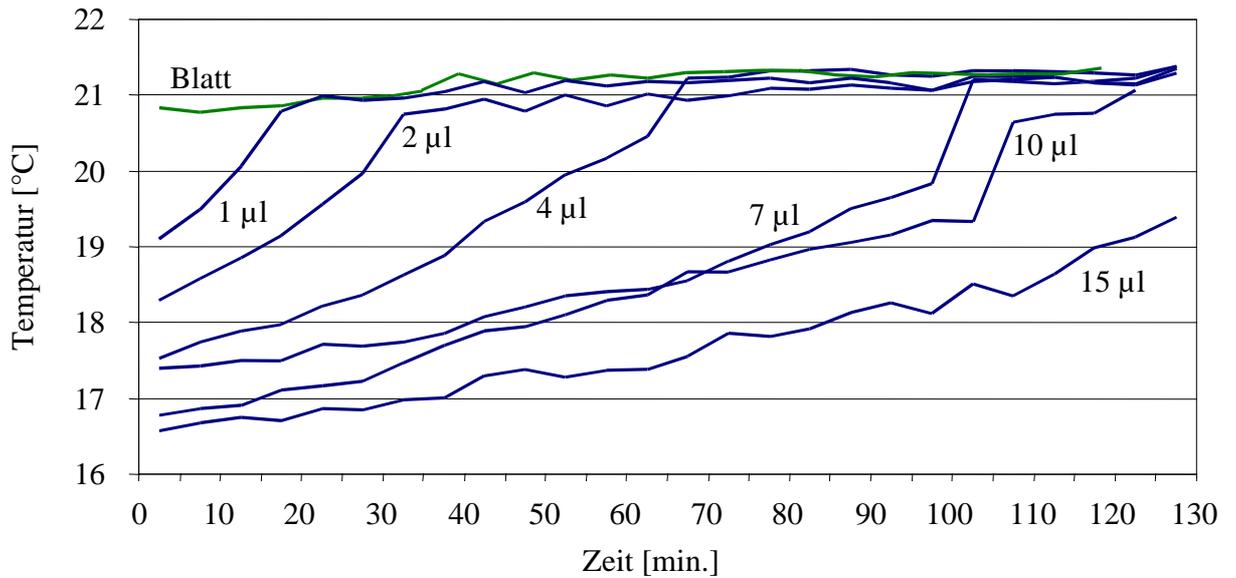


Abb. 35: Einfluss des Tropfenvolumens auf die Abtrocknungsdauer von Tropfen auf Weizenblättern.

3.5.2 Abtrocknung eines Weizenbestandes unter kontrollierten Bedingungen

Die Abtrocknung des Bestandes dauerte ca. 95 Minuten. Zu diesem Zeitpunkt betrug der Temperaturunterschied zwischen trockenem und beregnetem Bestand noch 0,1 K und lag damit im Bereich des Temperaturunterschieds vor der Beregnung. Aus der Bilderserie in Abb. 36 ist zu erkennen, dass der beregnete Bestand in horizontalen Schichten abtrocknete.

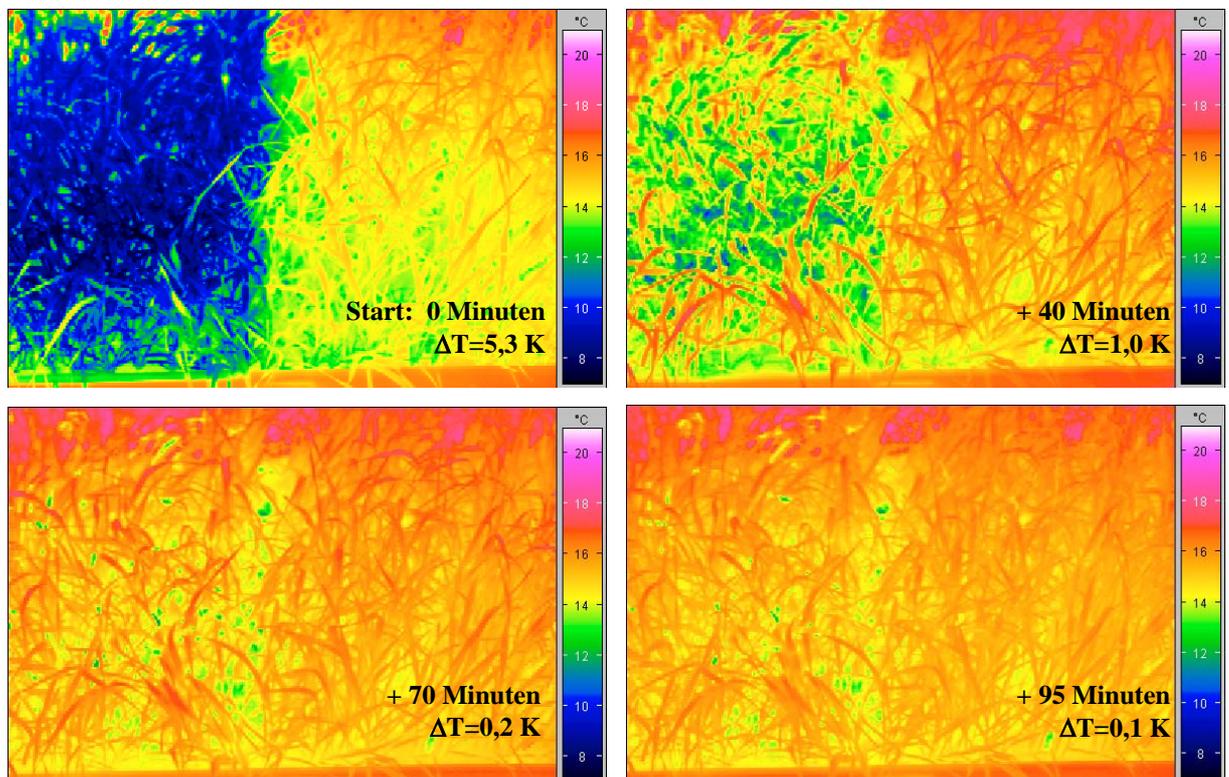


Abb. 36: Thermografische Erfassung der Abtrocknung eines Weizenbestandes im Gewächshaus über 95 Minuten bei 21 °C und 75 % rel. Luftfeuchtigkeit (Sommerweizen, Sorte Munk).

Nach 40 Minuten hatten die oberen Blätter im Thermogramm (Abb. 36, oben links) bereits wieder ihre ursprüngliche Temperatur angenommen (gelb-rote Färbung), während tiefere Blattschichten und der Boden noch deutlich kälter, d.h. feuchter waren (grün-blaue Färbung).

Das ungleichmäßige Abtrocknen des Bestandes ist im exponentiell-asymptotischen Verlauf der Abtrocknungskurve der berechneten Zone wiederzufinden (Abb. 37). Höhere Blattetagen trockneten am schnellsten ab und waren durch ihre Exposition zur Licht- und Wärmequelle wärmer als tiefere Etagen. Durch ihren hohen Anteil im Bild wurde die Bestandstemperatur wesentlich durch die Temperatur der oberen Blattschichten beeinflusst. Tiefere Blattetagen trockneten überproportional langsam ab, so dass sich die Bestandstemperatur nach ca. 40 Minuten nur sehr langsam der Temperatur des Referenzbestandes annäherte.

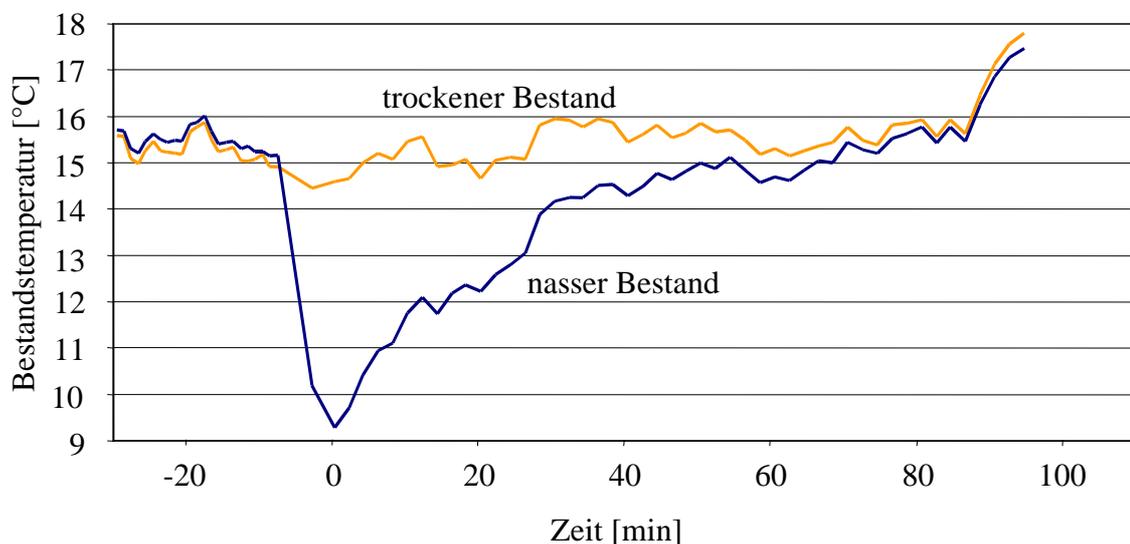


Abb. 37: Verlauf der Bestandstemperatur in einem berechneten und einem trockenen Ausschnitt eines Weizenbestandes unter kontrollierten Bedingungen.

3.5.3 Blattnässe in Freilandbeständen

Durch Beregnung

Die künstliche Beregnung einer Parzelle mit 3 mm Niederschlag unmittelbar vor der Aufnahme führte zu einer Reduktion der durchschnittlichen Bestandstemperatur auf 19,5 °C, verglichen mit der Temperatur der trockenen Parzelle von 20,0 °C (Abb. 38). Die thermischen Muster des Bestandes, der die beregnete Parzelle umgab, ließen eine höhere Bestandstemperatur als in der Vergleichsparzelle vermuten. Zieht man die Temperatur des umgebenden Bestandes als Vergleich heran, so betrug der Abkühlungseffekt -0,7 K für die durchschnittliche Temperatur der ganzen Parzelle und 0,8 K für den Vergleich des Parzellenrandes mit der kältesten, beregneten Teilparzelle.

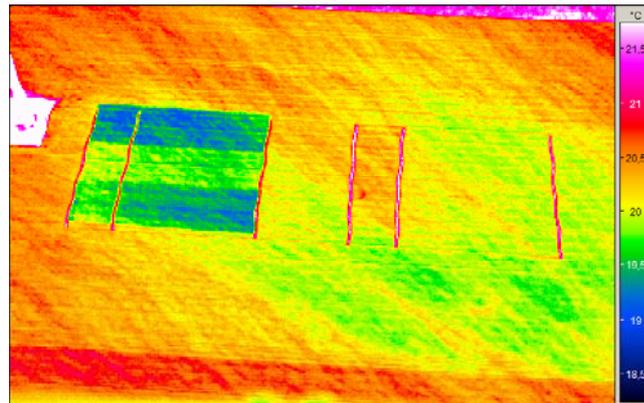


Abb. 38: Thermogramm eines Weizenbestandes zu EC 75, linke Parzelle beregnet, rechte Parzelle trocken (Sorte Drifter, Jülich I, 2004).

Die Temperaturspanne in der nassen Parzelle, gemessen in der oberen und unteren kalten Zone, betrug 0,97 bzw. 0,77 K; etwas geringer war die Spanne mit 0,53 bzw. 0,62 in zwei vergleichbaren Zonen in der trockenen Parzelle.

Bestandstemperatur vor und nach Niederschlag

Zu Ende des Ährenschiebens (EC 57) wurde das Feld am Standort Klein Altendorf vor und ca. 20 Minuten nach einem Niederschlag von 2 mm thermografisch aufgenommen (Abb. 39).

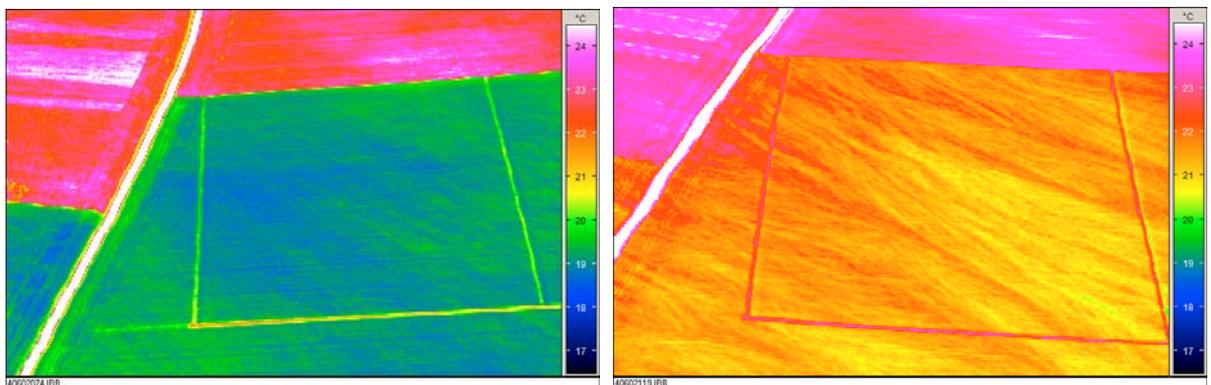


Abb. 39: Thermogramme eines Weizenbestands zu EC 57 ca. 20 Minuten vor (links) und ca. 20 Minuten nach (rechts) 2 mm Niederschlag innerhalb von 20 Minuten (Sorte Drifter, Klein Altendorf, 2004).

Beide Aufnahmen zeigen bei gleicher Skalierung die absoluten Bestandstemperaturen, woraus das gestiegene Temperaturniveau nach dem Niederschlag deutlich wird, zurückzuführen auf unterschiedliche Bewölkung. Die Durchschnittstemperatur vor dem Niederschlag betrug 19,1 °C mit einer Standardabweichung von 0,16. Nach dem Niederschlag lag die Durchschnittstemperatur bei 21,5 °C und die thermische Heterogenität der Fläche war auf eine Standardabweichung von 0,34 angestiegen.

3.5.4 Vergleich von lokaler Bestandstemperatur und Blattnässe

Die Blatttemperaturen vor und nach dem Niederschlag wurden in zwei GIS-Karte übertragen (Abb. 39), die die thermische Abweichung der einzelnen Zonen von der mittleren Bestandstemperatur darstellen.

Die Spanne der Abweichung betrug vor dem Niederschlag $-0,21$ bis $+0,21$ K und nach dem Niederschlag $-0,46$ bis $+0,50$ K. Entsprechend trat im zweiten Fall ein Temperaturgradient zwischen der oberen, linken und der unteren, rechten Feldecke auf, während der trockene Bestand kein vergleichbares Muster zeigte.

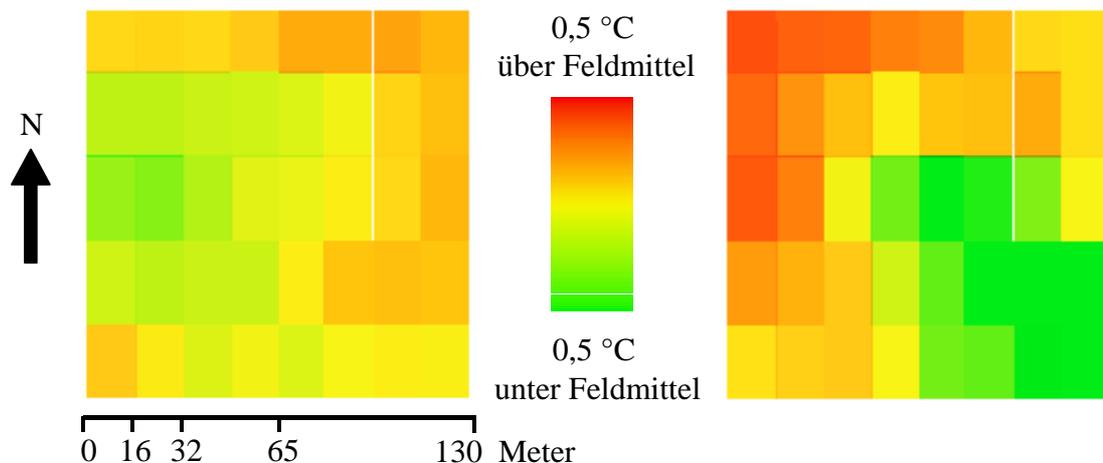


Abb. 40: Einfluss von 2 mm Niederschlag auf die zonale Bestandstemperatur, gemessen als Temperaturunterschied der Zonen zu der Durchschnittstemperatur des gesamten Weizenbestands zu EC 59, vorher (links) und nachher (rechts), (Sorte Drifter, Klein Altendorf, 2004).

Die Blattnässe erhöhte die kleinräumige Heterogenität der Bestandstemperatur, gemessen an den Temperaturspannen (Differenz zwischen dem wärmsten und kältesten Punkt innerhalb einer Zone). Im trockenen Bestand lag sie zwischen $0,43$ und $0,87$ K, und wurde durch die Blattnässe auf $0,87$ bis $1,49$ K erhöht (Abb. 41).

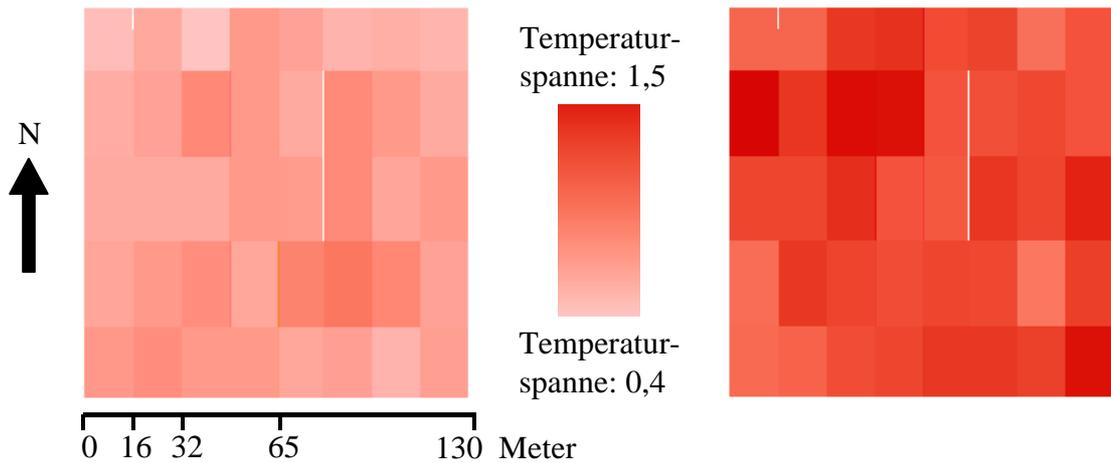


Abb. 41: Einfluss von 2 mm Niederschlag auf die Heterogenität der Bestandstemperatur in einem Weizenbestand zu EC 59, gemessen als Temperaturspanne in den Zonen, vor (links) und nach (rechts) Niederschlag, (Sorte Drifter, Klein Altendorf, 2004).

Nach dem Niederschlag wurden, auf einer einheitslosen Skala von 0 bis 100, Blattnässenwerte zwischen 3 und 91 gemessen, verglichen mit einem Wert von 0 für alle Sensoren vor dem Niederschlag. Die Überlagerung der Bestandstemperatur mit der Blattnässe zeigte eine hohe Übereinstimmung (Abb. 42): Sehr geringe Blattnässe wurde im Bereich der höchsten Bestandstemperatur gemessen. Blattnässewerte zwischen 24 und 91 traten entlang eines abfallenden Temperaturgradienten auf. Ein Wert von 73 trat in einem Bereich auf, der kälter war als der Bereich mit einem Wert von 3.

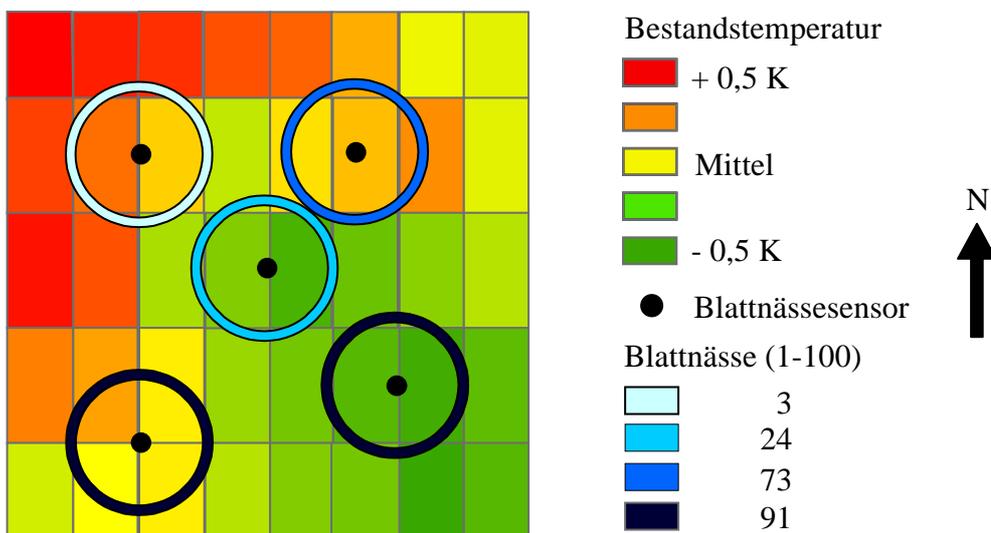


Abb. 42: Zonale Überlagerung von Bestandstemperatur und Blattnässewerten zu EC 59 nach einem Niederschlag von 2 mm, gemessen in einem Weizenbestand zu EC 59 (Sorte Drifter, Klein Altendorf, 2004).

3.6 Einfluss von Umweltfaktoren auf die Blatttemperatur

3.6.1 Weizen

3.6.1.1 Vergleich biotisch und abiotisch bedingter Blattschäden

Die Blatttemperatur wird durch die Transpiration der Blätter beeinflusst und unterliegt gleichzeitig dem Einfluss von einfallender Strahlungswärme. Veränderungen der Transpiration im Bereich biotisch oder abiotisch geschädigter Blattbereiche lässt eine Veränderung des thermischen Musters der Blätter, d.h. erhöhte Heterogenität, erwarten.

Symptomlose, vitale Weizenblätter zeigten ein Temperaturmuster mit einer Spanne von ca. 1,6 K. Die Temperaturzonen waren relativ groß und mit fließenden Übergängen (Abb. 43, links). Etwas fragmentierter, bei gleicher Temperaturspanne, waren die Blatttemperaturzonen in der zweiten Aufnahme (Abb. 43, rechts).

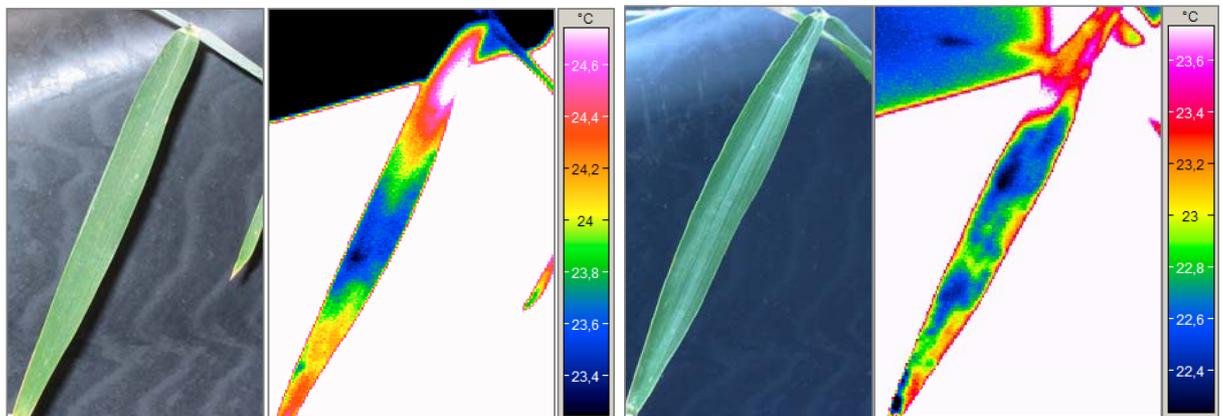


Abb. 43: Lichtbild und Thermogramm von zwei vitalen Weizenblättern, aufgenommen unter Gewächshausbedingungen (Sorte Ritmo, EC 83).

Die absolute Blatttemperatur wurde wesentlich durch die Sonneneinstrahlung bestimmt. So stieg die mittlere Blatttemperatur eines symptomlosen Weizenblattes innerhalb von 167 Sekunden von 23,7 über 25,5 auf 27,3 °C an (Abb. 44). Die Temperaturzonen blieben dabei ortskonstant, wie an dem kälteren Bereich in der Blattmitte zu erkennen ist. Während die Temperatur dieser kalten Zone relativ konstant blieb, erwärmten sich vormals warme Zonen verhältnismäßig stärker. Infolgedessen nahm die thermische Standardabweichung in der Messzone von 0,13 über 0,18 auf 0,24 zu.

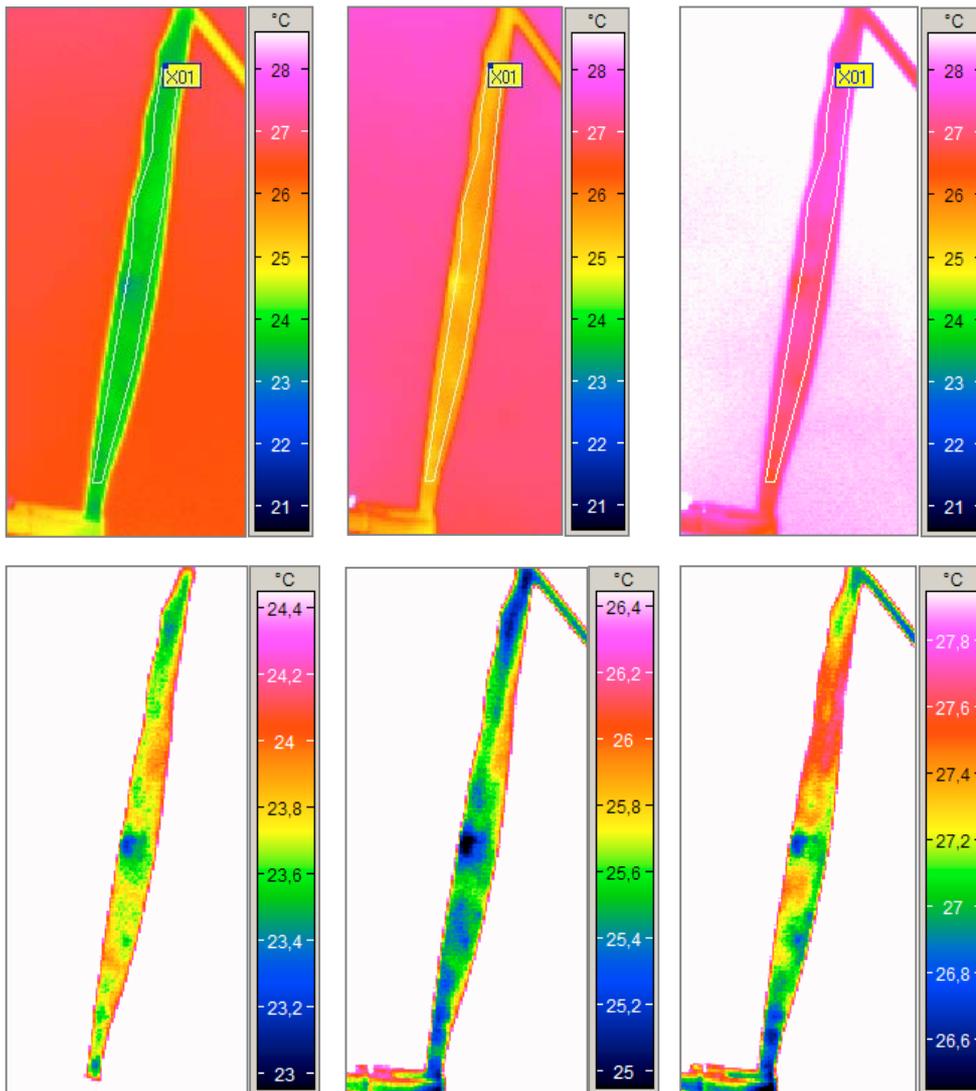


Abb. 44: Erwärmung eines symptomlosen Weizenblattes durch Sonneneinstrahlung mit Messzone (X01), aufgenommen unter Gewächshausbedingungen (Sorte Ritmo, EC 83). Oben: Darstellung mit konstanter Farbskalierung. Unten: Darstellung mit angepasster Farbskalierung.

Nekrotisches Blattgewebe war im Thermogramm deutlich als wärmere Zone zu erkennen. Trockene und grüne Blattbereiche unterschieden sich im Mittel um 0,9 K (Abb. 45). Beide erschienen als relativ homogene Temperaturbereiche, deren Konturen sich im Lichtbild wiederfinden ließen.

Symptome von Blattkrankheiten des Weizens führten teilweise zu thermografisch auffälligen Strukturen. Uredosporenlager von Braunrost auf einem lebenden Blatt waren unter kontrollierten Aufnahmebedingungen (20 °C, 45 % rel. Luftfeuchtigkeit) um bis zu 0,7 K kälter als umgebendes Blattgewebe. Die kalten Zonen waren dabei auf den Ort der Rostpustel begrenzt und wiesen relativ scharfe Ränder auf (Abb. 46). Die Zentren der Rostpusteln waren die kältesten Blattregionen. Auf dem gleichen Blatt traten aber auch um 0,4 K kältere Blattzonen auf, die keine Rostsymptome aufwiesen.

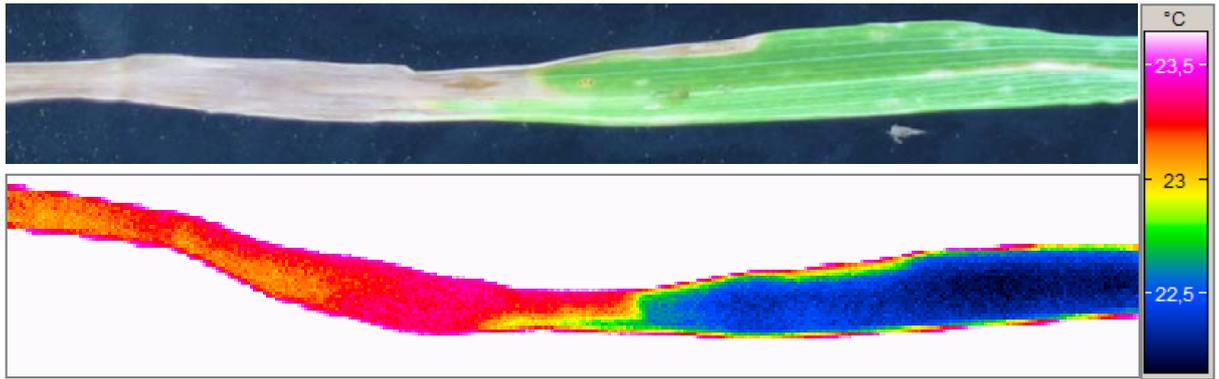


Abb. 45: Lichtbild und Thermogramm eines teilseneszenten Weizenblattes. Oben: Weizenblatt mit nekrotischem und vitalem Gewebe. Unten: entsprechendes Thermogramm, aufgenommen unter Gewächshausbedingungen (Sorte Ritmo, EC 83).

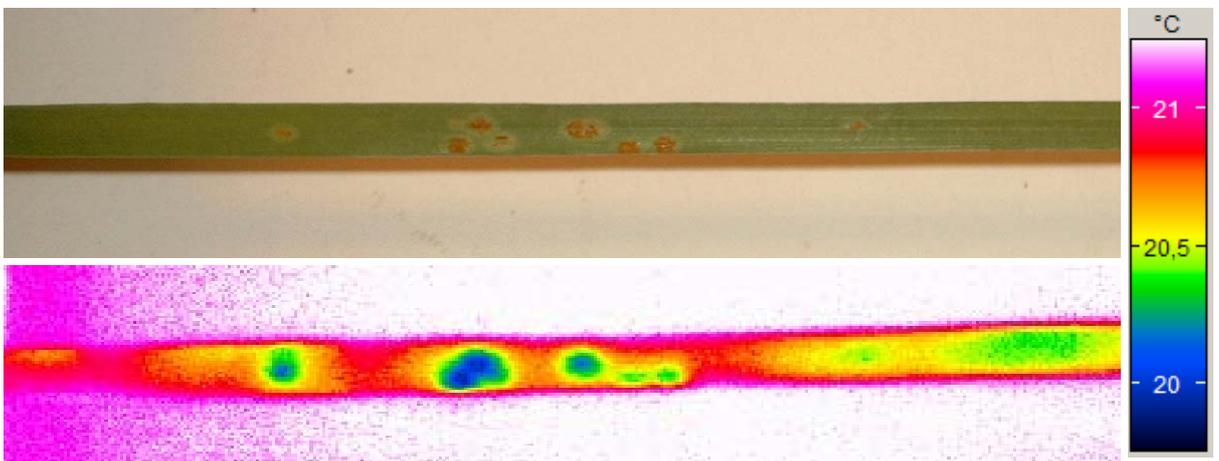


Abb. 46: Thermische Symptome von *Puccinia triticina* auf Weizen. Oben: Blatt mit Uredosporenlager im Lichtbild. Unten: Thermogramm desselben Blattes, aufgenommen unter Gewächshausbedingungen (Sommerweizen Sorte Munk, EC 34).

Die Blattseptoria des Weizens äussert sich durch seitlich scharf abgegrenzte, langgezogene Blattnekrosen. Im Thermogramm, aufgenommen unter unkontrollierten Bedingungen im Gewächshaus, sind diese nur äusserst schwach wiederzufinden (Abb. 47). Tendenziell erschienen sie wärmer als das gesunde Blattgewebe. Auf dem abgebildeten Blatt war nekrotisches Blattgewebe an der Blattspitze durch Seneszens und im unteren, mittleren Blattbereich typisch als Symptom von Blattseptoria zu finden. Thermografisch erschienen diese beiden Zonen sehr unterschiedlich: Die nekrotische Blattspitze war bis 0,7 K wärmer als angrenzendes, vitales Gewebe, während die Nekrosen durch Blattseptoria um maximal 0,1 K wärmer waren. Gesundes, grünes Blattgewebe war im mittleren Blattbereich und an der oberen, rechten Blattkante in Abb. 47 zu finden. Diese beiden Bereichen unterschieden sich in der Temperaturen um bis zu 1,2 K. Die Temperaturdifferenz zwischen nekrotischen und

vitalen Blattbereichen waren also geringer, als Temperaturunterschiede innerhalb symptomfreier Blattbereiche.

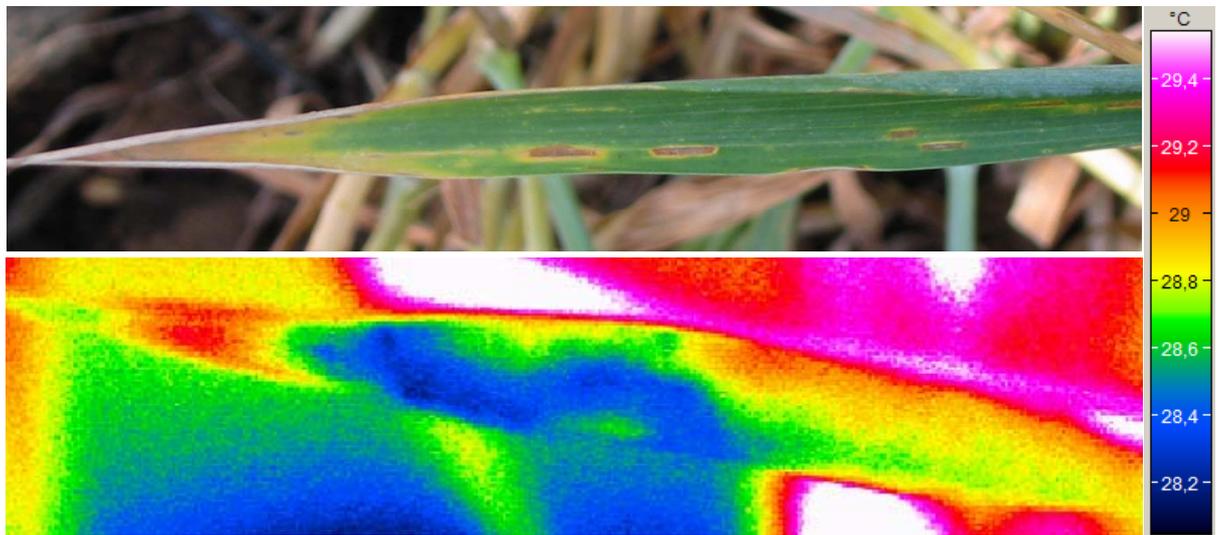


Abb. 47: Thermische Symptome von *Septoria tritici* an Weizen. Oben: Blatt mit Nekrosen und Pyknidien im Lichtbild. Unten: Thermogramm desselben Blattes, aufgenommen unter Gewächshausbedingungen (Sorte Ritmo, EC 83).

Einzelne Pusteln von Echtem Mehltau waren im Thermogramm als ca. 0,2 K kältere Zonen zu erkennen. Diese Zonen wiesen im Vergleich zu Braunrost (Abb. 46) kein besonders kaltes Zentrum auf (Abb. 48).

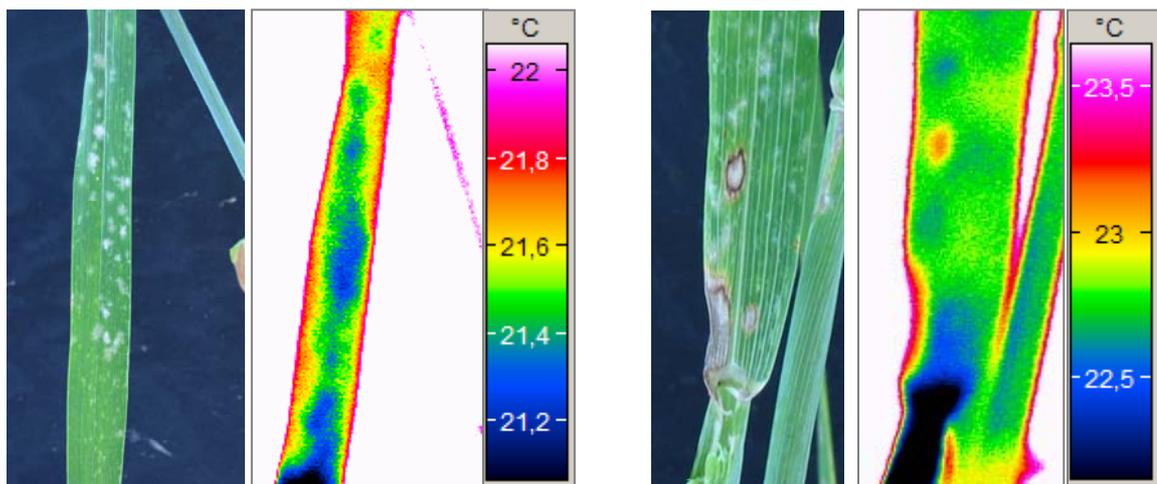


Abb. 48: Lichtbild und Thermogramm von Weizenblatt mit Mycelbelägen von *Blumeria graminis* (links) und nekrotischen Blattflecken (rechts) aufgenommen unter Gewächshausbedingungen (Sorte Ritmo, EC 83).

Verstreute, kleinere Pusteln des Echten Mehltaus, waren auf dem Blatt thermografisch nicht zu erkennen (Abb 49).

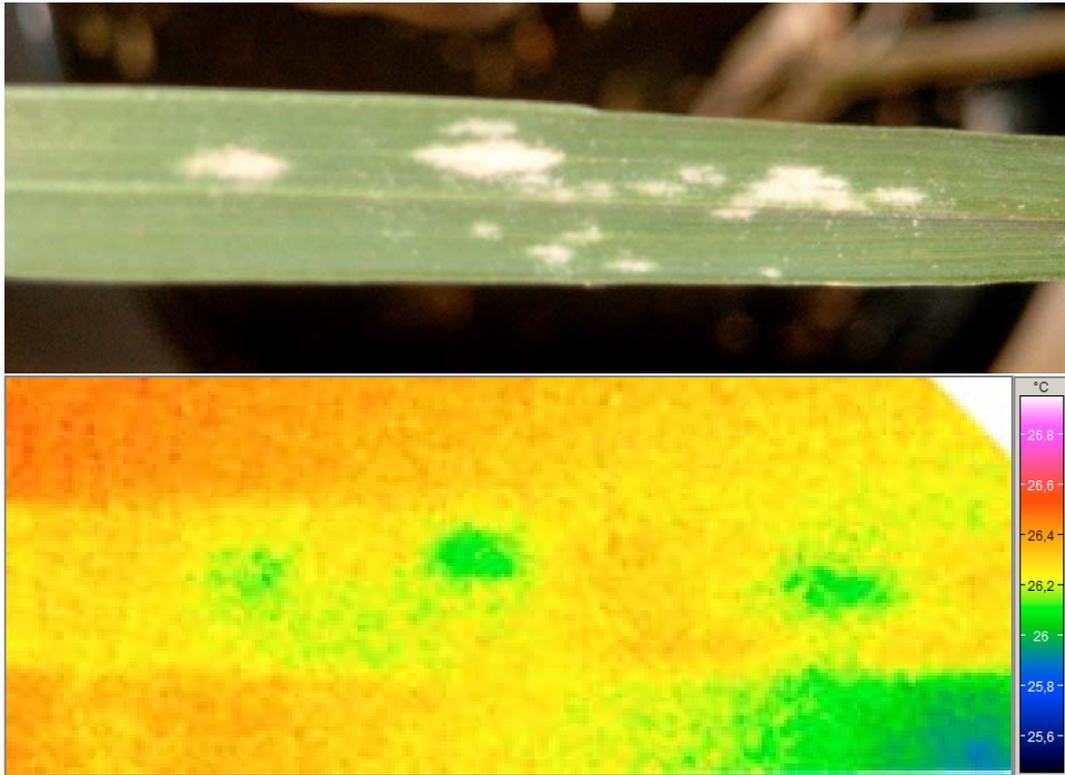


Abb. 49: Thermografische Symptome von *Blumeria graminis* an Weizen. Oben: Blatt mit Pusteln im Lichtbild. Unten: Thermogramm desselben Ausschnittes aufgenommen unter Gewächshausbedingungen (Sorte Ritmo, EC 83).

3.6.1.2 Pathogenese von Braunrost unter kontrollierten Bedingungen

Im Hinblick auf eine mögliche Früherkennung des Braunrostes an Weizen wurde die Pathogenese bis zur Bildung von Uredosporenlagern thermografisch beobachtet. Die Aufnahmen fanden unter kontrollierten Bedingungen bei einer Raumtemperatur zwischen 19,7 und 21,0 °C statt. Der Rostbefall an den drei inokulierten Pflanzengruppen lag nach 10 Tagen bei 15 %, 25 % bzw. 40 % befallener Blattfläche. Erste optische Symptome waren ab Tag 4 in Form von Chlorosen auf den inokulierten Blättern zu erkennen. Erste, noch geschlossene Sporenlager traten am siebten Tag auf. Am zehnten Tag zeigten sich sporulierende Rostpusteln auf den Blättern. Zur Vergleichbarkeit der fünf Termine wurde die Blatttemperatur der gesunden und inokulierten Pflanzen als Differenz zur Referenztemperatur erfasst. 4 Tage nach Inokulation traten bei den gesunden und inokulierten Pflanzen Variationsbreiten in der Blatttemperatur von $-1,6$ K bis $-3,4$ K, bzw. $-2,2$ K bis $-3,8$ K auf. Die erhebliche Variabilität zwischen den drei Wiederholungen ließ zu diesem Zeitpunkt auf keine signifikanten Temperaturunterschiede zwischen den Varianten schließen (Abb. 50). Bei deutlich geringerer Variationsbreite galt dies auch am nächsten Tag. Ab Tag 6 nach der Inokulation waren die Blätter der inokulierten Pflanzen durchgehend kälter als die gesunden Blätter (Abb. 50).

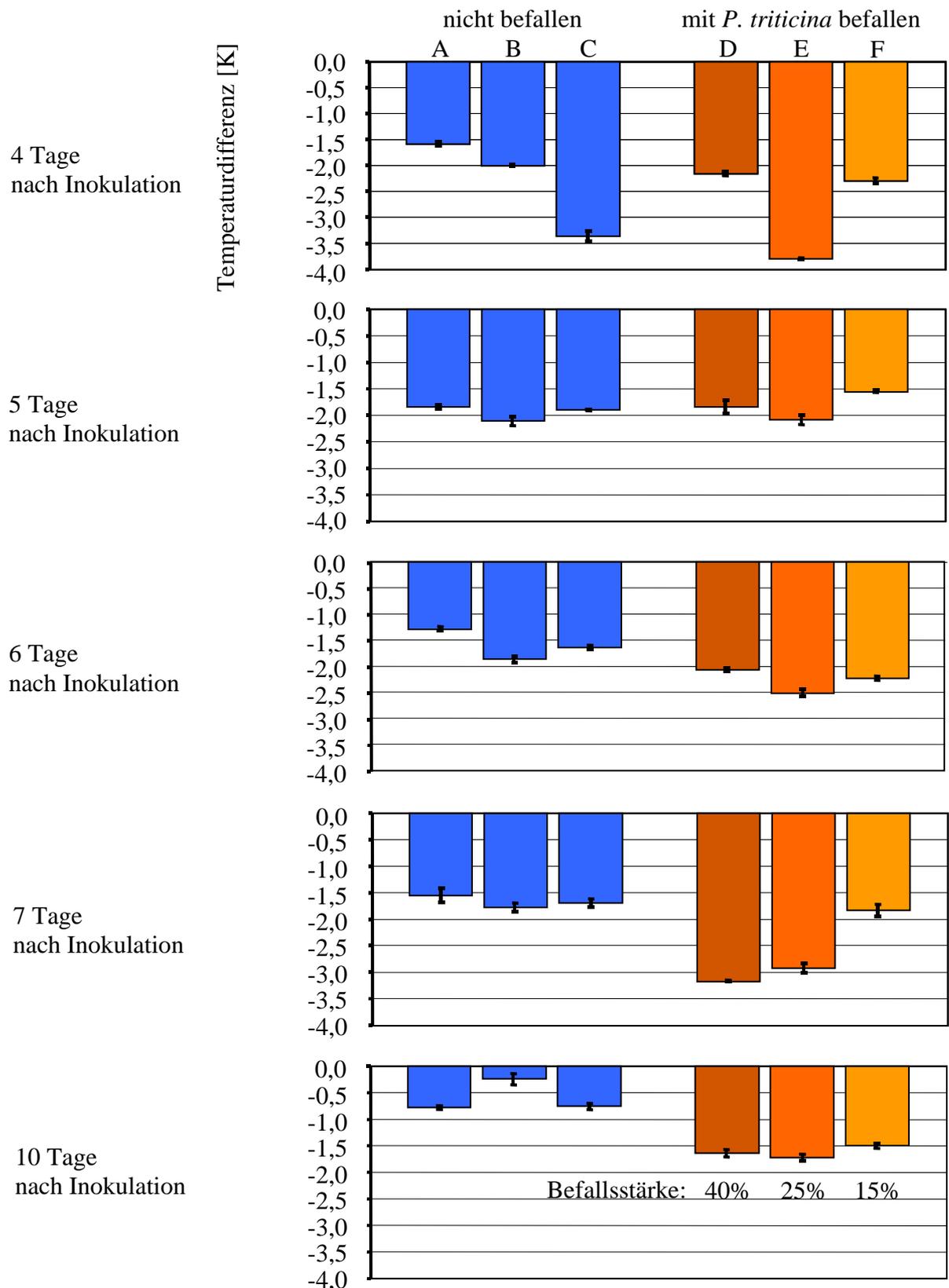


Abb. 50: Einfluss der Pathogenese von *Puccinia triticina* auf die Blatttemperatur 4, 5, 6, 7 und 10 Tage nach Inokulation.

Dies galt auch für den Vergleich der kältesten, gesunden mit der wärmsten, inokulierten Pflanzengruppe (Abb. 51). Dieser Vergleich stellt den ungünstigsten Vergleich für eine

Differenzierung von gesunden und erkrankten Pflanzen dar (bezüglich der Annahme: krank = kalt). Die Streuung der Abkühlung der drei inokulierten Pflanzengruppen konnte nicht durch die Unterschiede in der Befallsstärke erklärt werden, da die Standardabweichung der Blatttemperaturen der gesunden Pflanzen ab Tag 6 z.T. größer war, als die der inokulierten Pflanzen: Tag 6: 0,29 zu 0,23; Tag 7: 0,12 zu 0,71; Tag 10: 0,31 zu 0,11. Eine der Befallsstärke entsprechende Abkühlung (kälter bei höherer Befallsstärke) konnte nur am siebten Tag nach Inokulation festgestellt werden (Abb. 50).

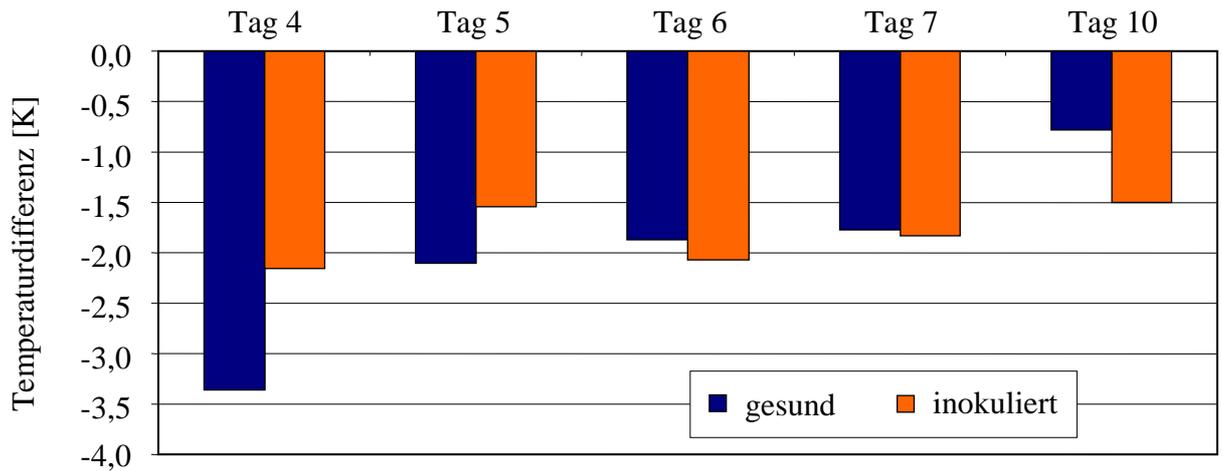


Abb. 51: Vergleich der Abkühlung der Blätter von gesunden und mit *P. triticina* inokulierten Weizenpflanze gegenüber der Umgebungstemperatur (Sommerweizen Sorte Munk). Dargestellt ist die kälteste von drei gesunden und die wärmste von drei inokulierten Pflanzengruppen.

3.6.1.3 Entwicklung von Blattkrankheiten im Freiland

Verteilung von Blattkrankheiten in einem heterogenen Weizenbestand

Der Winterweizenbestand am Standort Dikopshof, 2003 war durch eine scharfe Abgrenzung zweier Zonen unterschiedlicher Bestandsdichte geprägt (Abb. 52). Den beiden Zonen waren Unterschiede in den Befallsstärken der auftretenden Blattkrankheiten zuzuordnen.

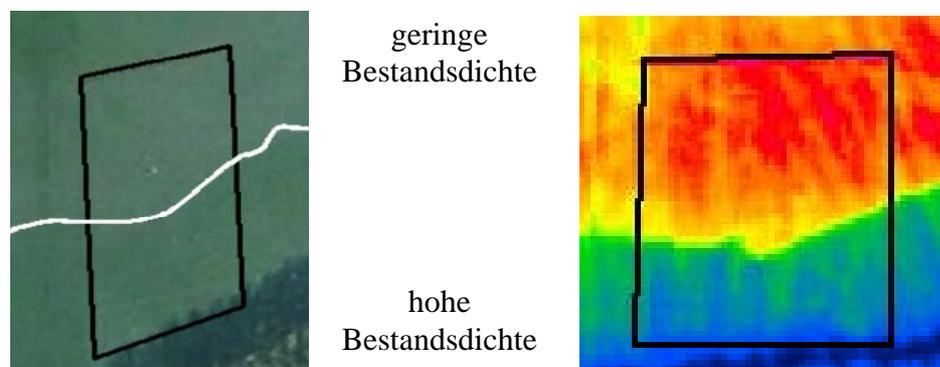


Abb. 52: Lichtbild (links) und Thermogramm (rechts) von einer Weizenparzelle zu EC 61/67. Der schwarze Rahmen kennzeichnet die Parzellengrenzen, eingezeichnet ist die Grenzen zwischen den Zonen mit unterschiedlicher Bestandsdichte. (Sorte Kanzler, Dikopshof, 2003).

Echter Mehltau, Blattseptoria und Braunrost traten auf den dargestellten Blattetagen lokal bis maximal 20, 23, bzw. 31 % befallener Blattfläche auf die höheren Befallsstärken durchgehend in der Zone hoher Bestandsdichte. Die Entwicklung der drei Blattkrankheiten wurde durch die beiden unterschiedlichen Bestandsdichten, infolge von Bodenunterschieden und der daraus resultierenden Wasserversorgung unterschiedlich stark beeinflusst. Mehltau trat ab EC 37 bis EC 75 mit deutlich unterschiedlicher Befallsstärke in den Bestandsdichtezonen auf, mit durchschnittlich 5 bis 15 % im dichten Bestand. Die Werte in der Zone mit geringer Bestandsdichte lagen weit darunter bei ca. 1 % (Abb. 53).

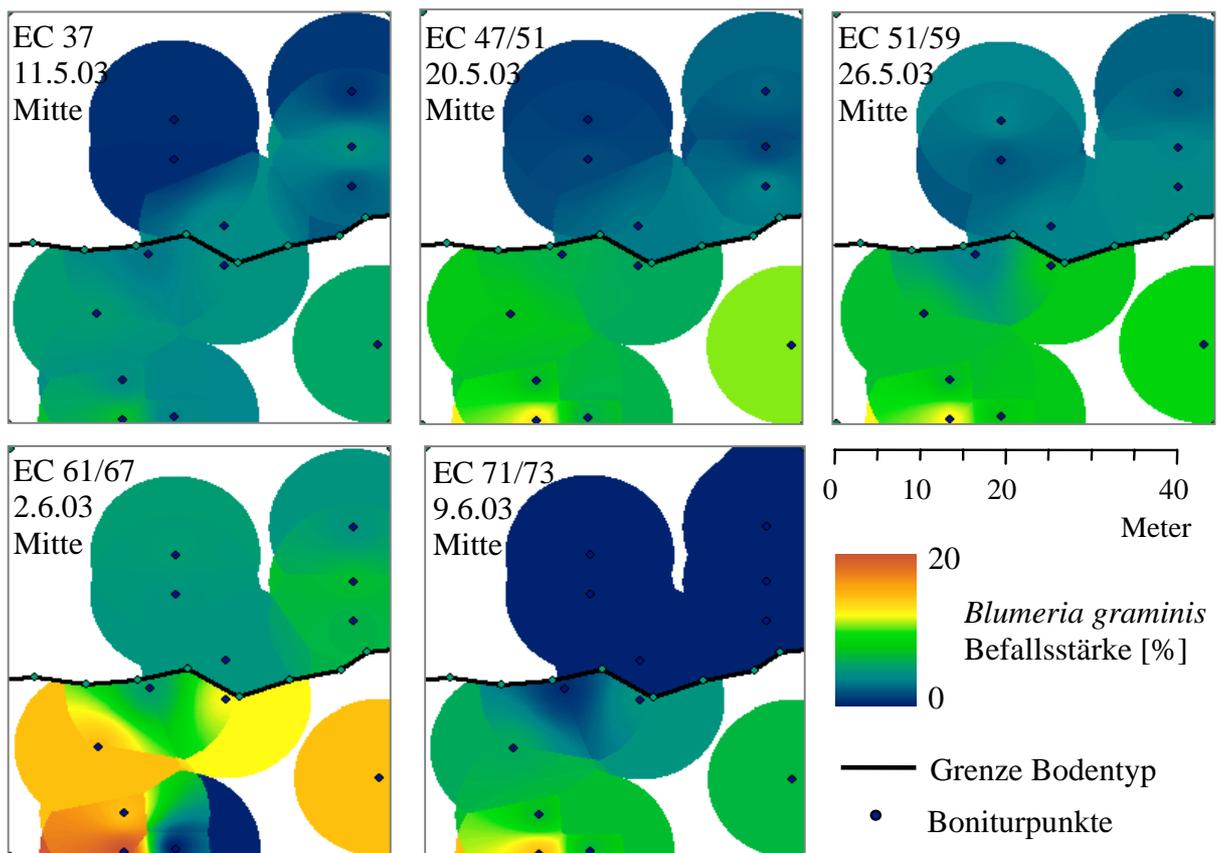


Abb. 53: Verlauf der Infektion mit *Blumeria graminis* in einem Weizenbestand in zwei Zonen unterschiedlicher Bestandsdichte. Dargestellt ist der Anteil befallener Blattfläche auf der mittleren Blattetage zu fünf Entwicklungsstadien (Sorte Kanzler, Dikopshof, 2003).

Blattseptoria trat vergleichsweise gleichmäßig in der gesamten Parzelle auf. Der größte Unterschied war zu EC 61/67 auf der mittleren Blattetage zu finden. Hier lag der Durchschnittsbefall in der dichten Zone wesentlich höher, allerdings bei einer geringen Befallsstärke von durchschnittlich 7,5 % (Abb. 54). Braunrostbefall entwickelte sich langsamer im Bestand, so dass Befallsunterschiede erst 14 Tage später zu EC 61/67 beobachtet wurden (Abb. 55). Die höchsten Durchschnittswerte betragen 14 % zu EC 61/67 und 20 % zu EC 71/73. Die Werte in der Zone mit geringer Bestandsdichte lagen ebenfalls weit darunter.

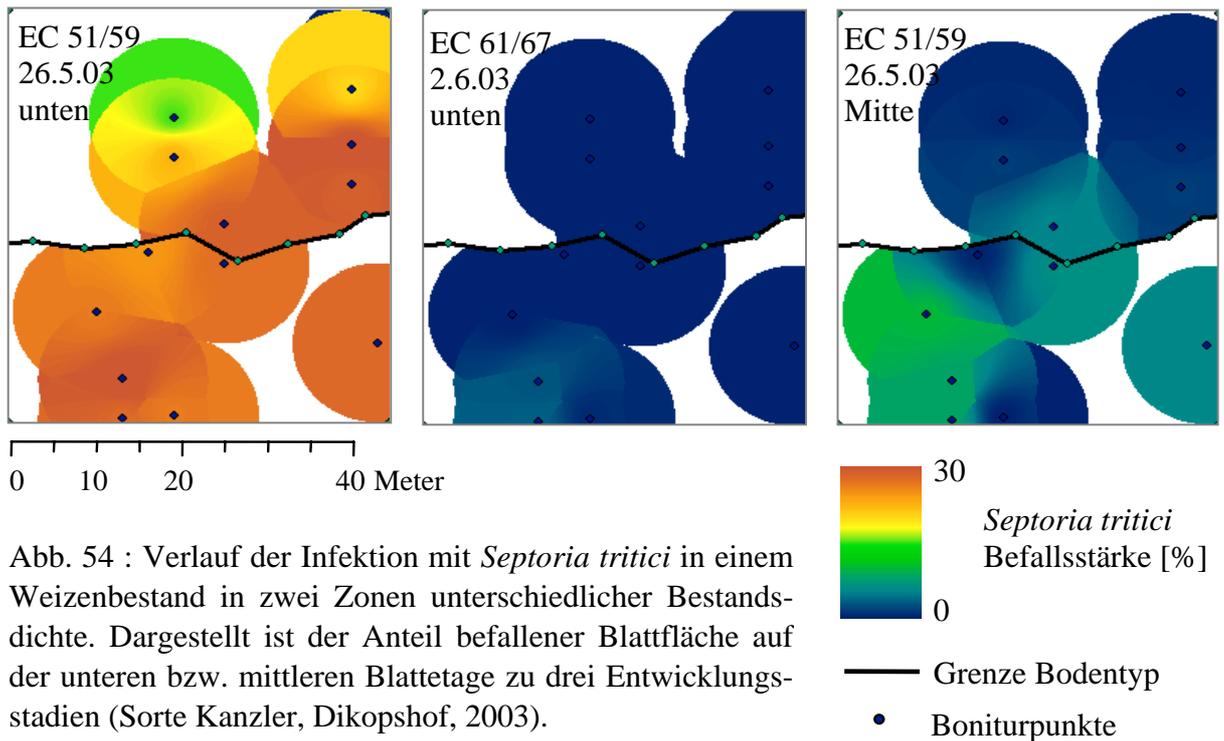


Abb. 54 : Verlauf der Infektion mit *Septoria tritici* in einem Weizenbestand in zwei Zonen unterschiedlicher Bestandsdichte. Dargestellt ist der Anteil befallener Blattfläche auf der unteren bzw. mittleren Blattetage zu drei Entwicklungsstadien (Sorte Kanzler, Dikopshof, 2003).

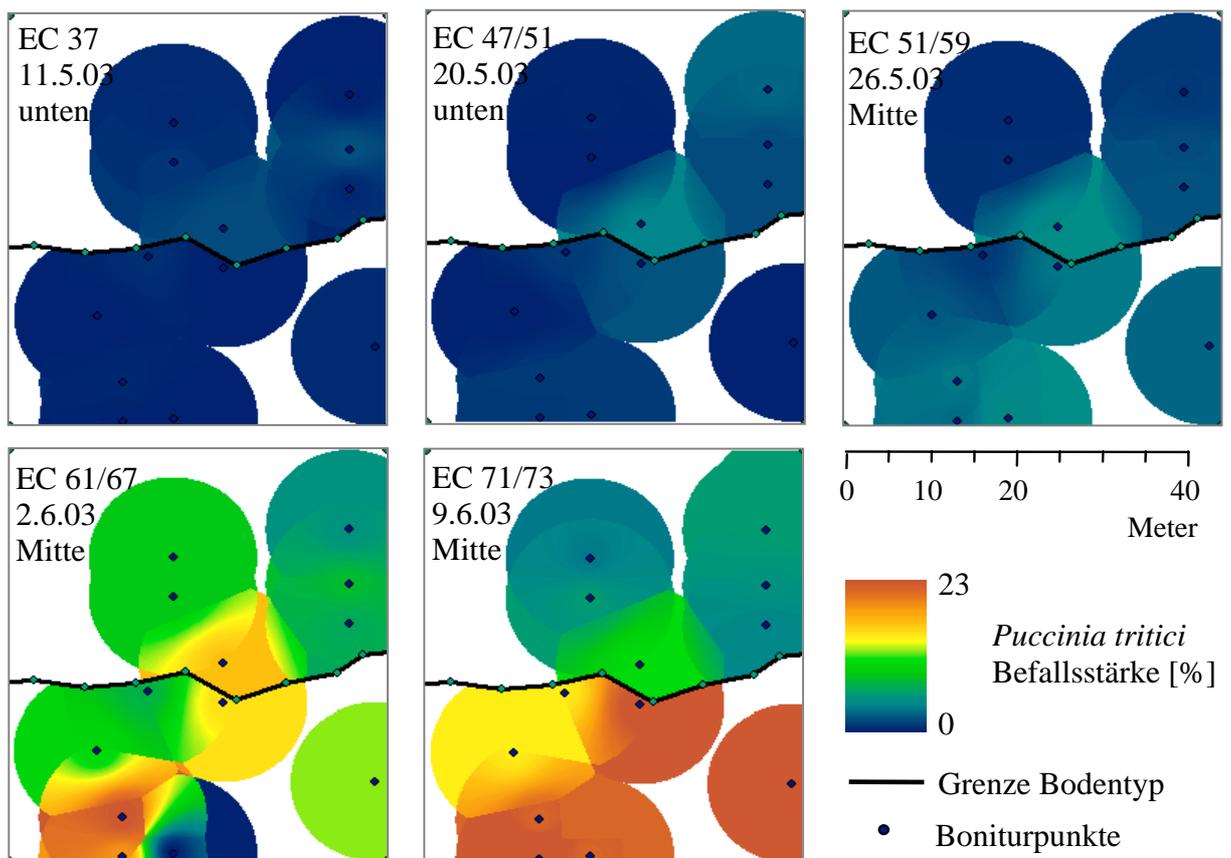


Abb. 55: Verlauf der Infektion mit *Puccinia triticina* in einem Weizenbestand in zwei Zonen unterschiedlicher Bestandsdichte. Dargestellt ist der Anteil befallener Blattfläche auf der unteren bzw. mittleren Blattetage zu fünf Entwicklungsstadien (Sorte Kanzler, Dikopshof, 2003).

Befallsstärke von Blattkrankheiten in Zonen unterschiedlicher Bestandstemperatur

Die Bestandstemperatur in der Parzelle ohne Fungizidbehandlung am Standort Klein Altendorf, 2004 wurde zonal mit der Befallsstärke von Blattkrankheiten, speziell *Septoria tritici* verglichen. Bewertet wurden zwei unbehandelte Zonen, eine mit Angrenzung an ein Zuckerrübenfeld und eine, die von Weizenbestand umgeben war (Abb. 56).

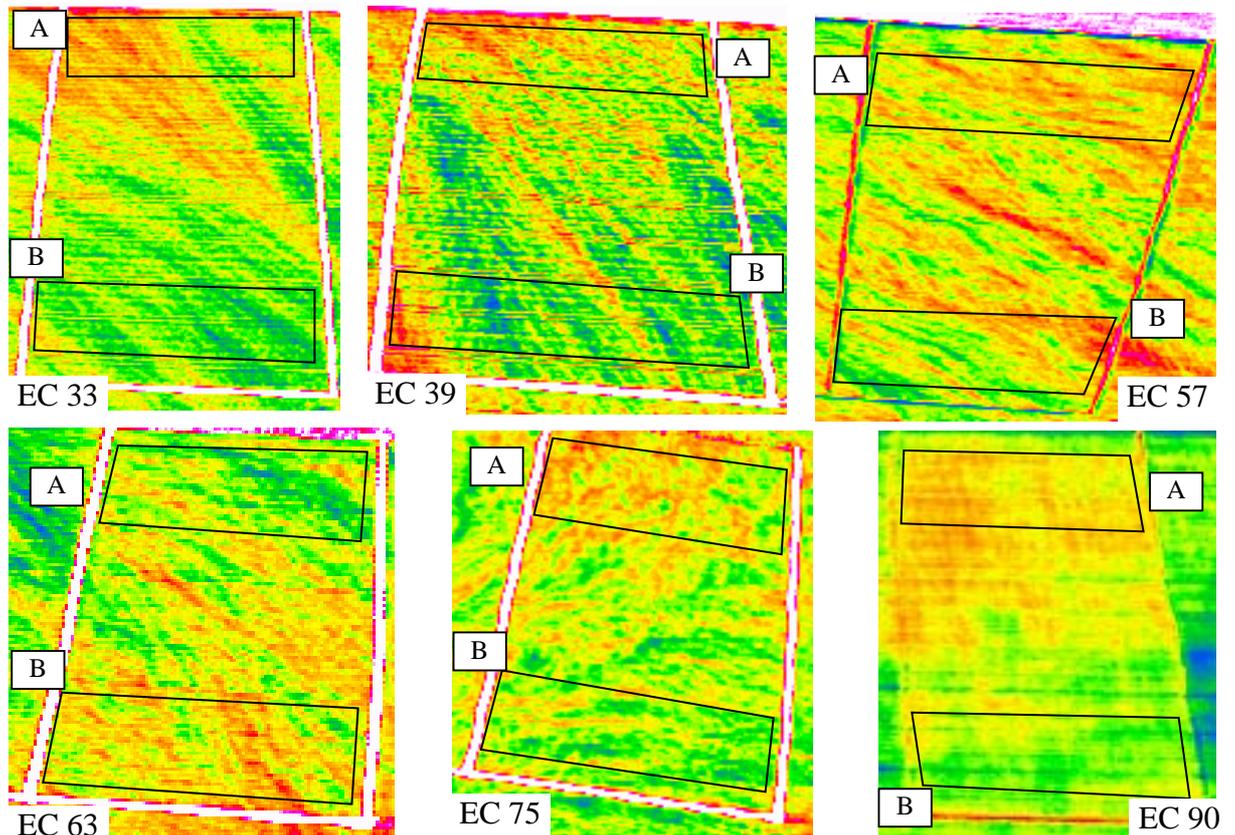


Abb. 56: Thermogramme des bonitierten Weizenbestandes zu EC 33 bis EC 90 (Sorte Drifter, Klein Altendorf, 2004; eingezeichnet sind die Zonen A und B, deren Bestandstemperatur und Befallsstärke verglichen wurden).

Eine weitere Zone lag im Fungizid behandelten Bestand. Mehltau und Braunrost traten nicht in relevantem Maße auf. Zu vier von fünf Aufnahmeterminen, von den Entwicklungsstadien EC 39 bis EC 90, lag die durchschnittliche Bestandstemperatur in der Zone A über der in Zone B (Abb. 57). Der Unterschied betrug zwischen 0,12 und 0,45 K, mit der Ausnahme zu EC 63 mit -0,31 K.

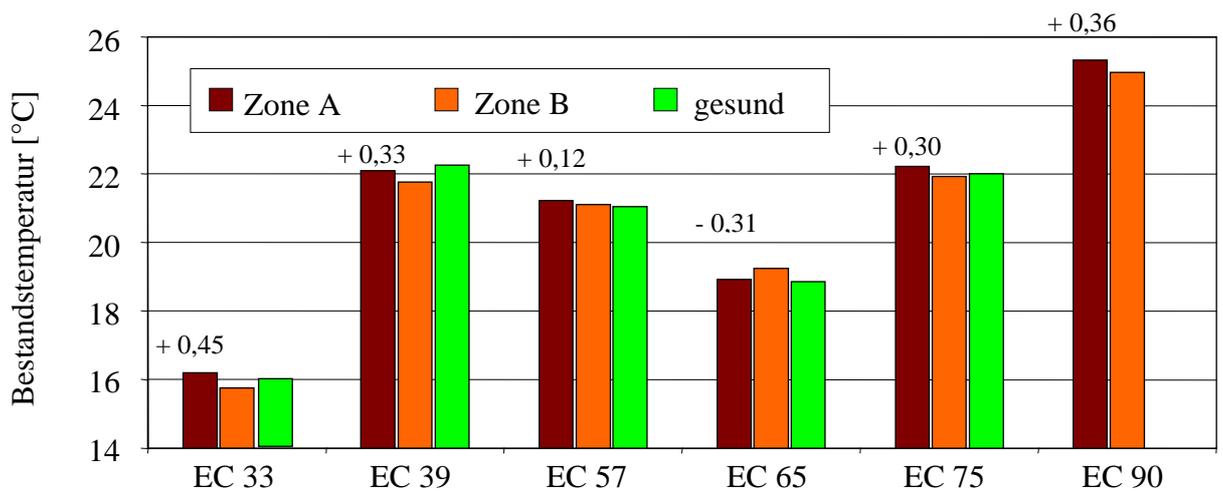


Abb. 57: Bestandstemperatur in zwei unbehandelten und einer gesund gehaltenen Zone in einem Weizenbestand zu EC 33 bis EC 75 (Sorte Drifter, Klein Altendorf, 2004; angegeben ist die Temperaturdifferenz zwischen den Zonen A und B).

Der Anteil befallener Blattfläche mit *Septoria tritici* für Zone A und B ist in Abb. 57 dargestellt. Die befallene Blattfläche stieg mit fortschreitender Bestandsentwicklung an, mit einem stärkeren Auftreten auf den niedrigeren Blattetagen. Ab EC 39 war der Befall in Zone B stärker als in Zone A, mit einem maximalen Unterschied von 5 % zu EC 57. Zu diesem Entwicklungsstadium war auch der Befall in dem gesamten Bestand am höchsten (Abb. 58).

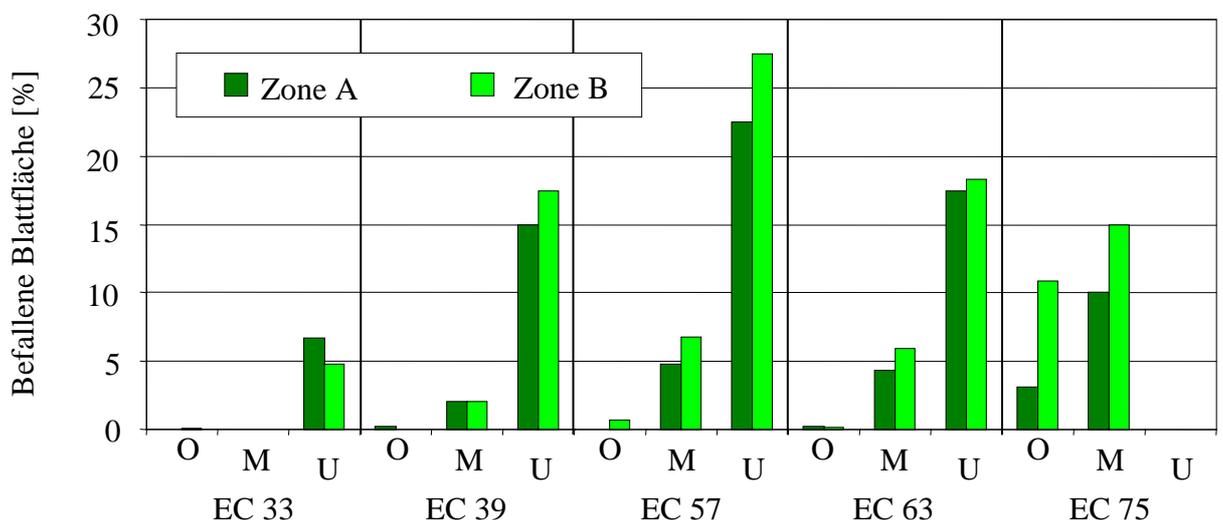


Abb. 58: Durch Blattseptoria nekrotisierte Blattfläche in zwei Zonen in einem Weizenbestand, unterteilt nach drei bonitierten Blattetagen (oben, Mitte, unten) zu EC 33 bis EC 75 (Sorte Drifter, Klein Altendorf, 2004).

Über den Zeitraum von EC 33 bis EC 75 betrachtet, traten in der kälteren Zone B stärkere Symptome von Blattseptoria auf als in der wärmeren Zone A. Vergleicht man die absoluten Daten zu den einzelnen Entwicklungsstadien in Abb. 57 und Abb. 58, so ließ sich kein

Zusammenhang zwischen der Entwicklung der Bestandstemperatur von einem Entwicklungsstadium zum nächsten und der parallelen Befallsentwicklung feststellen. Aus den Temperaturdifferenzen und den Befallsdifferenzen zwischen den Zonen A und B ließ sich kein Trend ableiten. Auch ließ sich durch eine Reduktion der vitalen Blattfläche in den befallenen Zonen keine Temperaturdifferenz zu einer gesund gehaltenen Zone erkennen.

Bestandstemperatur in Zonen unterschiedlicher Befallsstärke

Der Befall mit Blattkrankheiten (Abb. 59) und die Bestandstemperaturen (Abb. 61) auf zwei Großparzellen mit Winterweizen, mit (F+) und ohne Fungizideinsatz (F-) am Standort Dikopshof, 2004 (Abb. 60) wurden in jeweils zwei Zonen miteinander verglichen.

Vor EC 75 traten kaum Unterschiede im Krankheitsbefall zwischen der behandelten und der unbehandelten Parzelle auf. Der Befall mit Echtem Mehltau lag bei maximal 3 % befallener Blattfläche auf der mittleren Blattetage. Blattseptoria trat nur sehr vereinzelt auf. Braunrost war nicht zu finden. Zu EC 75 hatte sich der Braunrost stark entwickelt und trat ausschließlich in den unbehandelten Parzellen mit 9 und 19 % durchschnittlich befallener Blattfläche auf der oberen und mittleren Blattetage in Zone A bzw. B auf (Abb. 59).

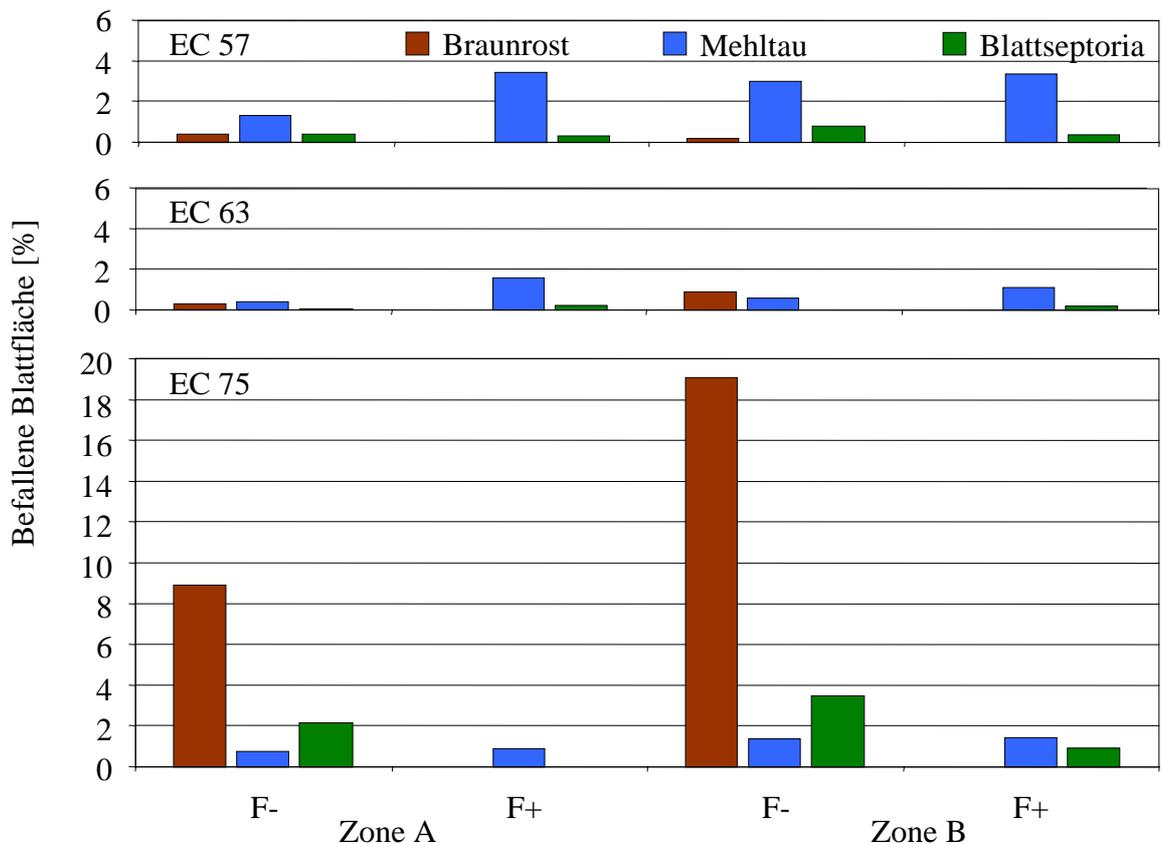


Abb. 59: Auftreten von Blattkrankheiten auf der oberen und mittleren Blattetage zu EC 57 (oben), EC63 (Mitte), EC 75 (unten), in einem mit Fungiziden behandelten und einem unbehandelten Weizenbestand, beide Bestände unterteilt in zwei Zonen A und B (Sorte Kanzler, Dikopshof, 2004).

Blattseptoria trat in geringem Maße in der unbehandelten Parzelle auf, mit 2,0 % in der Zone A und 3,8 % in B auf. Mehltau kam in allen Zone in etwa gleich geringer Befallsstärke von ca. 1,5 % vor. Die Bestandstemperaturen zwischen den Behandlungsvarianten unterschieden sich nur geringfügig. Die größte Differenz betrug +0,47 K für die behandelte Parzelle in Zone A zu EC 90. Zum gleichem Zeitpunkt war aber zwischen den Zonen B kein Unterschied zwischen behandelter und unbehandelter Parzelle zu messen (Differenz = -0,02 K).

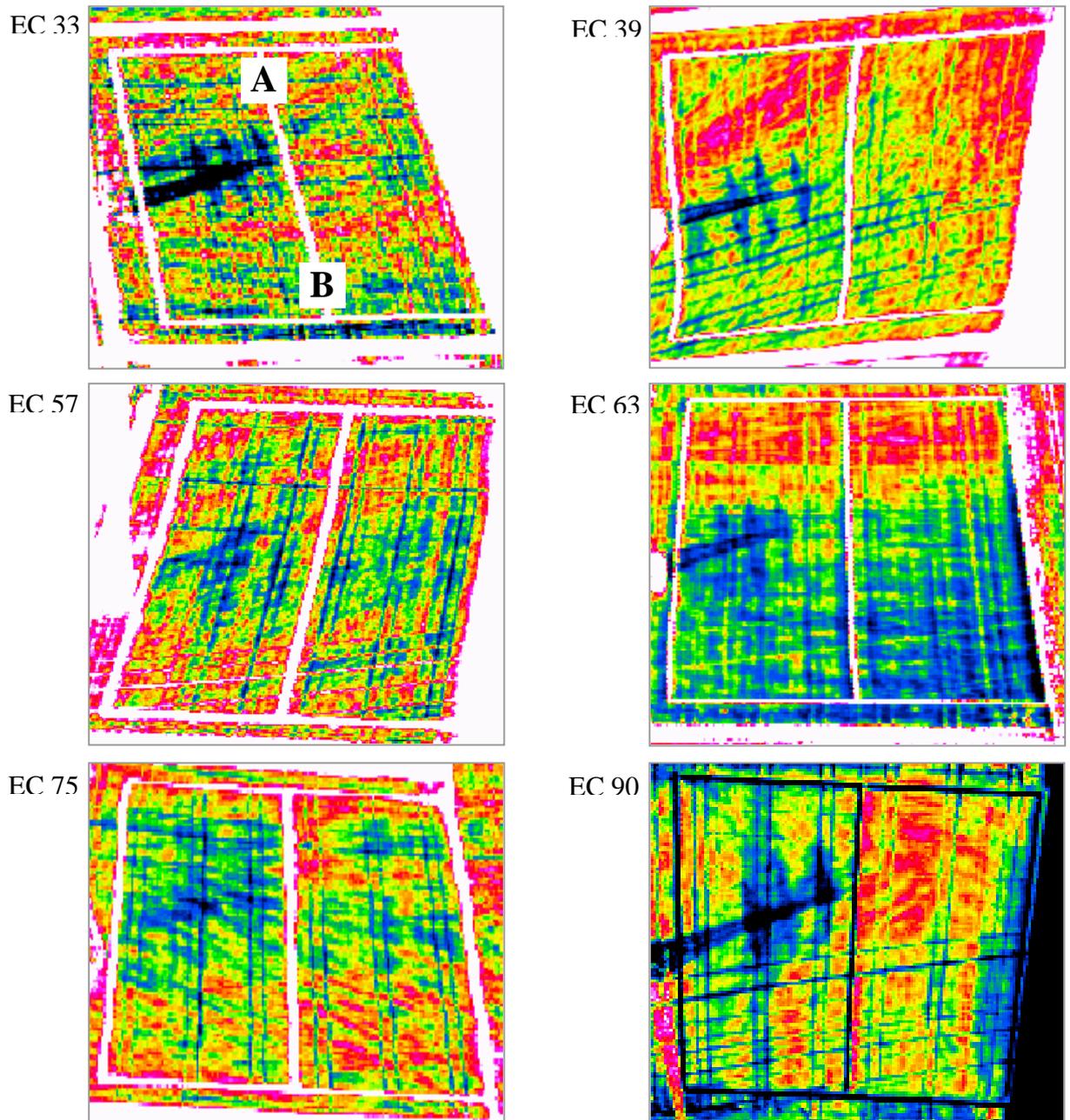


Abb. 60: Thermogramme von zwei Großparzellen mit Weizen zu sechs Termine von EC 33 bis EC 90. Linke Parzelle mit Fungiziden behandelt, rechte Parzelle unbehandelt (Sorte Kanzler, Standort Dikopshof, 2004).

Zu früheren Entwicklungsstadien waren die Temperaturunterschiede äußerst gering ($< 0,1$ K) und im Vergleich von Zone A und B nicht einheitlich. Die deutliche Zunahme des Braunrosts im Bestand von EC 63 zu EC 75 war anhand der Bestandstemperaturunterschiede nicht zu erkennen. Der Erwartung, dass ein gesunder Bestand durch den größeren Anteil an vitaler, d.h. transpirierender Blattfläche eine geringere Bestandstemperatur aufweist als ein Bestand mit Blatt nekrotisierenden Krankheiten, entsprachen die Messwerte nicht.

Größere Temperaturunterschiede als zwischen den Behandlungen traten zwischen den Zonen innerhalb der beiden Parzellen auf. Zu EC 37 und EC 63 hatte die Zone A in beiden Parzellen eine höhere Bestandstemperatur zwischen 0,29 und 0,98 K als Zone B. Zu den übrigen Entwicklungsstadien waren die Differenzen kleiner als 0,1 K. Das zeigt, dass sowohl in gesunden als auch in erkrankten Weizenbeständen zonale Unterschiede der Bestandstemperatur in gleicher Größenordnung auftreten, die größer sind als Temperaturunterschiede durch Krankheitsbefall (ohne Abb.)

Aus prognostischer Sicht lässt sich mit Bezug auf die Bestandstemperaturen von EC 37 bis EC 63 der grobe Trend festhalten, dass in der unbehandelten Zonen mit höherer Bestandstemperatur (A) ein geringerer Befall mit Braunrost und mit Blattseptoria auftrat.

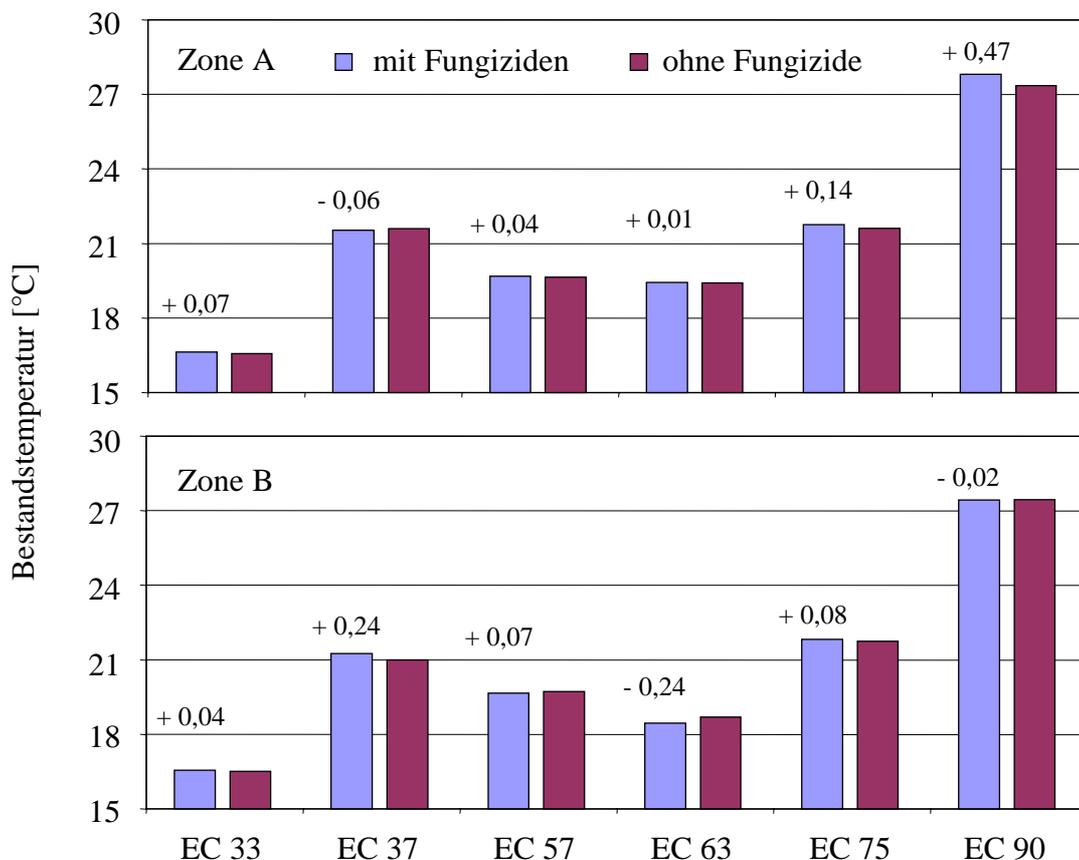


Abb. 61: Bestandstemperatur in zwei Parzellen mit (F+) und ohne Fungizidbehandlung (F-) in zwei Zone in einem Weizenbestand zu EC 33 bis EC 90 (Sorte Kanzler, Dikopshof, 2004; angegeben ist die Temperaturdifferenz zwischen den Varianten F+ und F-).

3.6.1.4 Einflüsse auf die Bestandstemperaturmessung

Einfluss von thermischer Einstrahlung auf die Bestandstemperatur unter kontrollierten Bedingungen

Die solare Einstrahlung ist der stärkste Temperatur bestimmende Faktor und wirkt sich weitgehend gleichmäßig auf einen Bestand aus, vorausgesetzt es besteht keine lokale Beschattung. Die Reaktion der Blattemperatur kann aber lokal unterschiedlich sein. Unter simulierten Freilandbedingungen traten in Abhängigkeit von der Tageszeit Schwankungen der Bestandstemperatur durch die Veränderung der Einstrahlungsintensität auf (Abb. 62).

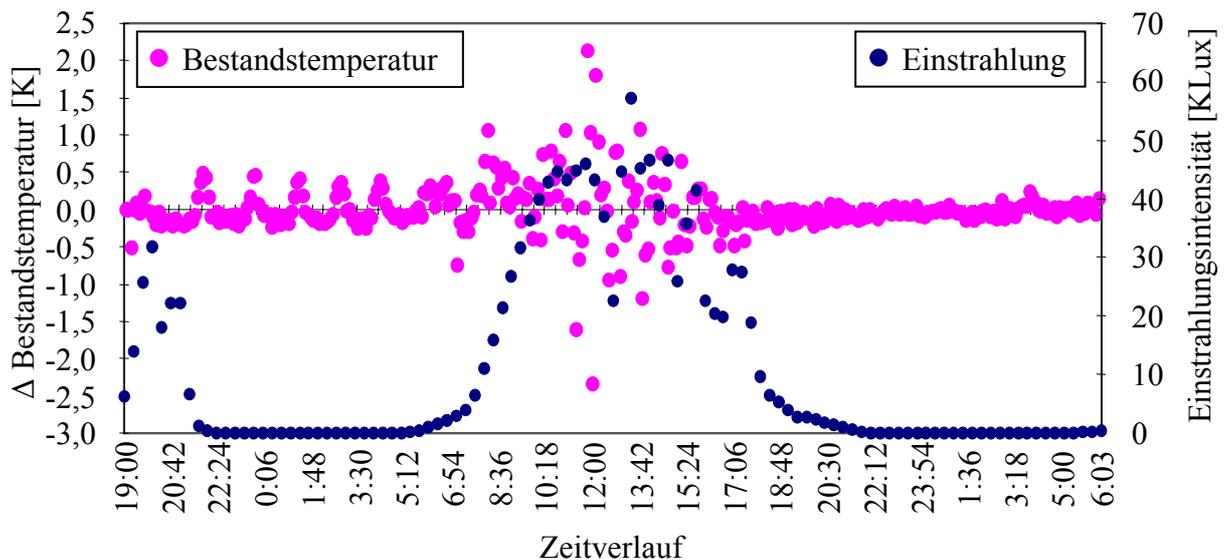


Abb. 62: Einfluss der Sonneneinstrahlung auf die Bestandstemperatur, simuliert an einem Weizenbestand im Gewächshaus und verglichen mit der Veränderung der Bestandstemperatur (Sommerweizen Sorte Munk).

Bei Dunkelheit, zwischen 21:30 bis 6:00 Uhr, lag der mittlere Einstrahlungswert bei 0,2 KLux. In diesem Zeitraum veränderte sich die Bestandstemperatur um maximal 0,50 K, bzw. im Messintervall von 6 Minuten um maximal 0,23 K. Die mittlere Bestandstemperatur betrug zu dieser Zeit 18,3 °C. Auch die Heterogenität der Bestandstemperatur veränderte sich ab 8:00 Uhr erheblich, abzulesen am sprunghaften Anstieg des Variationskoeffizienten von 3,4 auf 8,0 (Abb. 63). Die Temperaturdifferenz zwischen oberster und unterer Bestandsetage betrug zwischen 8:00 und 9:00 Uhr bis zu 10 K. Zwischen 10:00 und 15:00 Uhr, dem Zeitraum stärkster Einstrahlung, veränderte sich die Bestandstemperatur in 6 Minuten um bis zu +2,1 K und -2,4 K, bei einem Mittelwert von 25,5 °C. Im Tagesverlauf ging die thermische Heterogenität im Bestand bis Sonnenuntergang auf einen Variationskoeffizienten von 2,5 zurück. Dabei traten zwischen 9:00 und 14:00 Uhr einige starke, kurzfristige Sprünge auf, die den Wert des Variationskoeffizienten um bis zu 2,2 veränderten.

Der Zusammenhang von Lufttemperatur und Bestandstemperatur hatte bei einer Näherung mit einem Polynom fünften Grades ein Bestimmtheitsmaß von 0,71, bei durchgehend geringerer Bestandstemperatur (Abb. 64). Ab einer Lufttemperatur von ca. 21 °C entfernte sich der Zusammenhang von einem linearen Trend und stieg überproportional an.

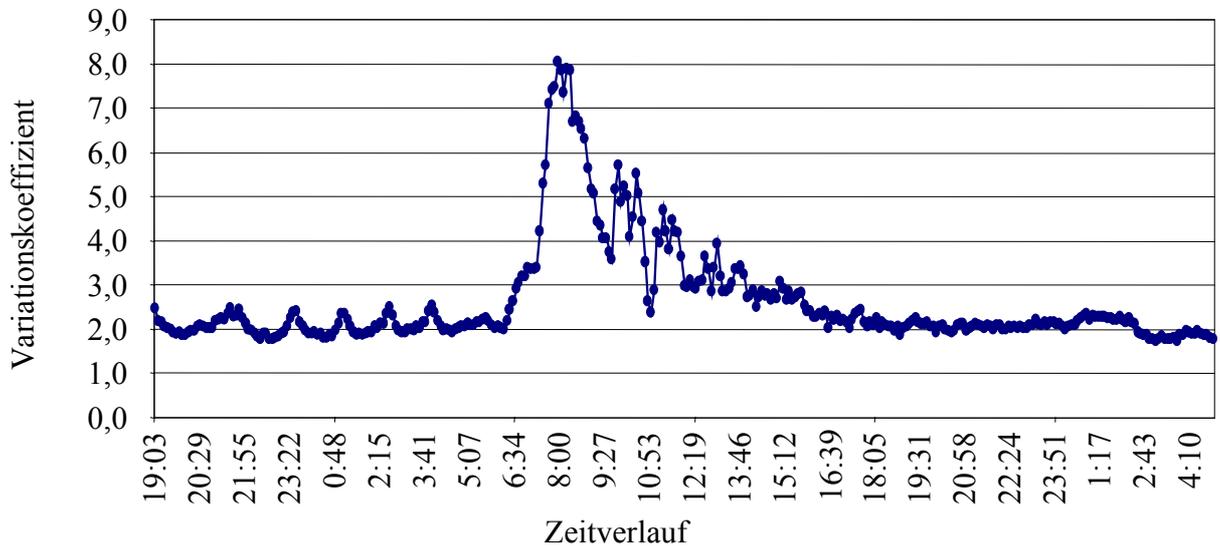


Abb. 63: Veränderung der thermischen Heterogenität eines Weizenbestandes im Tagesverlauf unter kontrollierten Bedingungen.

Die Bestandstemperaturen wiesen bei gegebenen Lufttemperaturen eine Spanne von bis zu 2,5 K auf. Ein Schluss von der Lufttemperatur auf die Bestandstemperatur war daher kaum möglich. Die Variation war über den gesamten Lufttemperaturbereich von 19,3 bis 24,8 °C weitgehend konstant.

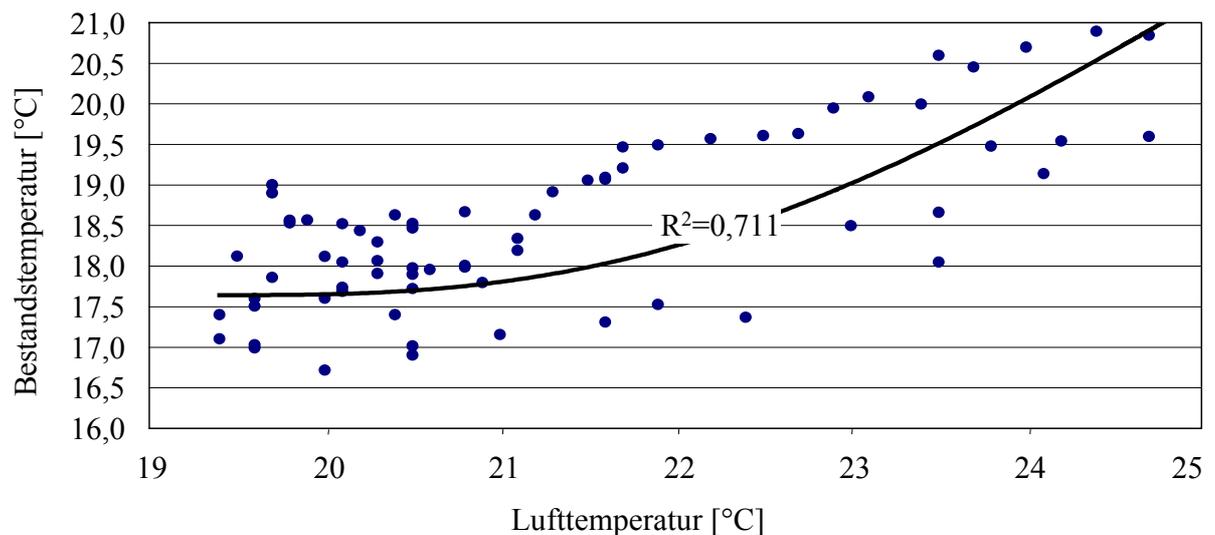


Abb. 64: Zusammenhang von Lufttemperatur und Bestandstemperatur in bzw. von einem Weizenbestand unter kontrollierten Bedingungen.

Einfluss von thermischer Einstrahlung auf die Bestandstemperatur im Freiland

Kurzfristige Veränderungen der Bestandstemperatur waren auch im Freiland zu beobachten (Abb. 65). Innerhalb von 50 Sekunden stieg die Bestandstemperatur am Standort Dikopshof am 2. Mai 2003 gegen 18:19 Uhr um 1,7 K. Mit der Temperatur stieg auch die Standardabweichung von 0,18 auf 0,43 und die Temperaturspanne von 1,46 auf 3,16 K, gemessen in der gesamten Spur.

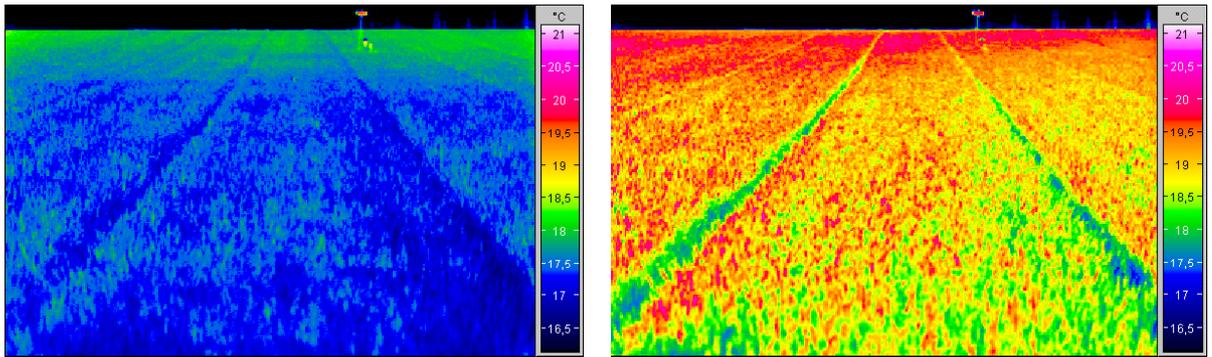


Abb. 65: Thermogramme eines Ausschnitts von einem Weizenbestand (Sorte Kanzler, Dikopshof, 2003). Links: 18:18:49. Rechts: 18:19:31.

Gleiches war auch aus der Vogelperspektive zu beobachten. Kurzfristige Veränderungen der Intensität der einfallenden Sonnenstrahlung führten zu kurzfristigen Verschiebungen des Niveaus der Bestandstemperatur. Zwischen den beiden Aufnahmen in Abb. 66 lagen 40 Sekunden, innerhalb derer sich die durchschnittliche Bestandstemperatur um $-0,6$ K auf $19,1$ °C verringerte, während die thermische Heterogenität des Bestandes fast unverändert blieb; die Standardabweichung betrug 0,16 bzw. 0,17. Auf die Ausdehnung von Temperaturzonen hatte die Verschiebung des Temperaturniveaus ebenfalls keinen Einfluss.

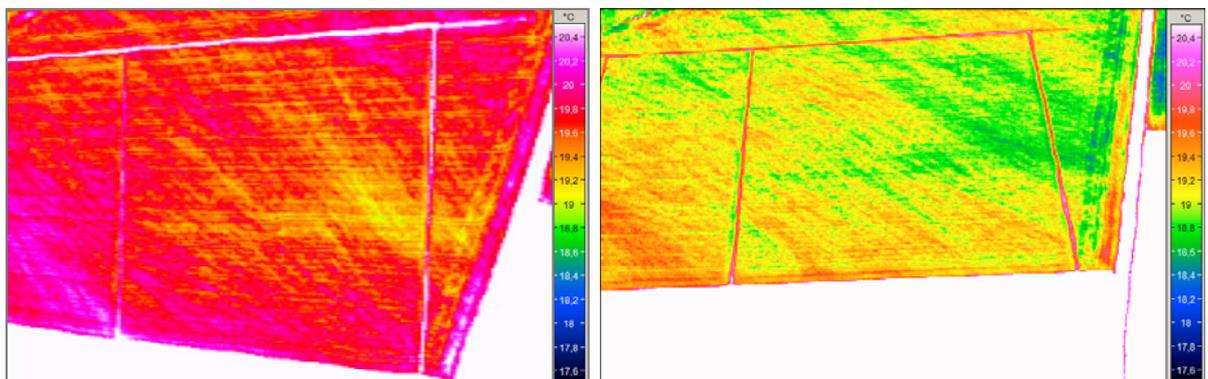


Abb. 66: Kurzfristige Veränderung der Bestandstemperatur eines Weizenbestands zu EC 59, aufgenommen im Abstand von 40 Sekunden (Sorte Drifter, Klein Altendorf, 2004; Darstellung mit gleicher Skalierung, Temperaturniveau $19,0$ °C, dargestellter Temperaturbereich 3,0 K).

Zu den Stadien EC 33 bis EC 63 trat eine thermische Strukturierung des Bestandes auf, die in allen Aufnahmen unabhängig von der Aufnahmerichtung in Streifen parallel zur West-Ost-Achse verlief (Abb. 67).

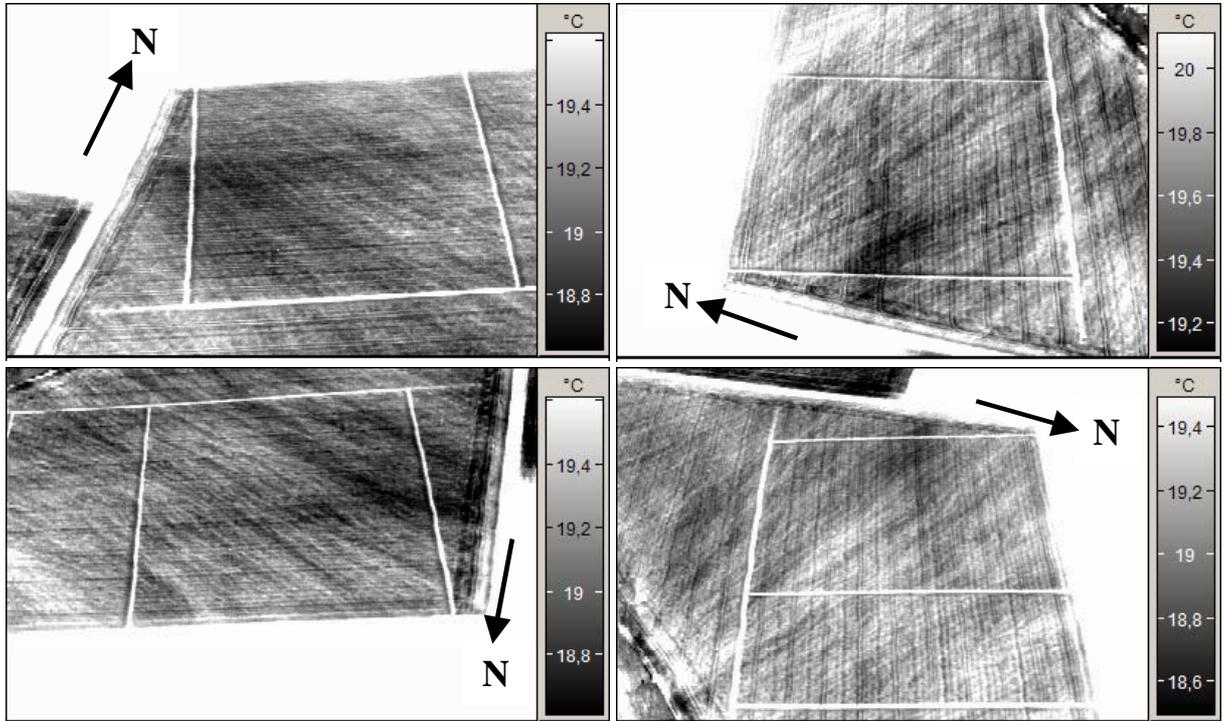


Abb. 67: Thermogramme eines Weizenbestandes zu EC 59, aufgenommen aus vier Richtungen innerhalb von 3 Minuten (Sorte Drifter, Klein Altendorf, 2004).

Die richtungsgebundene Heterogenität der Bestandstemperatur ließ sich durch den Vergleich von parallel und quer zu dem Streifenmuster verlaufenden Temperaturprofilen ausdrücken (Abb. 68).

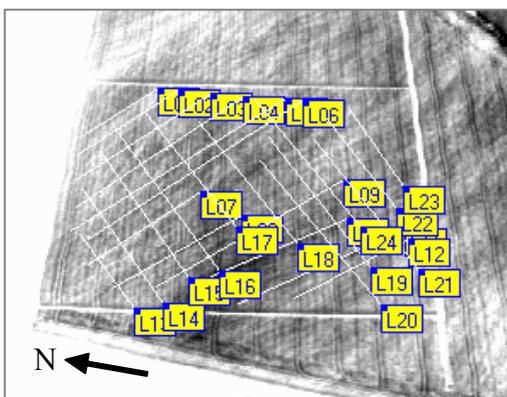


Abb. 68: Bemessung der thermischen Streifenstruktur durch parallel und quer verlaufende Messlinien.

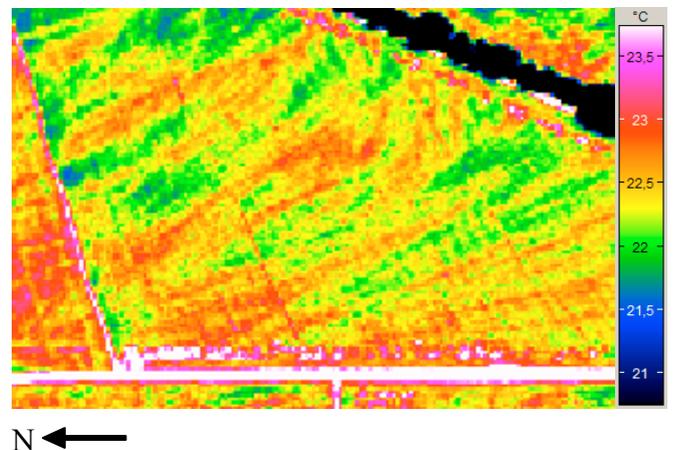


Abb. 69: Thermogramm der Fläche Klein Altendorf vom 13.6.2003, Zuckerrübenbestand.

Die Summe der Temperaturveränderungen, von Pixel zu Pixel entlang von zwölf Linien gleicher Ausrichtung, zeigte einen signifikant größeren Unterschied ($p=0,05$) in den quer zu den Strukturen verlaufenden Profilen, als in den parallel verlaufenden. Ein thermisches Muster gleicher Ausrichtung trat auf dieser Fläche auch im Vorjahr im Anbau von Zuckerrüben auf (Abb. 69).

3.6.2 Thermografische Untersuchungen an Bohne

3.6.2.1 Temperaturmuster durch abiotische Faktoren

Die thermografische Erkennung von Braunrost an Weizen wurde durch die starke Fragmentierung der Blattfläche der Weizenpflanzen erschwert. Um die Symptome von Rostpilzen auf großflächigen Blättern thermografisch beobachten zu können, wurde Bohne der Sorte Saxa mit *Uromyces appendiculatus*, dem Erreger des Bohnenrostes aus der gleichen Familie (Pucciniaceae) wie der Braunrost des Weizens infiziert.

Bei der thermografischen Untersuchung von Bohnenblättern wurden verschiedene thermische Musterungen beobachtet, die sich aus Zonen unterschiedlicher Größe und Form mit verschiedenen Temperaturunterschieden zusammensetzten.

An zwei gesunden Blättern traten unter gleichen Umgebungsbedingungen unterschiedliche Temperaturmuster auf (Abb. 70). Beide Blätter waren gleich alt, gesund und wiesen keine mechanischen Schäden auf. Die mittlere Blatttemperatur beider Blätter war ca. 1,4 K kälter als die Umgebung, was auf transpiratorische Aktivität schließen ließ.

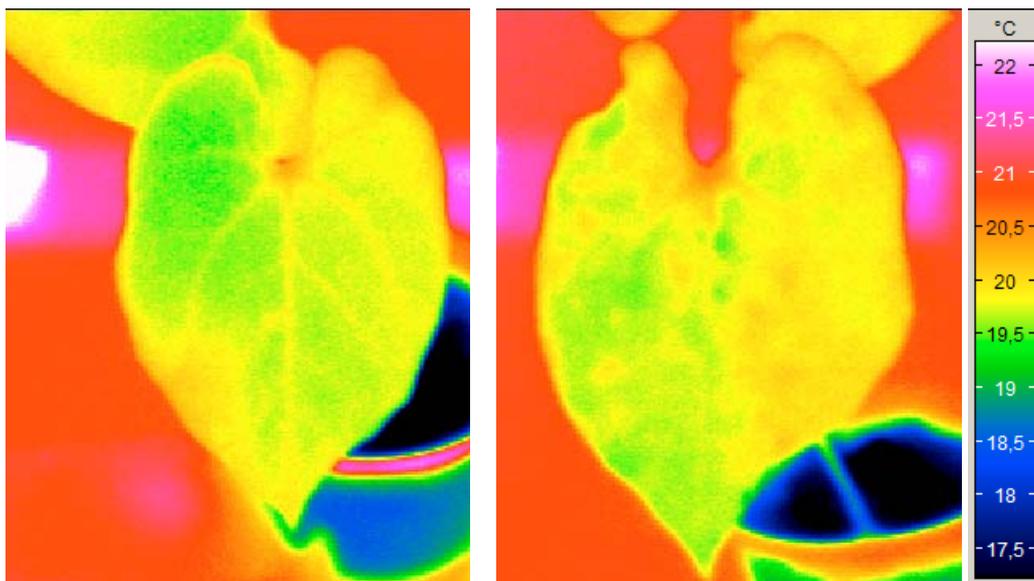


Abb. 70: Unterschiede in der thermischen Zonierung von Bohnenblättern. Links: geschlossener Umriss isothermischer Zonen. Rechts: hoher Fragmentierungsgrad isothermischer Zonen; (aufgenommen unter konstanten Messbedingungen).

Die Blattemperatur lag bei 19,73 und 19,82 °C bei gleicher Standardabweichung von 0,13. Die Temperaturextrema waren für beide Blätter ebenfalls sehr ähnlich: Minimum 19,37 und 19,46 °C, Maximum 20,24 und 20,34 °C. Unterschiedlich war die Verteilung der Temperaturzonen auf der Blattfläche.

Die Blattemperatur unterlag während der Aufnahmeserien kurzfristigen Veränderungen, die durch die Umgebungsbedingungen verursacht wurden. Um die Aufnahmebedingungen konstant zu halten, wurden äußere Einflüsse, wie Wärmestrahlung und Luftzug, mit Pappe abgeschirmt. Dadurch wurden die Blätter beschattet und kühlten sich um 0,3 K in 2 Minuten ab (Abb. 71). Die Zonen unterschiedlicher Blattemperatur blieben dabei erhalten.

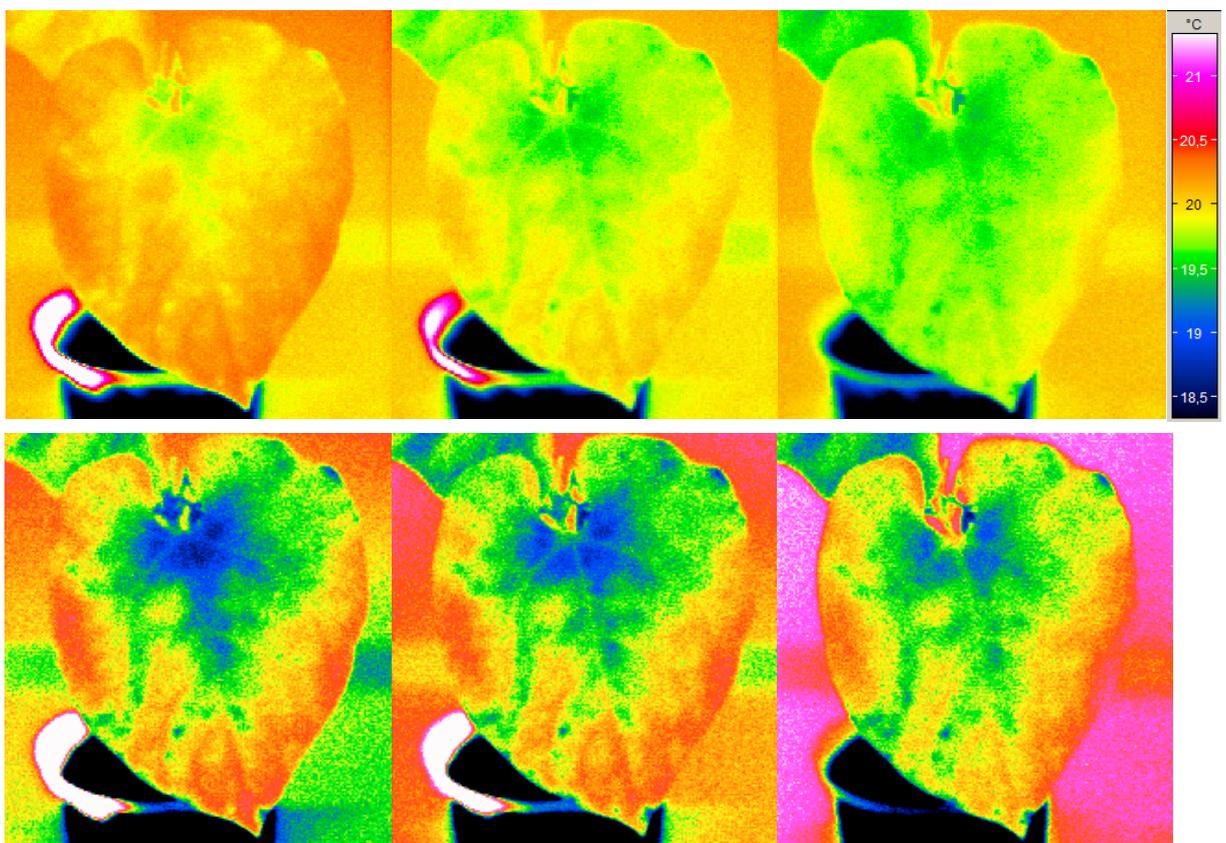


Abb. 71: Abkühlung eines Bohnenblattes nach 20, bzw. 148 Sekunden nach Platzierung in der Aufnahmekammer. Oben: Darstellung mit konstanter Temperaturskala. Unten: Farbskala an die Temperaturspanne in den Thermogrammen angepasst; (aufgenommen unter konstanten Messbedingungen).

Durch Exposition des Blattes zur Sonneneinstrahlung mit partieller Beschattung trat eine Veränderung des thermischen Musters auf (Abb. 72), die das Muster des Blattes überlagerte. Anfänglich betrug die Temperaturdifferenz zwischen der oberen kalten und der unteren warmen Zone 3,05 K. Nach Beschattung sank sie innerhalb von 109 Sekunden um 0,67 K. Anfänglich trat zwischen dem bestrahlten und beschatteten Bereich eine scharf gezogene

Grenze auf. Sie verblasste im Verlauf der Abkühlung, ebenso wie die thermische Ausprägung der Blattadern.

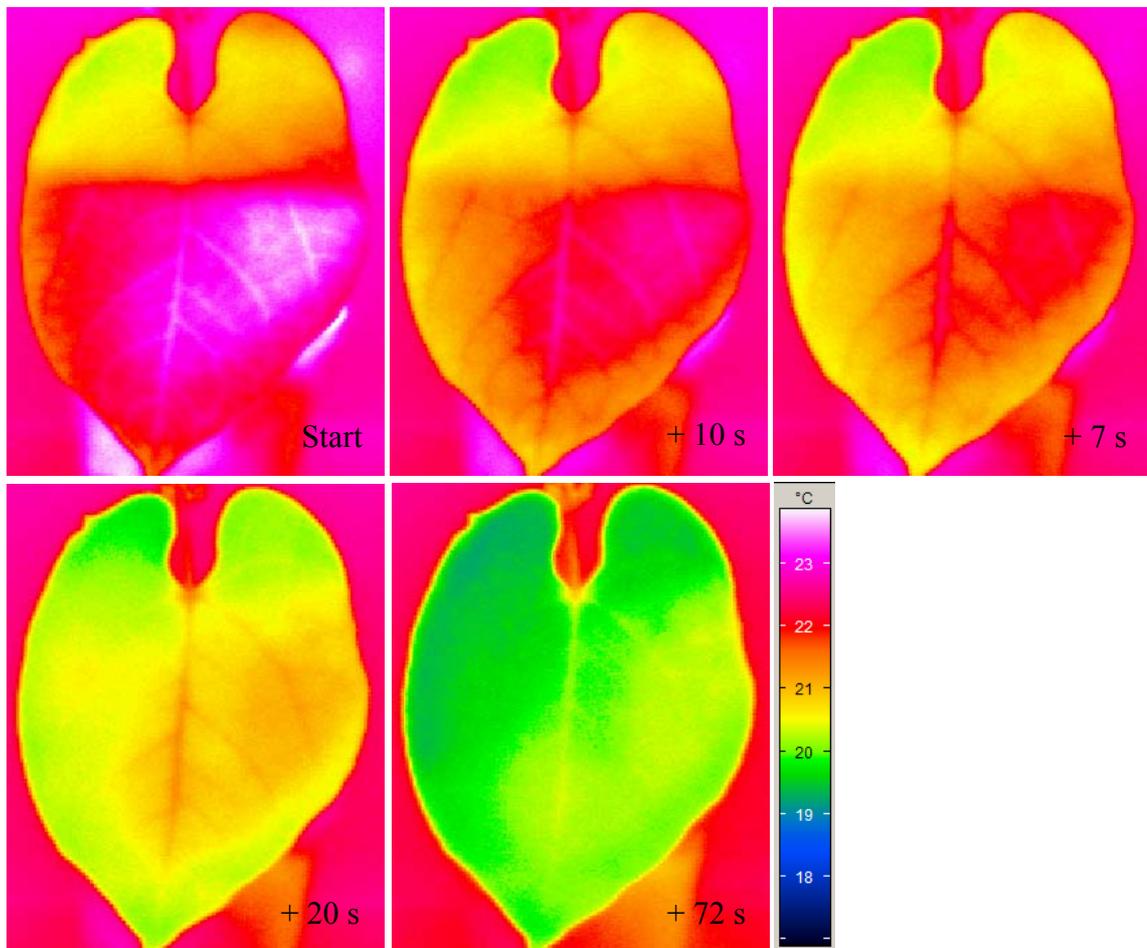


Abb. 72: Abkühlung eines Bohnenblattes über 109 Sekunden nach partieller Erwärmung durch Sonneneinstrahlung (aufgenommen unter konstanten Messbedingungen).

Neben zusammenhängenden, großflächigen Zonen traten auch kleine, stark fragmentierte Zonen auf. Solche Zonen erstreckten sich unabhängig vom Verlauf der Blattadern, die thermisch homogene Zonen begrenzten und selbst als thermisch auffällige Struktur hervortraten. Ein geringer thermischer Kontrast zwischen Blatt und Hintergrund erschwerte die Identifizierung von Zonen (Abb. 73).

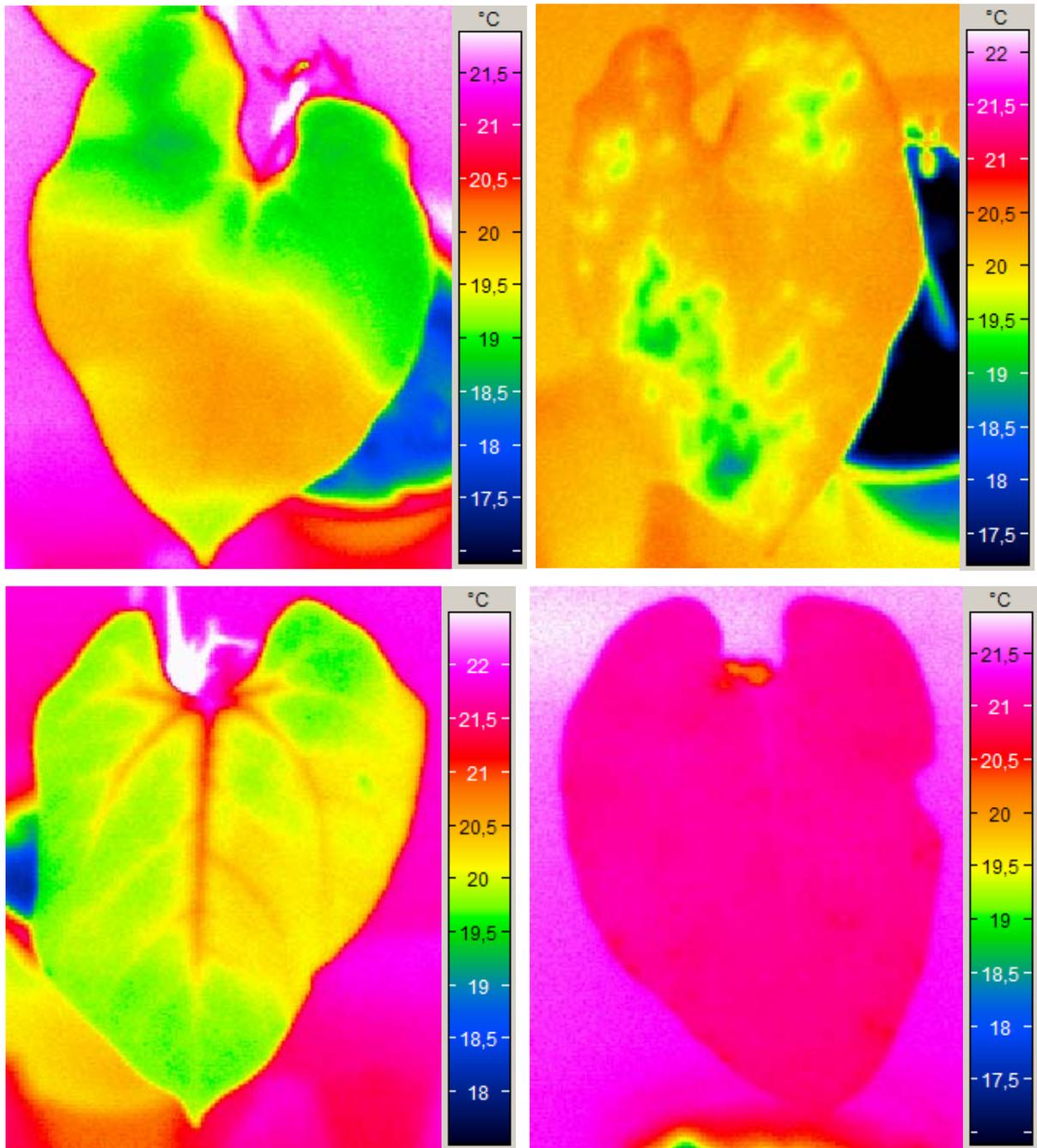


Abb. 73: Unterschiedliche Verteilung von Temperaturzonen auf Bohnenblättern unter kontrollierten Bedingungen. Oben links: Zusammenhängende Zonierung der Blatttemperatur. Oben rechts: Fragmentiertes Auftreten von thermischen Zonen. Unten links: Blattadern als thermisch auffällige Blattstruktur. Unten rechts: Geringer Kontrast zwischen Blatt und Hintergrund; (aufgenommen unter konstanten Messbedingungen).

Mechanisch beschädigtes Gewebe war durch einen unkontrollierten Wasserverlust als kalter Bereich zu erkennen. Der Temperaturunterschied zum umgebenden Gewebe betrug anfänglich bis 0,7 K und schwächte sich nach zehn Tagen auf bis zu 0,2 K ab (Abb. 74).

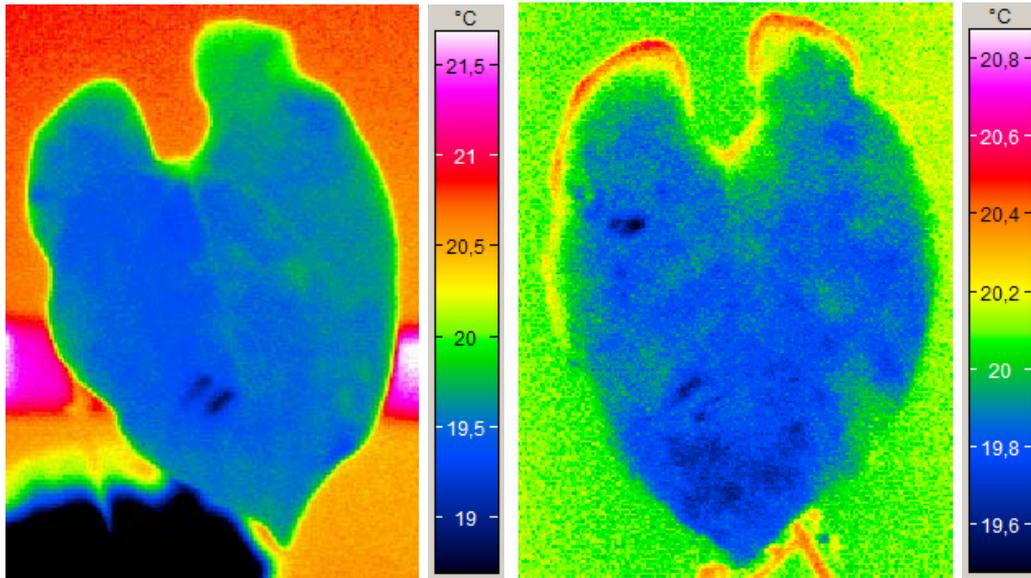


Abb. 74: Mechanische Gewebeschäden und Rostbefall. Links: Gesundes Blatt zu Tag 0 vor Inokulation. Rechts: Blatt mit *Uromyces appendiculatus* inokuliert, 10 Tage später; (aufgenommen unter konstanten Messbedingungen).

Die Entwicklung des Bohnenrostes innerhalb dieser Zeit bis zur Ausbildung von Uredosporenlagern war aus dem Vergleich des linken (vor Inokulation) und rechten Thermogramms (Tag 10 nach Inokulation) nicht zu erkennen. Der thermische Effekt des mechanischen Schadens war wesentlich größer; die Standardabweichung der Blattemperatur lag vor und nach der Inokulation bei nur 0,12, bzw. bei 0,08. In der Aufnahme am zehnten Tag war das Blatt im Vergleich zum Hintergrund weniger stark abgekühlt, 0,32 K zu 1,33 K an Tag 0, was auf geringere Transpiration schließen lässt (Abb. 74).

3.6.2.2 Charakterisierung des Befallsverlaufes von *Uromyces appendiculatus*

Der Infektionsverlauf von Bohnenrost wurde über 14 Tage thermografisch und fotografisch beobachtet (Abb. 75). Die thermischen Aufnahmen des gesunden Blattes vor Inokulation (Tag 0) und des noch symptomlosen Blattes bis Tag 3 zeigten Temperaturunterschiede bis zu 0,8 K zwischen den wärmsten und kältesten Blattzonen. Die Temperaturverteilung innerhalb dieser großflächigen und fließend ineinander übergehenden Zonen war vergleichsweise homogen. Ab Tag 5 waren erste optische Symptome in Form von punktuellen Chlorosen zu erkennen. Vergleicht man das dazu gehörende Thermogramm mit dem vor diesen ersten Symptomen (Tag 0 bis 3), so ist eine starke Fragmentierung der Blattemperaturen festzustellen. Diese Erscheinung setzte sich, mit Ausnahme zu Tag 7, mit voranschreitender Pathogenese fort. Zu Tag 14 waren erste Uredosporenlager, umgeben von Chlorosen, auf dem Blatt zu erkennen. Trotz der relativ gleichmäßigen Verteilung der optischen Rostsymptome zeigte das Blatt ein stark fragmentiertes Muster, das durch kältere, punktuelle Zonen bestimmt wurde. Diese

waren bis ca. 1,0 K kälter als die wärmsten Blatzonen. Über die Streuung der Blattemperatur (in jeder Aufnahme) war diese Entwicklung nicht zu beschreiben. Die Standardabweichung der blattinternen Standardabweichung von fünfzehn gesunden Blättern betrug zu Tag 0 0,14. Zu Tag 5, der Zeitpunkt, zu dem erste Chlorosen auf den Blättern sichtbar waren, betrug diese 0,18 bei den fünf gesunden Kontrollblättern und 0,16 bei zehn inokulierten Blättern, auf denen sich zu späterem Zeitpunkt Uredosporenlager ausbildeten. Auch zu Tag 14 hatte sich der Wert mit 0,14 bei den symptomatischen Blättern nicht verändert und betrug bei den Kontrollblättern 0,09.

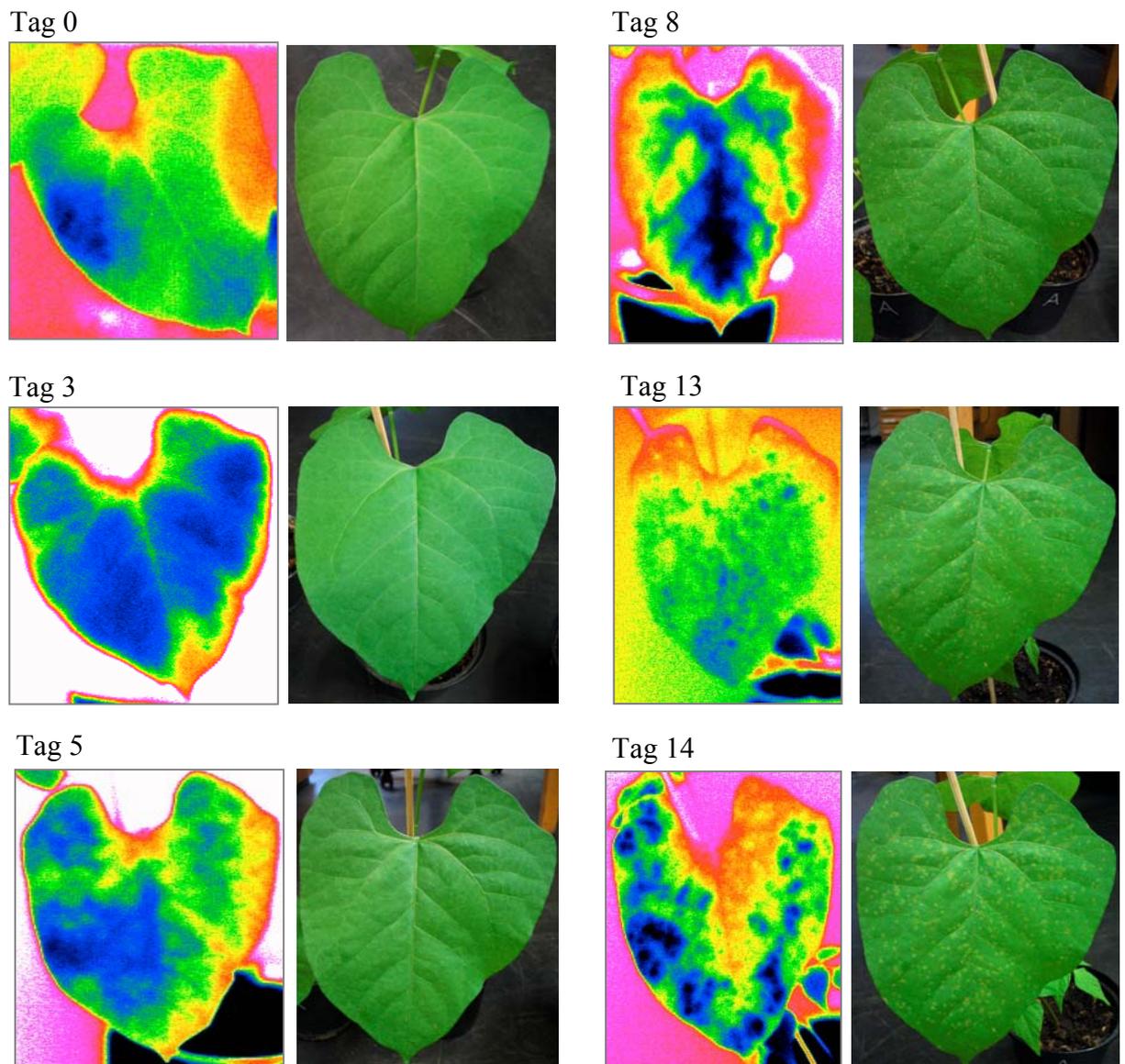


Abb. 75: Thermografische und optische Aufnahmeserie eines mit *Uromyces appendiculatus* inokulierten Bohnenblattes zu Tag 0 (vor Inokulation) sowie 3, 5, 8, 13 und 14 Tage nach der Inkubation; (aufgenommen unter konstanten Messbedingungen).

Die Pathogenese des Bohnenrostes führte sechzehn Tage nach Inokulation zu einem thermischen Muster auf dem Blatt (Abb. 76), das sich von einem gesunden Blatt unterschied (Abb. 77).

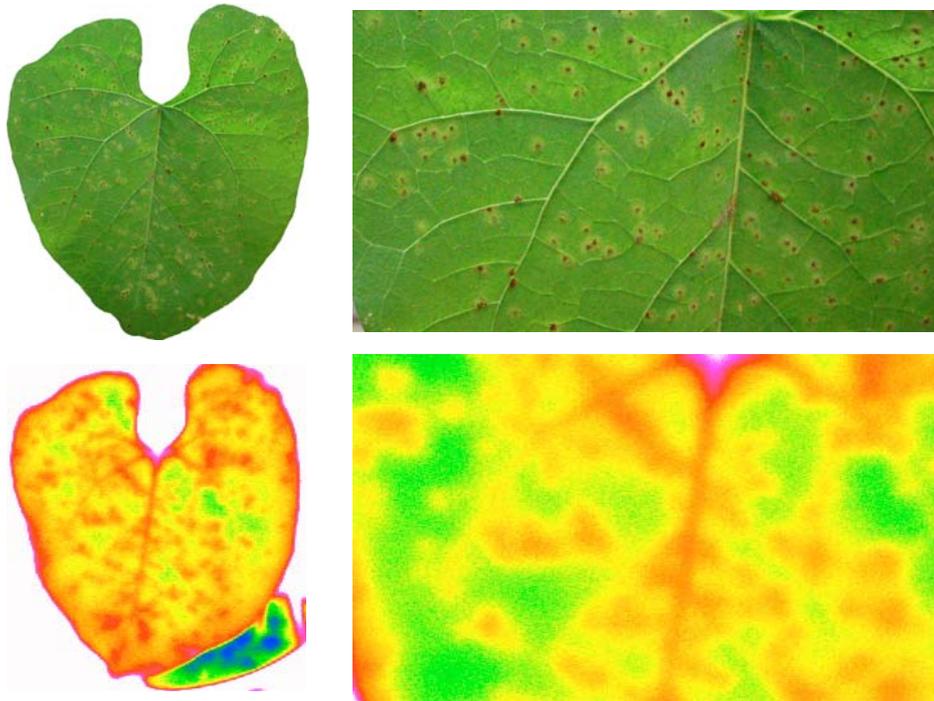


Abb. 76: Lichtbilder und Thermogramme eines, mit *Uromyces appendiculatus* inokulierten Bohnenblattes, 16 Tagen nach Inkubation. Rechts: ca. zweifach vergrößert.

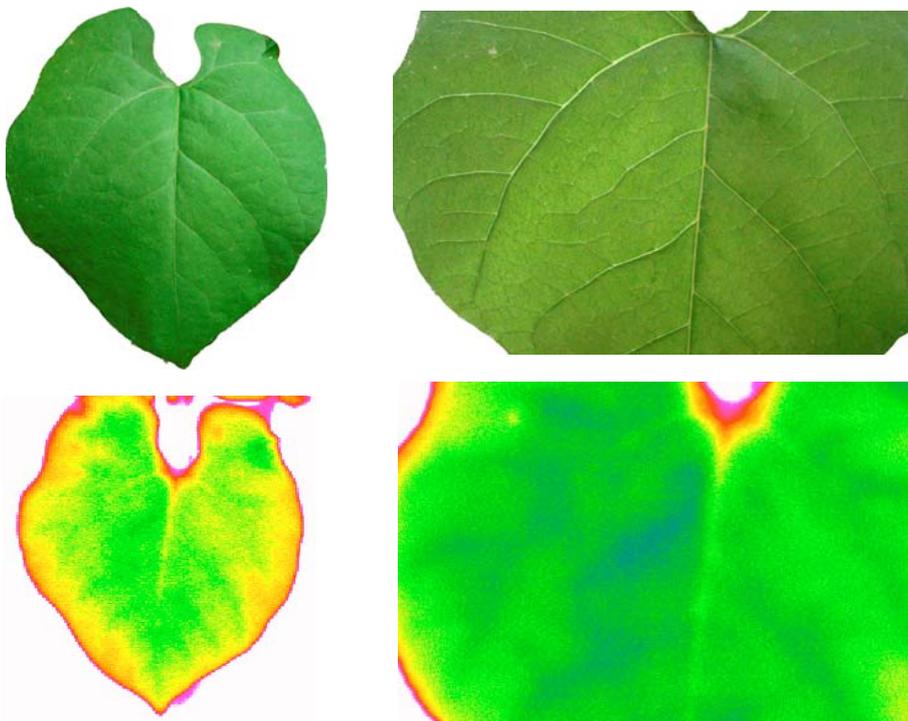


Abb. 77: Lichtbilder und Thermogramme eines gesunden Bohnenblattes, 16 Tagen nach Inkubation. Rechts: ca. zweifach vergrößert.

Die mittleren Blatttemperaturen unterschieden sich dabei jedoch kaum. Sie betrug $17,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ auf dem gesunden Blatt; das inokulierte Blatt war $0,2\text{ K}$ wärmer. Die Standardabweichung der Blatttemperaturen betragen $0,12$ und $0,15$ für das gesund bzw. inokulierte Blatt. Größer war der Unterschied der Temperaturspanne auf der Blattfläche. Sie betrug $0,75$ zu $1,03$. Verdeutlicht wurde die Heterogenität der Blatttemperatur des inokulierten Blattes beim Vergleich einzelner, punktueller Blatttemperaturen, fünf auf ausgewählten warmen und fünf auf ausgewählten kalten Stellen.

Die Differenz der Temperaturmittel aus diesen Punkten betrug $0,47\text{ K}$ auf dem inokulierten Blatt und $0,30\text{ K}$ auf dem gesunden Blatt. In der vergrößerten Aufnahme von Abb. 76 konnten Blattbereiche mit Uredosporenlagern thermischen Zonen auf dem Blatt zugeordnet werden. Während einzelne Rostpusteln mit ihrem chlorotischen Hof im Lichtbild eine relativ scharf begrenzte Ausdehnung hatten, waren sie einzeln im Thermogramm nicht zu identifizieren. Die warmen Bereiche hatten eine größere Ausdehnung, was auch auf den prinzipiell fließenden Übergang von unterschiedlichen Temperaturzonen zurückzuführen ist.

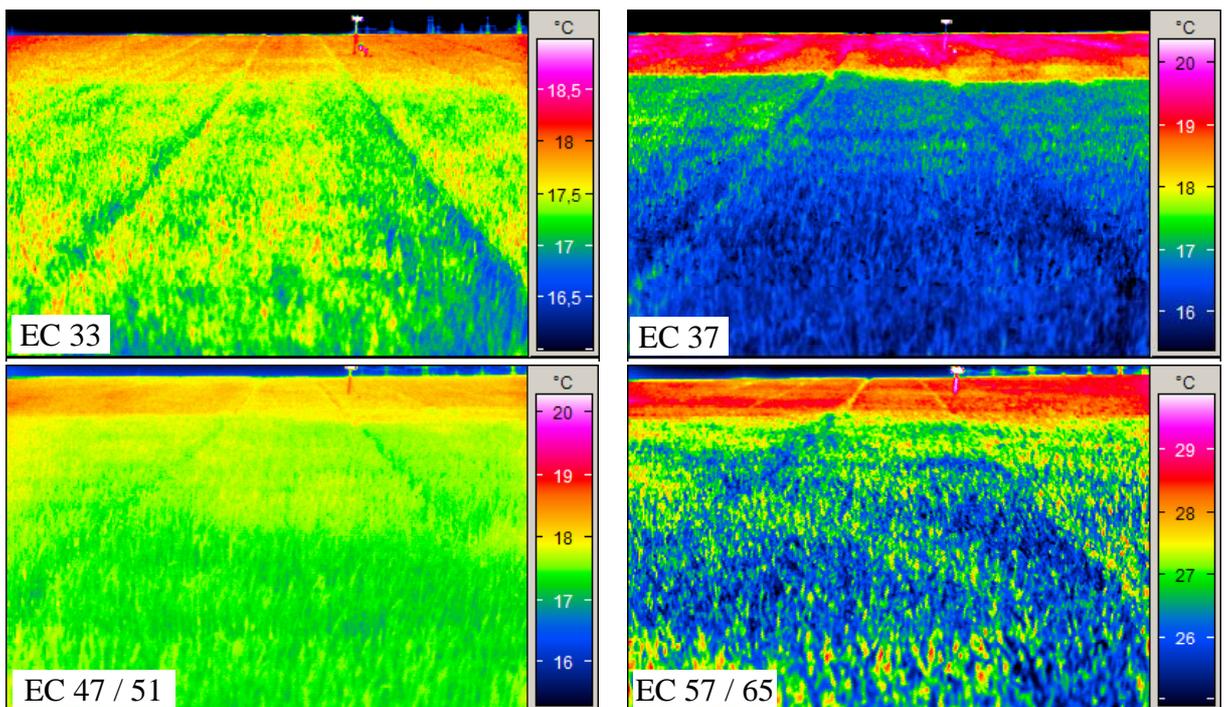
3.7 Thermografie von Weizenbeständen im Freiland

Die Thermografie als Werkzeug der Fernerkundung wurde zunächst in Bodennähe eingesetzt um die Entwicklung eines durch Bodenunterschiede heterogenen Weizenbestandes thermografisch zu beobachten und unterschiedliche Bestandszonen zu identifizieren (Abb. 78). Die aus dem flachen Aufnahmewinkel resultierenden methodischen Schwierigkeiten führten später zur ganzflächigen Aufnahme von Weizenbeständen aus großer Höhe.

3.7.1 Einfluss von Bodenheterogenität auf die Bestandstemperatur

Aufnahmen mit Stativ

Aus Bodennähe konnte die Bestandstemperatur häufig und über längere Zeit bei konstantem Bildausschnitt gemessen werden. Unabhängig von unterschiedlichen Temperaturniveaus zu den Aufnahmetermenen trat immer eine deutliche Abgrenzung zwischen den Bestandstemperaturen in hoher und geringer Bestandsdichte auf (Abb. 78). Die unterschiedliche Bestandsdichte, infolge von Bodenunterschieden, führte zu allen Aufnahmetermenen zu unterschiedlichen Bestandstemperaturen. Der Unterschied vor und hinter der Grenze lag zwischen 0,2 K und 2,4 K und variierte stark zwischen den einzelnen Aufnahmetermenen. Das Temperaturniveau der Luft lag zu den Aufnahmetermenen zwischen 16,9 °C zu EC 33 und 31,4 °C zu EC 77/83 (siehe Temperaturskalen, Abb. 78). Das Niveau der Lufttemperatur hatte tendenziell einen Einfluss auf die Differenz der Bestandstemperaturen zwischen den beiden Zonen (Abb. 79).



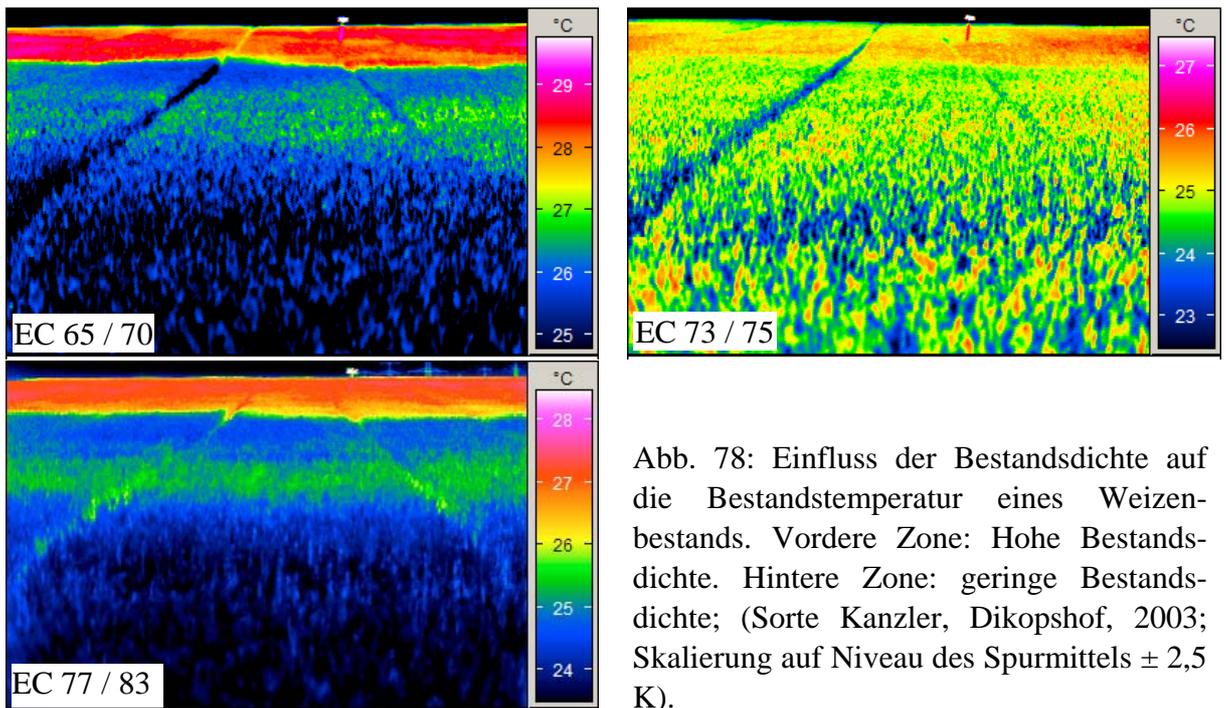


Abb. 78: Einfluss der Bestandsdichte auf die Bestandstemperatur eines Weizenbestands. Vordere Zone: Hohe Bestandsdichte. Hintere Zone: geringe Bestandsdichte; (Sorte Kanzler, Dikopshof, 2003; Skalierung auf Niveau des Spurmittels $\pm 2,5$ K).

Abgesehen von der Ausnahme zu EC 37 nahm die Temperaturdifferenz zwischen den Bestandszonen bei hoher Lufttemperatur zu und bei geringer ab. Zu EC 37 trat trotz eines geringen Temperaturniveaus von ca. 20 °C der höchste mittlere Temperaturunterschied auf.

Der Verlauf der Grenze zwischen den beiden Bestandsdichten war im Feld wiederzufinden und trat ebenfalls in entgegengesetzter Aufnahme­richtung auf (ohne Abb.).

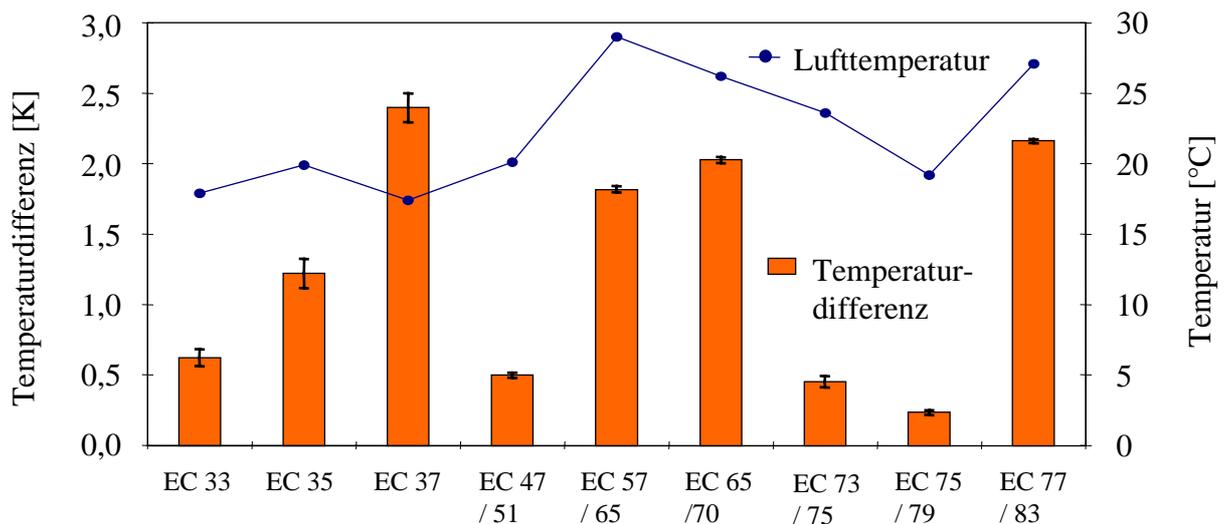


Abb. 79: Zusammenhang von Lufttemperatur und Bestandstemperaturdifferenzen zwischen der Zone mit geringer und hoher Bestandsdichte, gemittelt aus vier Aufnahmen. Balken zeigen SEM aus vier Aufnahmen im Abstand von 15 Sekunden.

Luftaufnahmen

Bei thermografischen Luftaufnahmen konnte der gesamte Schlag mit einer Messung erfasst werden, so dass an allen Messpunkten (Pixel) gleiche Bedingungen gegeben waren. Am Standort Dikopshof, 2004 konnten Zonen unterschiedlicher Bestandstemperatur im Weizenbestand identifiziert werden (Abb. 80). Ab EC 59 grenzten sich diese scharf gegeneinander ab und waren zu den Aufnahmetermi- nen zu EC 63 und EC 75 in Form und Ausdehnung wiederzufinden. Die Ausprägung veränderte sich, abgeschwächt zu EC 63 und verstärkt zu EC 75. Die gemittelten Unterschiede der Bestandstemperatur zwischen den Zonen betragen dabei 2,2 K, 0,7 K, bzw. 2,3 K zu den Entwicklungsstadien EC 59, EC 63 und EC 75.

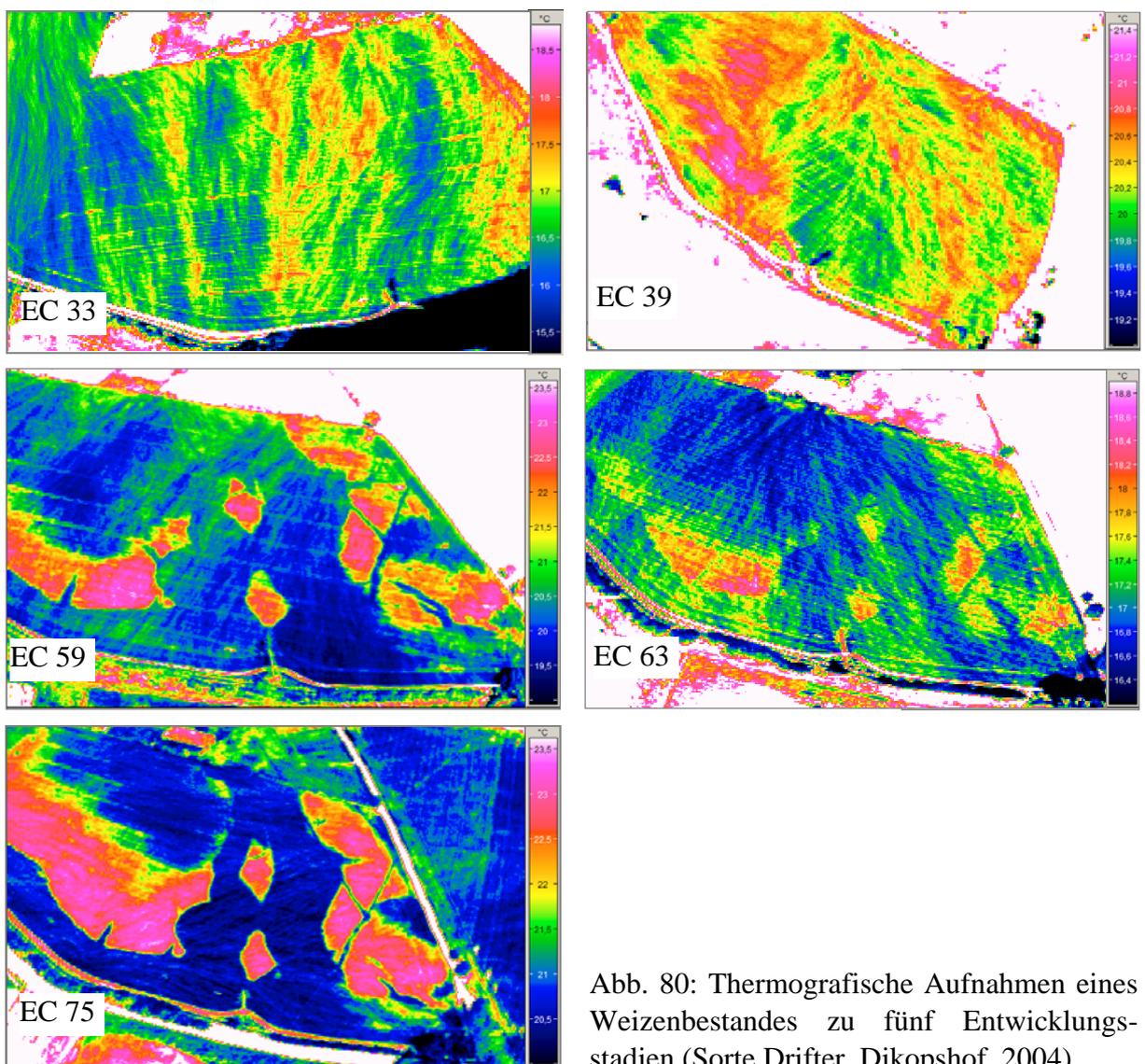


Abb. 80: Thermografische Aufnahmen eines Weizenbestandes zu fünf Entwicklungsstadien (Sorte Drifter, Dikopshof, 2004).

Die Konturen der thermografisch auffälligen Zonen waren auch im Lichtbild wiederzufinden (Abb. 81); anders als in den thermografischen Aufnahmen auch schon zu EC 33 und EC 39. Zu diesen Entwicklungsstadien zeigten die Thermogramme uneinheitliche thermische

Strukturen, die zu späteren Stadien nur noch sehr schwach zu erkennen waren und von stärker ausgeprägten Temperaturzonen überlagert wurden.

Die Zonen mit geringerer Bestandstemperatur, die ab EC 59 auftraten, wiesen eine höhere Bestandsdichte auf, gemessen an der Strohmasse zu EC 90 von 994 g m^{-2} im Vergleich zu 696 g m^{-2} in Zonen mit höherer Bestandstemperatur (Abb. 82). Die thermisch und optisch übereinstimmenden Konturen der Bestandstemperaturzonen deckten sich zum Teil mit unterschiedlichen Bodenarten (Abb. 83) und sind auf die Heterogenität des Bodens zurückzuführen.

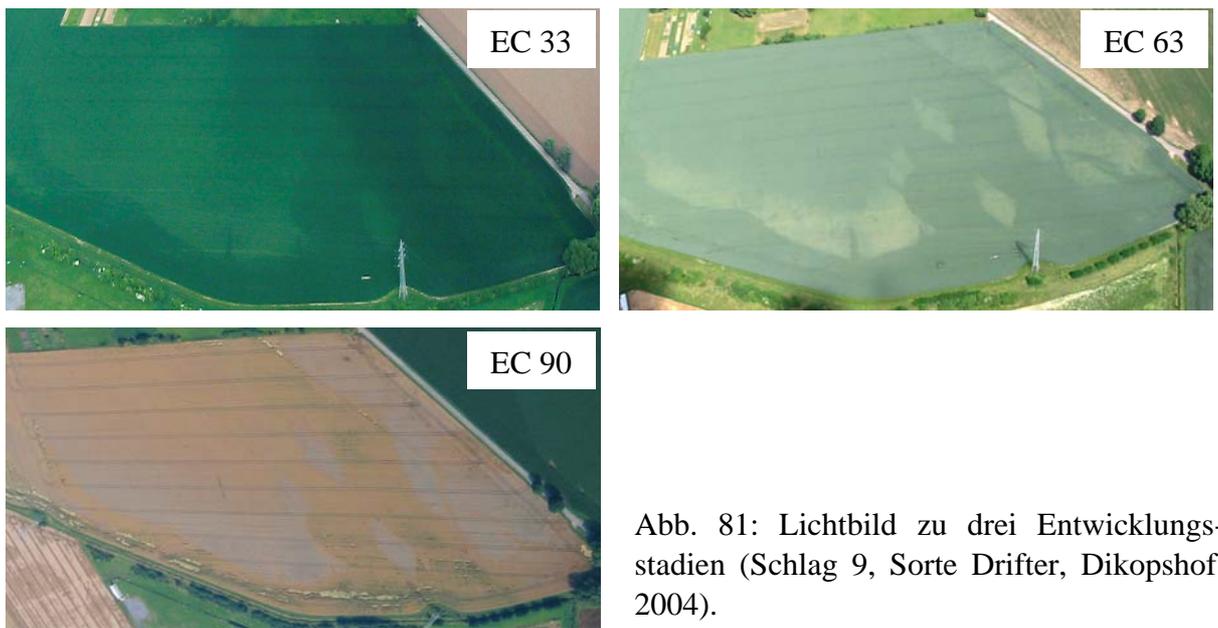


Abb. 81: Lichtbild zu drei Entwicklungsstadien (Schlag 9, Sorte Drifter, Dikopshof, 2004).

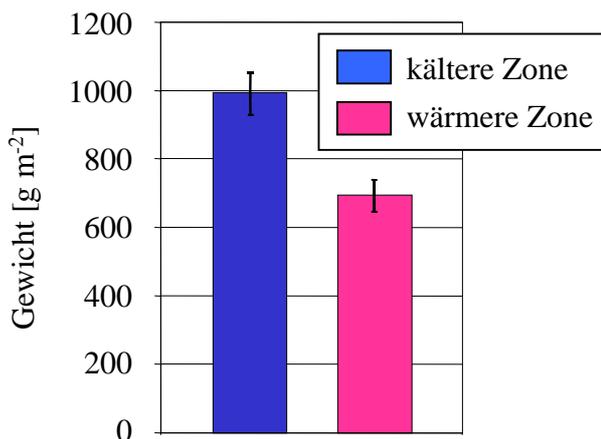


Abb. 82: Strohmasse zur Ernte in thermisch auffälligen Zonen (Dikopshof, 2004).

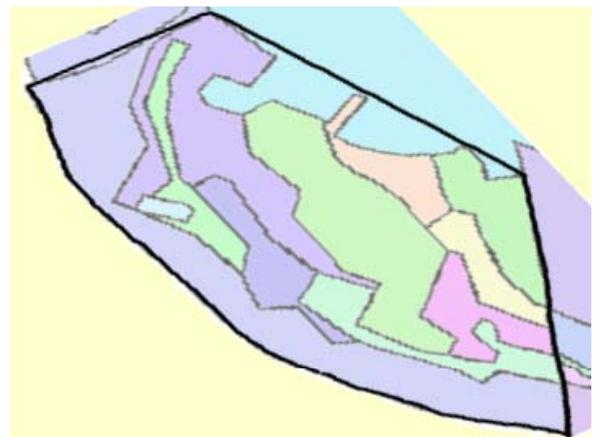


Abb. 83: Bodenkarte (Schlag 9, Dikopshof, 2004) basierend auf Daten der Reichsbodenschätzung, digitalisiert vom Institut für Kartographie und Geoinformation, Universität Bonn.

3.7.2 Temperaturverteilung in einem homogenen Weizenbestand

Um die Temperaturverteilung in einem homogenen Weizenbestand exemplarisch zu beschreiben, wurden die Bestandstemperaturen aus gleicher Aufnahmerichtung zu fünf Entwicklungsstadien von EC 33 bis EC 75 verglichen (Abb. 84). Der Standort war topografisch eben mit einheitlichem Boden Lößlehm. Der Bestand hatte eine gleichmäßige Dichte und wurde gesamtflächig bestellt.

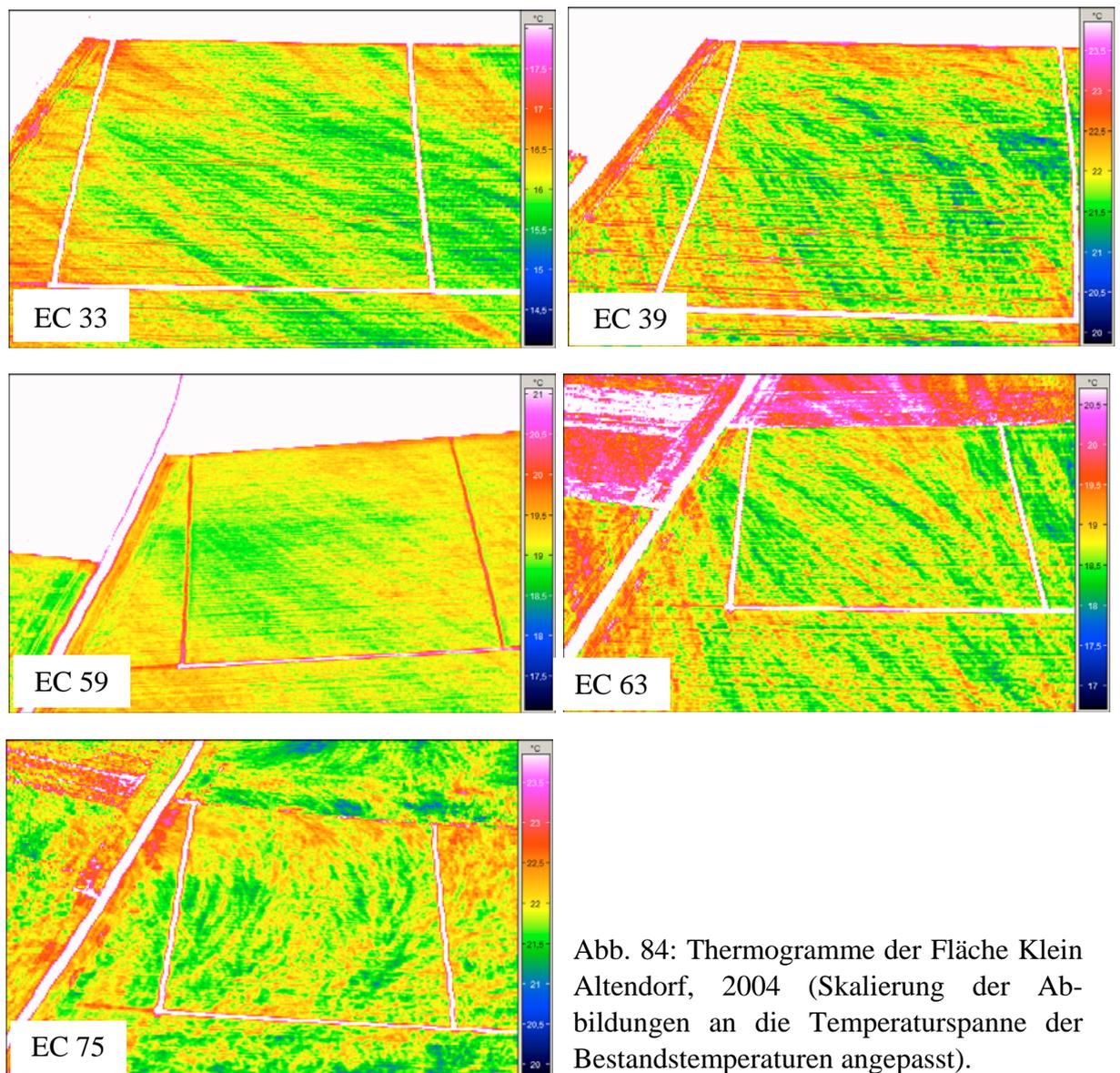


Abb. 84: Thermogramme der Fläche Klein Altendorf, 2004 (Skalierung der Abbildungen an die Temperaturspanne der Bestandstemperaturen angepasst).

Die Skalierung des Falschfarbenspektrums wurde in jedem Thermogramm dem auftretenden Temperaturbereich angepasst. Farbwerte sind zwischen den Thermogrammen daher nicht vergleichbar. Die Temperaturspanne innerhalb der Parzelle betrug in der Folge der Entwicklungsstadien 2,3, 4,0, 1,1, 1,7 und 1,7 K.

Um die Bestandstemperaturen ortsspezifisch zu vergleichen, wurden die räumlich aufgelösten Temperaturdaten zu verschiedenen Aufnahmetermi-
nen in eine GIS-Karte übertragen.

3.7.2.1 Berücksichtigung von Messflächen

Dazu wurde der Mittelwerte der Bestandstemperatur in vierzig Messflächen den entsprechenden Ortskoordinaten zugewiesen (Abb. 85). Die Abmessung der Messrechtecke entsprachen einer Fläche von 16 x 30 m und orientierten sich an einer praxisgerecht bearbeitbaren Teilflächengröße. In allen Messflächen war eine Fahrspur enthalten, um Vergleichbarkeit sicherzustellen.

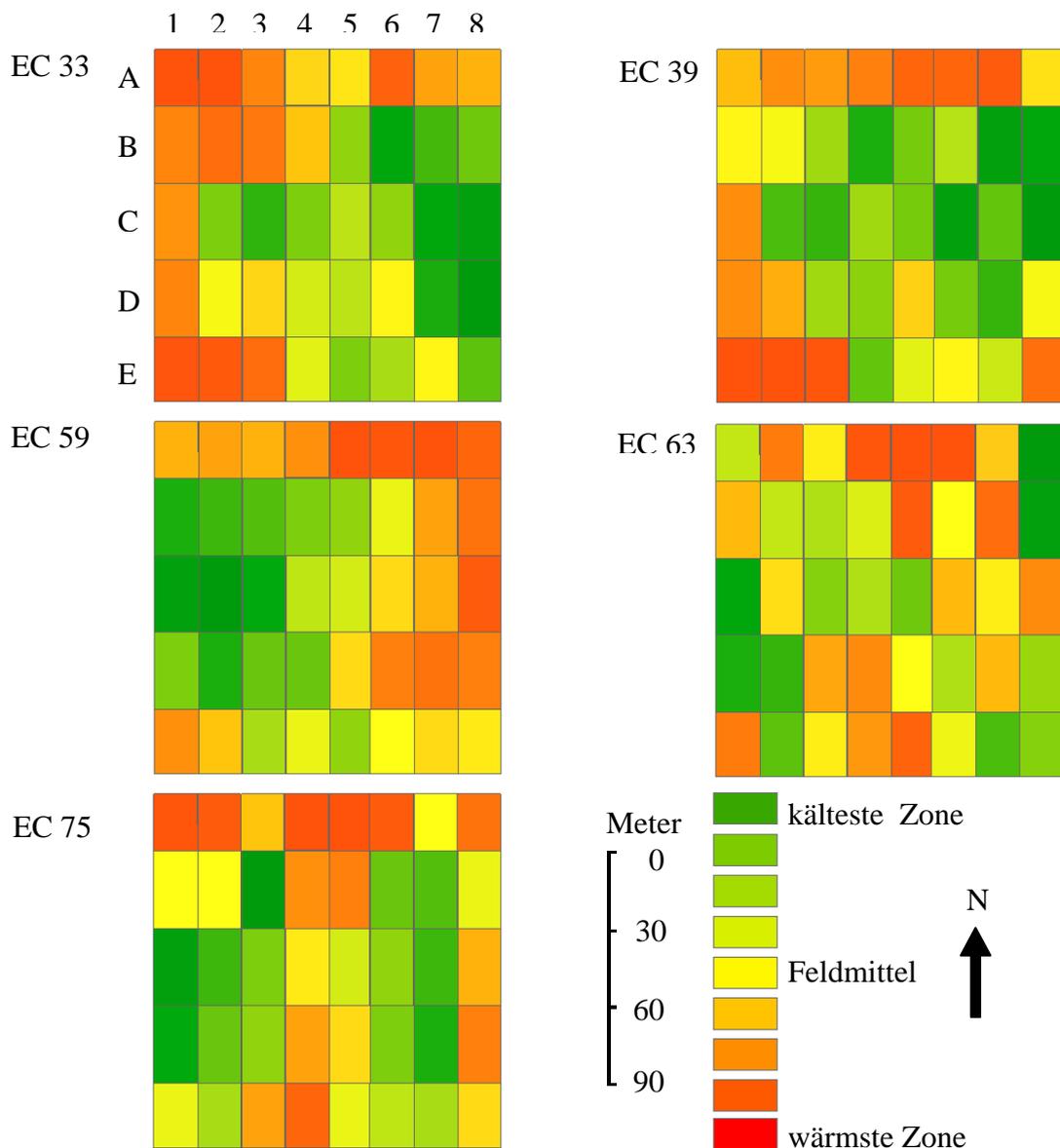


Abb. 85: Darstellung der Bestandstemperatur als Mittelwerte in einem Raster von 16 x 30 m zu fünf Entwicklungsstadien in einem Weizenbestand (Sorte Drifter, Klein Altendorf, 2004).

3.7.2.2 Berücksichtigung von Punktrasterdaten

Alternativ wurden statt flächiger Daten punktuelle Temperaturdaten, basierend auf ca. 230 Messpunkten, in die GIS-Karte übertragen. Dazu wurden punktuell Daten mit einer Rasterung, die 3 x 15 m entsprach, übertragen und mit dem Inverse-Distance-Weighting-Verfahren interpoliert .

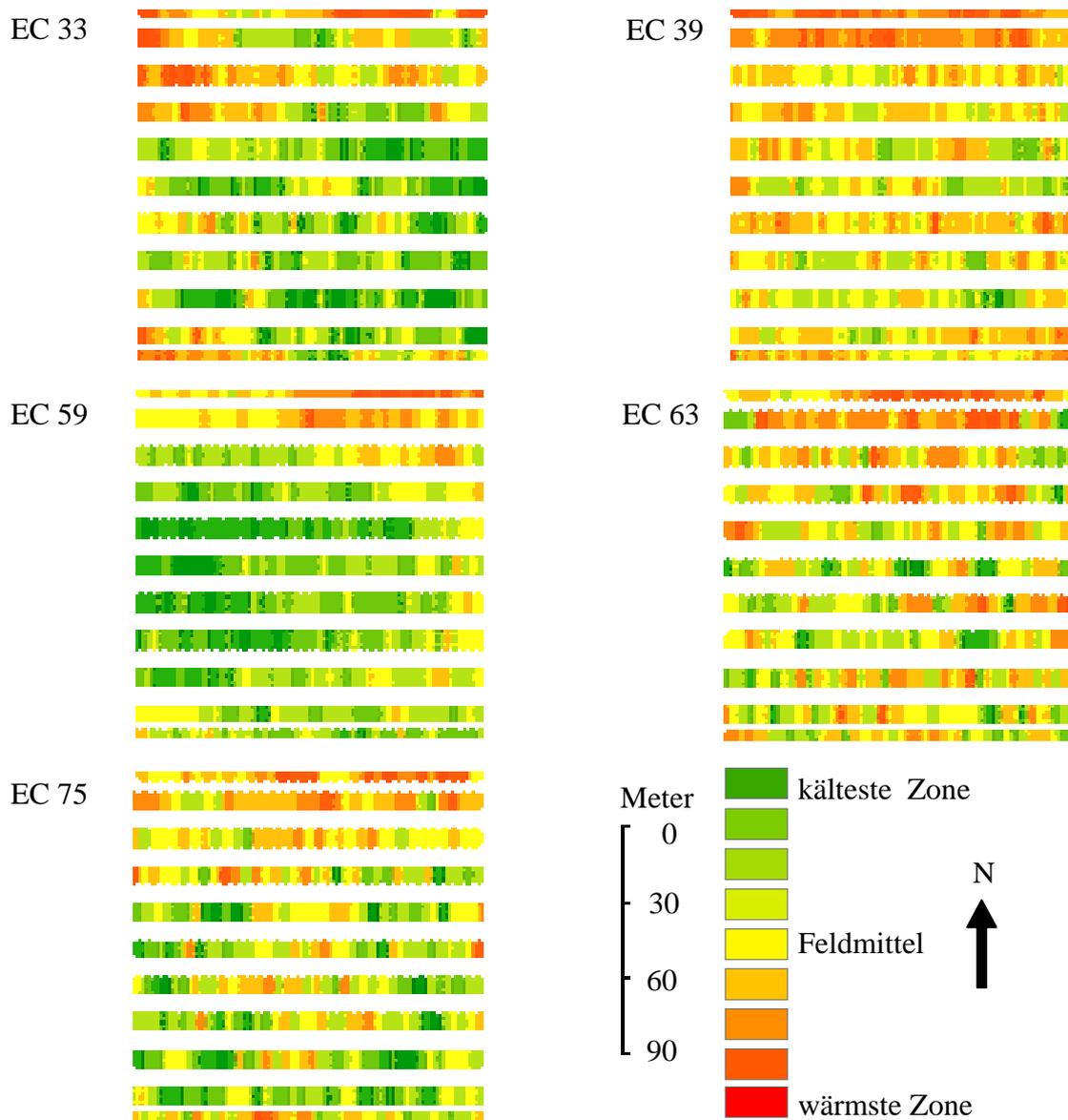


Abb. 86: Darstellung der Bestandstemperatur aus Messpunkten mit einem Raster von 3 x 15 m IDW-interpoliert, zu fünf Entwicklungsstadien in einem Weizenbestand (Sorte Drifter, Klein Altendorf, 2004).

Auf diese Weise entstanden Karten, die die hohe kleinräumige, thermische Heterogenität des Bestandes darstellen. Für eine anwendungsorientierte Nutzung war die Abbildung der Temperaturen aber zu fein aufgelöst.

Aus dieser Darstellung ließen sich Ähnlichkeiten der Karten zu EC 33 und EC 39, kältere Zonen im Bereich Karree B5 bis D8 und wärmere Zonen im Bereich Karree A1 bis E2, sowie

die stärkere Fragmentierung mit ähnlichen Abstufungen im Bereich Karree A1 bis E2 zu EC 63 und EC 75 feststellen. Zu EC 59 trat eine relativ kalte Zone im Bereich Karree B1 bis D3 auf, die nur zu EC 75 in ähnlicher Weise wiederzufinden war. Die räumlichen Übereinstimmungen zwischen Punktraster- und Messflächenkarten zeigte die gute Abbildbarkeit von Temperaturzonen durch die gröbere Darstellung durch Messflächen.

3.7.2.3 Berücksichtigung aller Pixelinformationen

Zum Vergleich der Bestandstemperaturen im Weizen, untereinander zu verschiedenen Entwicklungsstadien und mit räumlich erhobenen Ertragsdaten, mussten die Daten auf eine räumlich einheitliche, d.h. georeferenzierte Basis gebracht werden. Die Ergebnisse der einzelnen Schritte sind in Abb. 86 exemplarisch für die Temperaturkarte zu EC 75 dargestellt.

Die Karte aus den Originaldaten wies ein stark fragmentiertes Muster auf, weshalb die Auflösung von 0,7 x 0,7 m für die Erstellung einer Applikationskarte zu hoch erschien. Um im Bestand Temperaturzonen auszuweisen, wurde eine Glättung mit der Methode Gleitendes Fenster durchgeführt, die zu einer Auflösung von 2,0 x 2,0 m pro Pixel führte (Abb. 87, oben rechts). So konnten die feinen Strukturen, mit ca. 5 m Ausdehnung in einer Richtung, zu großräumigeren Temperaturzonen mit einer Ausdehnung von über 20 m zusammengefasst werden. Abschließend wurden die geglätteten Daten acht Temperaturklassen zugeordnet.

Da das Niveau der Bestandstemperatur zu den Aufnahmetermi- nen unterschiedlich war, wurde die mittlere Bestandstemperatur in jeder Messfläche mit der mittleren Bestandstemperatur der gesamten Parzelle verglichen und nach Rang geordnet. Auf diese Weise war es möglich, die Ortstreue von Temperaturzonen festzustellen. Die Temperaturspanne betrug -0,24 bis 0,47 K, -0,29 bis 0,30 K, -0,21 bis 0,21 K, -0,25 bis 0,27 K und -0,48 bis 0,25 K für die Entwicklungsstadien EC 33 bis EC 75.

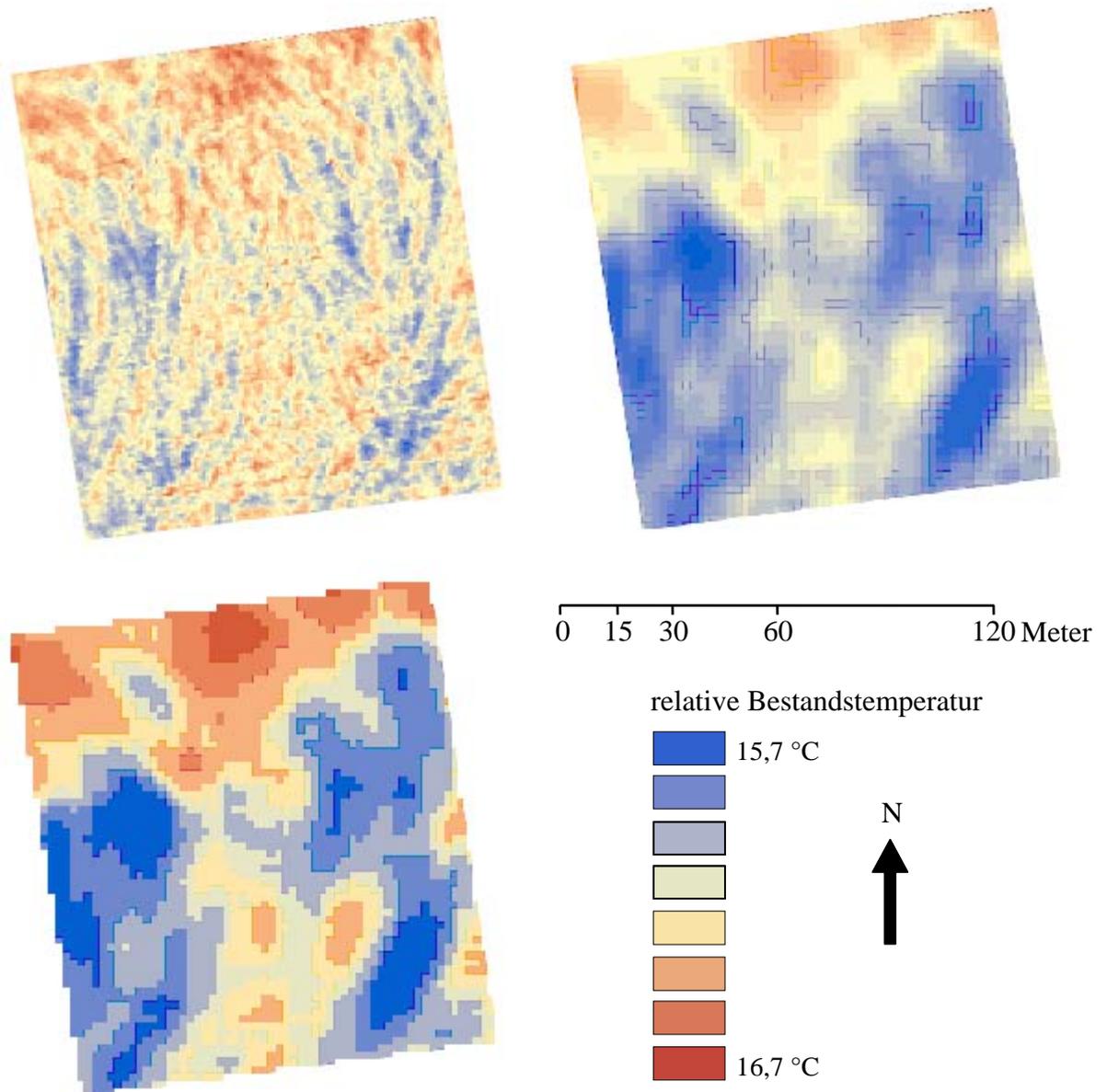


Abb. 87: Verarbeitung von Bestandstemperaturdaten in eine georeferenzierte Karte (oben links), mit Glättung (oben rechts) und Klassifizierung in 8 Klassen (unten links), EC 75.

Abschließend wurden die geglätteten Daten acht Temperaturklassen zugeordnet. Durch die Glättung und Klassifizierung fielen kleinräumige Temperaturunterschiede aus der Darstellung, insbesondere die Fahrspuren, die in den originalen Bestandstemperaturkarten als waagerechte Linien auftraten. Großflächige, streifige Strukturen blieben erhalten (Abb. 88).

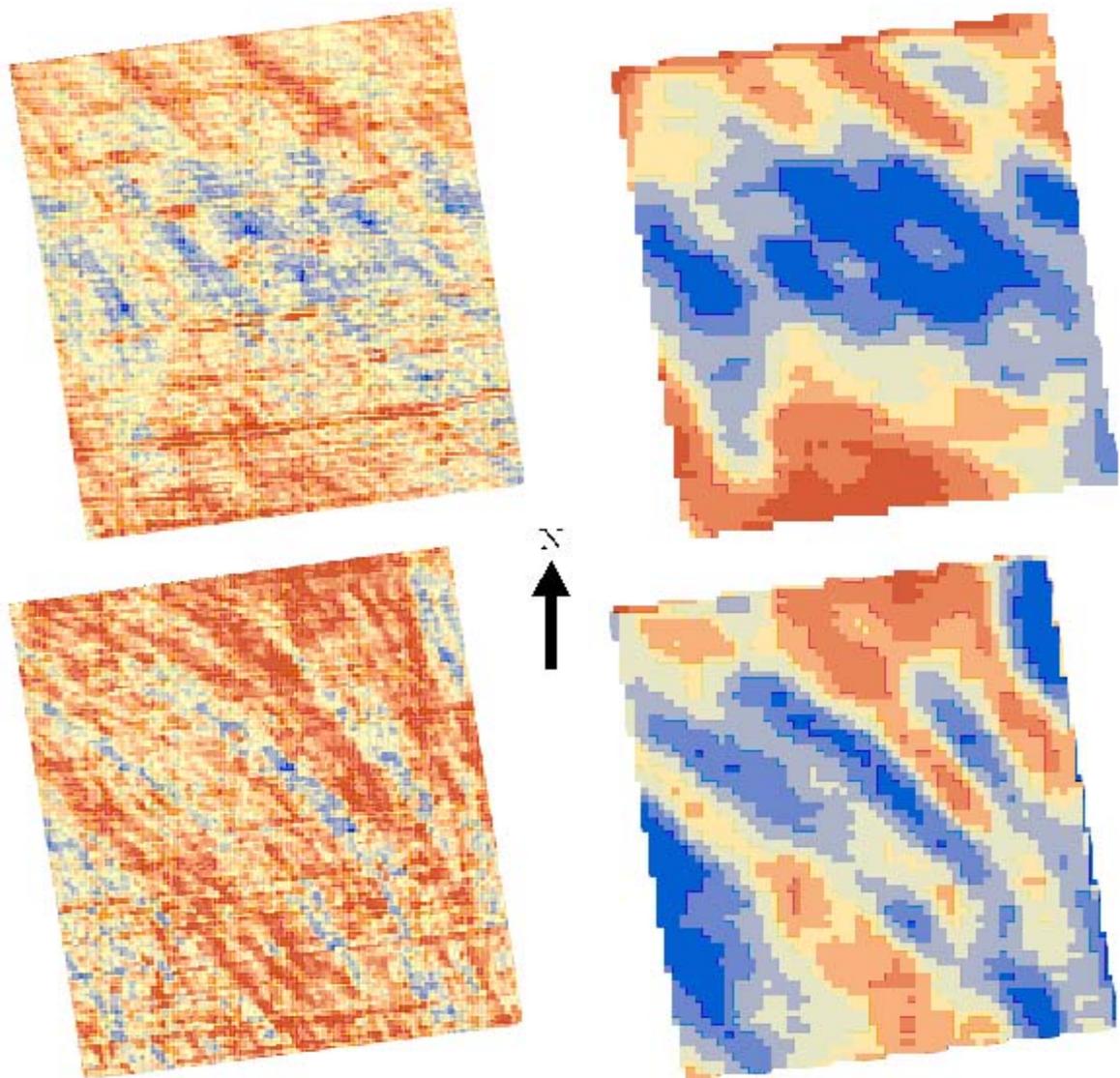


Abb. 88: Vergleich der Temperaturzonen aus kontinuierlichen Bestandstemperaturdaten im 0,7 x 0,7 m Raster (links) und klassifizierten (8 Zonen in Quantilen) Temperaturdaten im 2,0 x 2,0 m Raster am Beispiel von Aufnahmen zu EC 39 (oben) und EC 63 (unten).

3.7.2.4 Stabilität von Temperaturzonen

Die Stabilität von Temperaturzonen wurde auf Basis von Messflächenkarten untersucht. Die fünf Karten in Abb. 85 wurden in Abb. 88 zusammengefasst und der Temperaturreich als Farbe zwischen rot und grün dargestellt. Eine rote Zone war somit im Mittel häufiger als relativ warm eingestuft worden als eine grün gefärbte. Der obere Kartenrand und der linke unteren Rand waren demnach Zonen, in denen zu den fünf Entwicklungsstadien höhere Bestandstemperaturen auftraten als im mittleren Bereich des Bestandes.

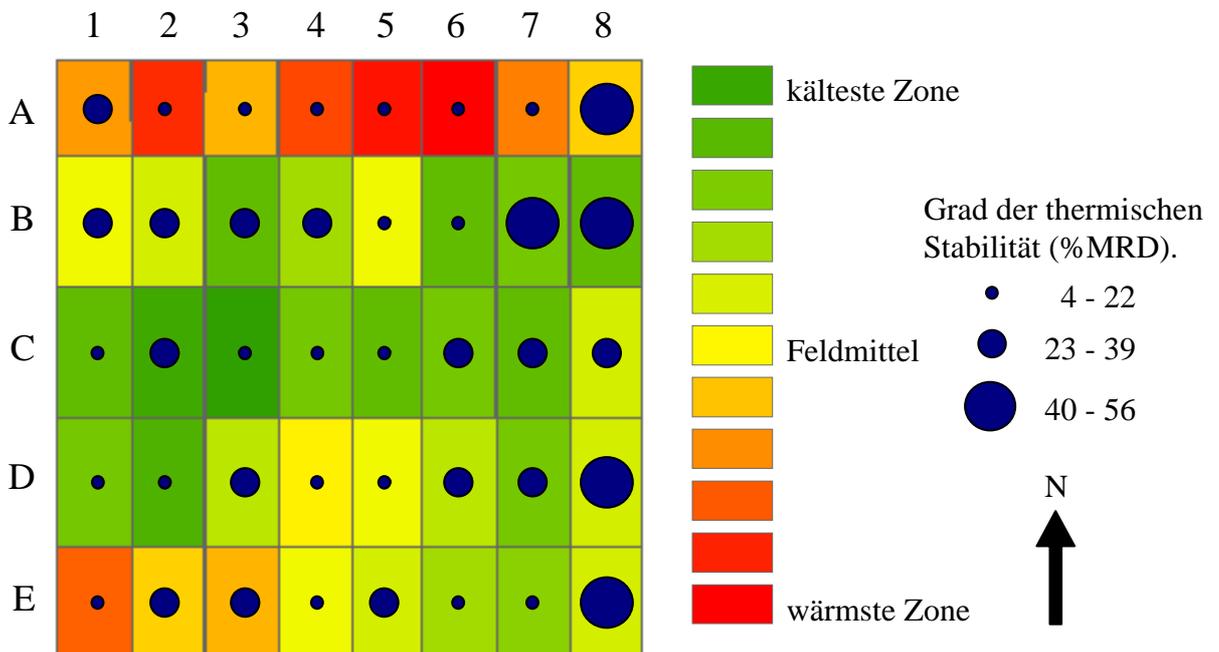


Abb. 89: Darstellung der relativen durchschnittlichen (von EC 33 bis EC 75) Bestandstemperaturen in vierzig Zonen und Stabilität der Zonen, ausgedrückt als %MRD in einem Weizenbestand (Klein Altendorf, 2004).

Um den durchschnittlichen Rang interpretieren zu können, wurde das Stabilitätsmaß %MRD als blauer Punkt angezeigt, drei gleich große Stabilitätsklassen darstellend. Ähnliche Temperaturränge zu den fünf Terminen bedeutete, dass die relative Einstufung zu verschiedenen Aufnahmetermen wiederholt auftrat, also eine hohe thermische Stabilität aufwies. Der geringste Wert betrug 4 % in Zone A6 (Ränge 5-5-3-1-4), der höchste Grad 56 % in Zone B8 (Ränge 32-37-6-39-21). Der Prozentwert wurde an der theoretisch höchsten %MRD für die Rangfolge 40-1-40-1-40 gemessen.

Zonen mit einem %MRD von 29 % waren z.B. B4 (Ränge 8-24-34-27-40) und A1 (Ränge 1-14-14-24-3). 50 % der Parzelle waren relativ stabil und 12,5 % wiesen große Variationen des Temperaturranges auf. Die Zonen mit hohen Bestandstemperaturen am oberen Kartenrand waren somit stabiler als die kälteren am rechten Rand. Ebenfalls stabil war die kalte Zone im zentralen Kartenbereich. Größere Temperaturabweichungen zwischen den Entwicklungsstadien traten hauptsächlich in der nordwestlichen Ecke und am östlichen Rand des Bestandes auf. Die unterschiedlichen, an die Parzelle angrenzenden Flächen, im Norden Zuckerrübe, im Osten und Süden Winterweizenbestand und im Westen Vorgewende des Winterweizenbestandes, hatten keinen Einfluss auf die Ausprägungen der zonalen Stabilität der Bestandstemperatur. Der statistische Vergleich der zonalen Bestandstemperaturen

zwischen den Aufnahmetermen erfolgte auf Basis der mittleren Temperaturen aus jeweils 40 Temperaturzonen pro Karte (Tab. 4).

Tab. 4: Rangkorrelation der zonalen Bestandstemperaturen zu fünf Entwicklungsstadien in einem Weizenbestand (Klein Altendorf, 2004).

	EC 33	EC 39	EC 59	EC 63	EC 75
EC 33	1				
EC 39	,654 *	1			
EC 59	-,410	,154	1		
EC 63	,007	-,012	,240	1	
EC 75	,251	,301	,396 *	,397 *	1

Rangkorrelation nach Spearman (n = 40, p = 0,05). * = signifikant

Es traten nur drei signifikante Korrelationen zwischen Bestandstemperaturen auf; mit einem Koeffizienten von 0,654 zwischen EC 33 und EC 39, schwächer zwischen EC 59 und EC 75 und zwischen EC 63 und EC 75. Letztere war geringfügig stärker. Zwischen EC 39 und EC 59 bzw. EC 75 war die Korrelation zwar nicht signifikant, tendenziell aber für letztere etwas stärker.

Die Stabilität der zonalen Bestandstemperatur, abgeleitet aus den geglätteten Daten zu fünf Entwicklungsstadien, wurde durch die Standardabweichung ausgedrückt (Abb. 90). Hohe Stabilität, d.h. eine geringe Standardabweichung bis 1,25 war im mittleren Bereich und im nord-östlichen Bereich der Parzelle zu finden. Diese stabilen Zonen nahmen mehr Fläche ein als Zonen geringer Stabilität, die sowohl an den Randbereichen als auch im mittleren Bereich der Parzelle auftraten. Nur 21 % der Fläche war den beiden Zonen geringster Stabilität zuzuweisen, hingegen 35 % der Fläche den beiden Zonen höchster Stabilität. Vergleichsweise instabile Zonen, mit einer Standardabweichung über 1,88, traten fragmentierter auf als stabile Zonen. Zum Vergleich der Temperaturkarten in zeitlicher Reihenfolge wurde auf Basis der klassifizierten Bestandstemperaturkarten der Korrelationskoeffizient zwischen je zwei Karten berechnet (Tab. 5). Der stärkste Zusammenhang mit 0,45 trat zwischen EC 59 und EC 75 auf, der schwächste zwischen EC 33 und EC 63.

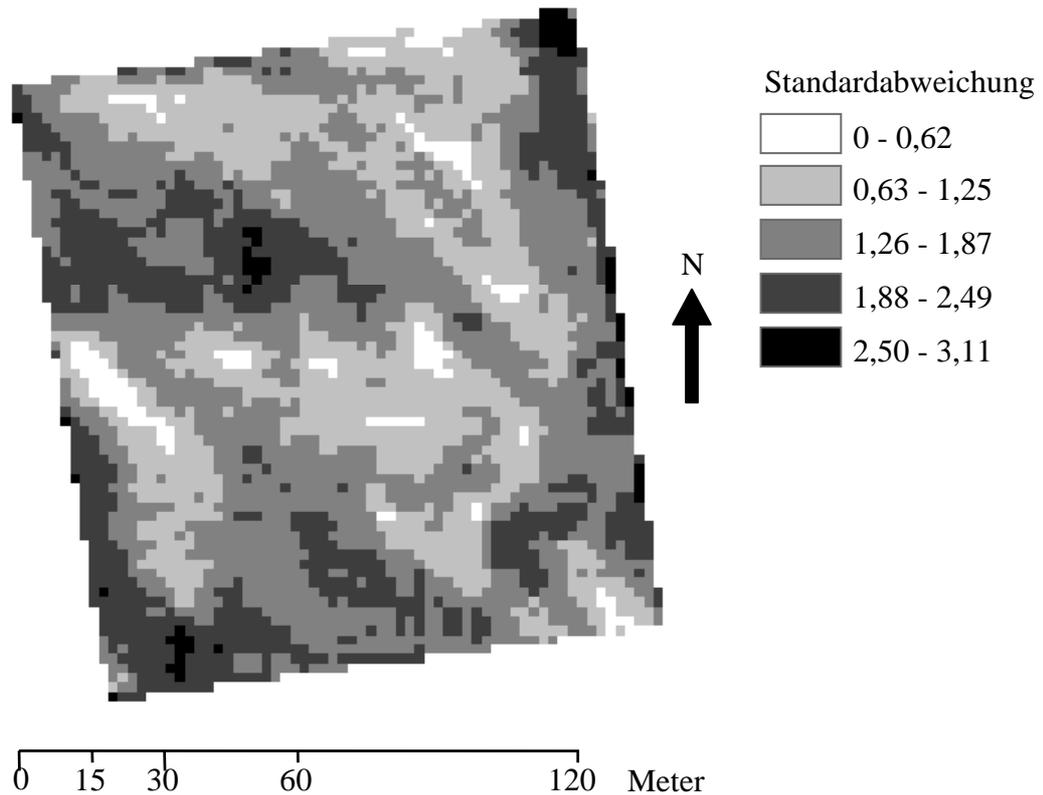


Abb. 90: Klassifizierung der geglätteten Bestandstemperaturen nach Stabilität, gemessen als Standardabweichung über Aufnahmen zu fünf Entwicklungsstadien eines Weizenbestandes (Sorte Drifter, Klein Altendorf, 2004).

Von EC 33 über 39, 59 bis EC 63 traten zwischen direkt aufeinander folgenden Terminen höhere Korrelationen auf als zwischen weiter auseinander liegenden Terminen. Abweichend von diesem Trend waren Bestandstemperaturen zu allen Terminen vergleichsweise eng mit denen zu EC 75 korreliert.

Tab. 5: Korrelationstabelle der hochaufgelösten (originalen) Bestandstemperaturen über fünf Aufnahmetermine. Angegeben ist der Korrelationskoeffizient.

	EC 33	EC 39	EC 59	EC 63	EC 75
EC 33	1				
EC 39	,40	1			
EC 59	,18	,28	1		
EC 63	,01	,21	,30	1	
EC 75	,39	,36	,45	,43	1

Beide Methoden zur Kartenerstellung führten zu ähnlichen Korrelationen zwischen den Terminen. Insgesamt wiesen die Korrelationskoeffizienten für die Messflächenkarten eine breite Variationsbreite auf. Im optischen Vergleich der Stabilitätskarten ließen sich die Verteilung der wesentlich feiner aufgelösten Originaldaten in den %MRD-Werten der Messflächenkarte wiederfinden.

3.7.3 Bestandstemperatur und Ertrag

3.7.3.1 Auf einem homogen bestellten Weizenbestand

Der Kornertrag im Weizenbestand der Sorte Drifter am Standort Klein Altendorf, 2004 variierte zwischen 5,3 und 12,7 t ha⁻¹ mit einem Schwerpunkt zwischen 8,0 und 10,5 t ha⁻¹ (Abb. 91).

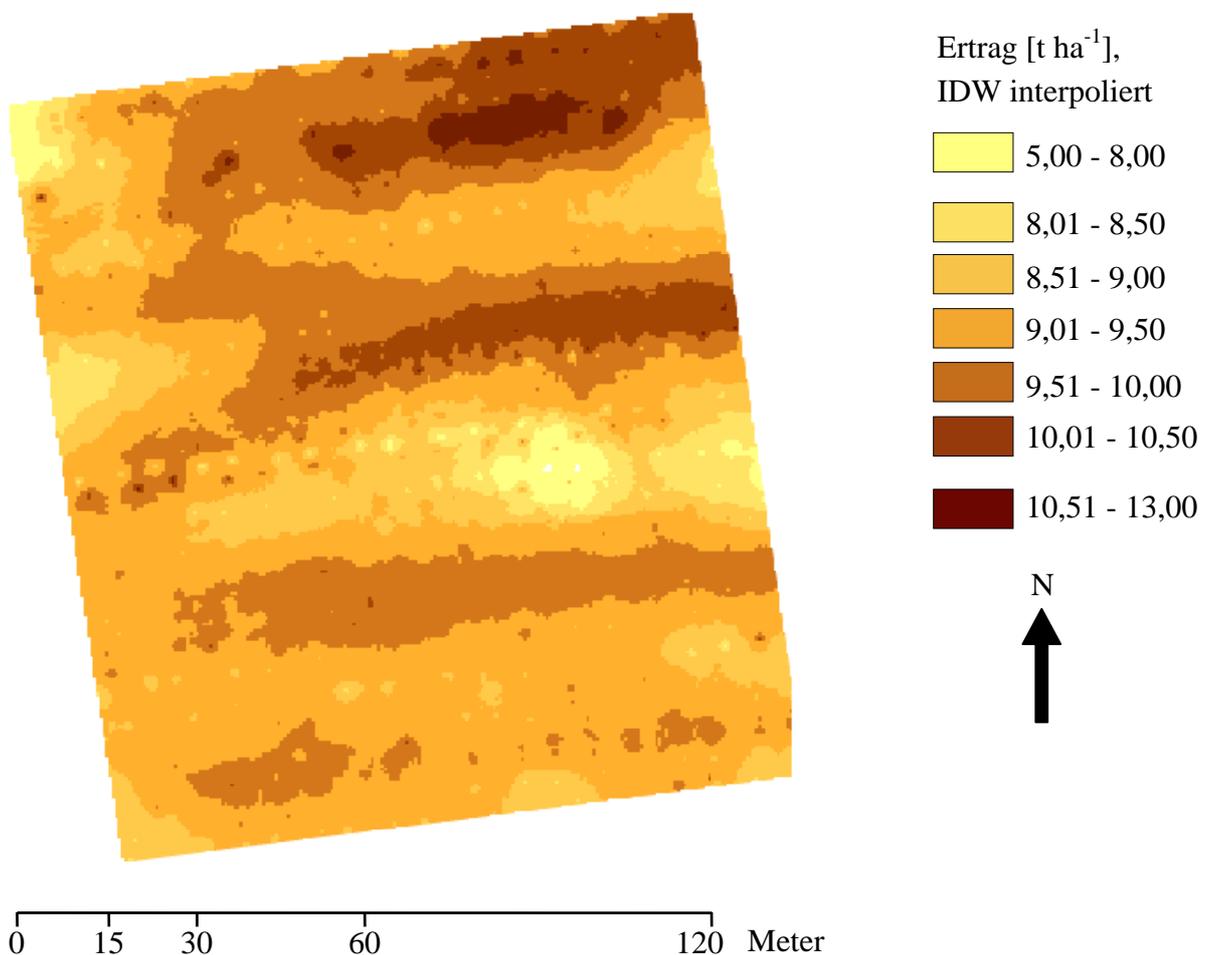


Abb. 91: Georeferenzierte, IDW-interpolierte und klassifizierte Ertragskarte des Weizenbestandes (Sorte Drifter, Klein Altendorf, 2004).

Zonen ähnlichen Ertrages traten in langgestreckten Streifen auf, die sich parallel zu den Fahrspuren in Ost-West-Richtung erstreckten. Die Ausdehnung in einer Richtung betrug

weitgehend mehr als 15 m. Einzelne Inseln mit besonders hohem oder niedrigem Ertrag waren aber kleiner. Bei einer Skalierung mit Intervallen von $0,5 \text{ t ha}^{-1}$ wiesen Zonen gleicher Ertragsklasse eine vergleichsweise kompakte Form auf.

Durch Überlagerung der fünf Temperaturkarten wurde der Zusammenhang zwischen Ertrag und Bestandstemperatur bemessen (Abb. 92).

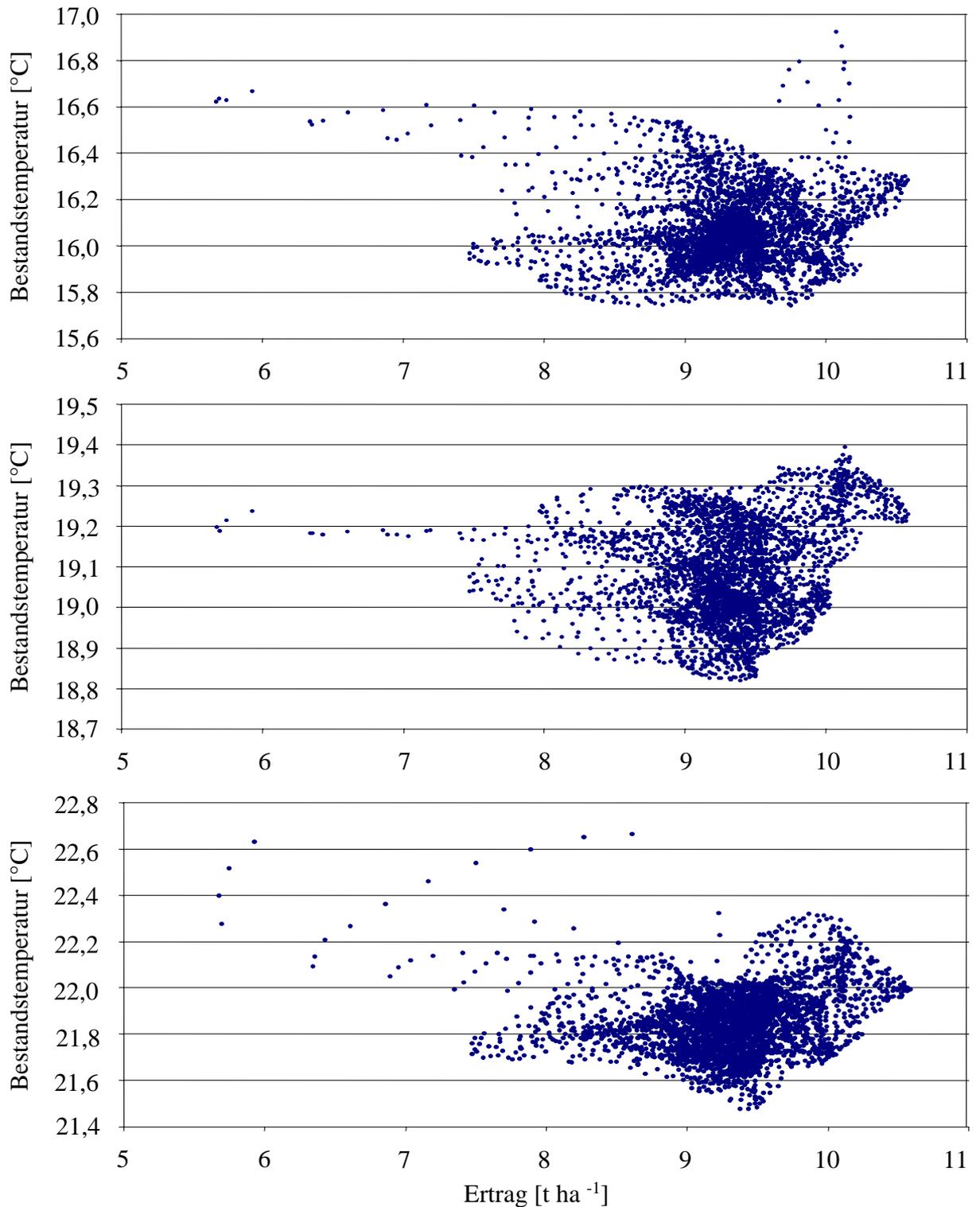


Abb. 92: Zusammenhang von Ertrag und Bestandstemperatur in einem Weizenbestand zu EC 33 (oben), EC 59 (Mitte) und EC 75 (unten); (Sorte Drifter, Klein Altendorf, 2004).

Dazu wurden die geglätteten, absoluten Bestandstemperaturen pixelweise mit dem interpolierten Kornertrag verglichen. Alle fünf Punktwolken zeigten eine ähnliche Struktur; ein dichter Kernbereich umgeben von einer Schar von Ausreißern, die vornehmlich auf den X-Achsen durch die hohen Variationen des Ertrages auftraten. Entlang der Temperaturachsen waren weniger Ausreißerwerte zu finden. Ein funktionaler Zusammenhang zwischen Ertrag und Bestandstemperatur war auch anhand einer durchschnittlichen Bestandstemperatur nicht abzuleiten. Eine Fokussierung auf den Kernbereich der Punktwolken, der ca. 0,6 K bei einem Ertrag von 8,5 bis 10 t ha⁻¹ umfasste, zeigte keinen Trend (ohne Abb.).

3.7.3.2 Einfluss von Stickstoffdüngung und Fungizideinsatz

Bestandstemperatur und Ertrag bei variiertem Fungizid- und Stickstoffeinsatz

Thermografien der Versuchsanlage Klein Altendorf in der Saison 2003 zu vier Entwicklungsstadien ab EC 57 bis EC 90 (Abb. 93) zeigten den Einfluss von ertragsrelevanten Faktoren: Stickstoffdüngung und Fungizideinsatz auf die Bestandstemperatur (Abb. 94). Die unterschiedlichen Behandlungen wirkten sich in deutlicher Weise auf den Ertrag der einzelnen Parzellen aus, der je nach Behandlung zwischen 8,5 und 10,5 t ha⁻¹ lag. Die höchsten Erträge wurden in den Parzellen mit Fungizid- und vollem Stickstoffeinsatz (D+F+) erreicht, die geringsten in den Parzellen ohne Fungizideinsatz und reduzierter Stickstoffdüngung (D-F-).

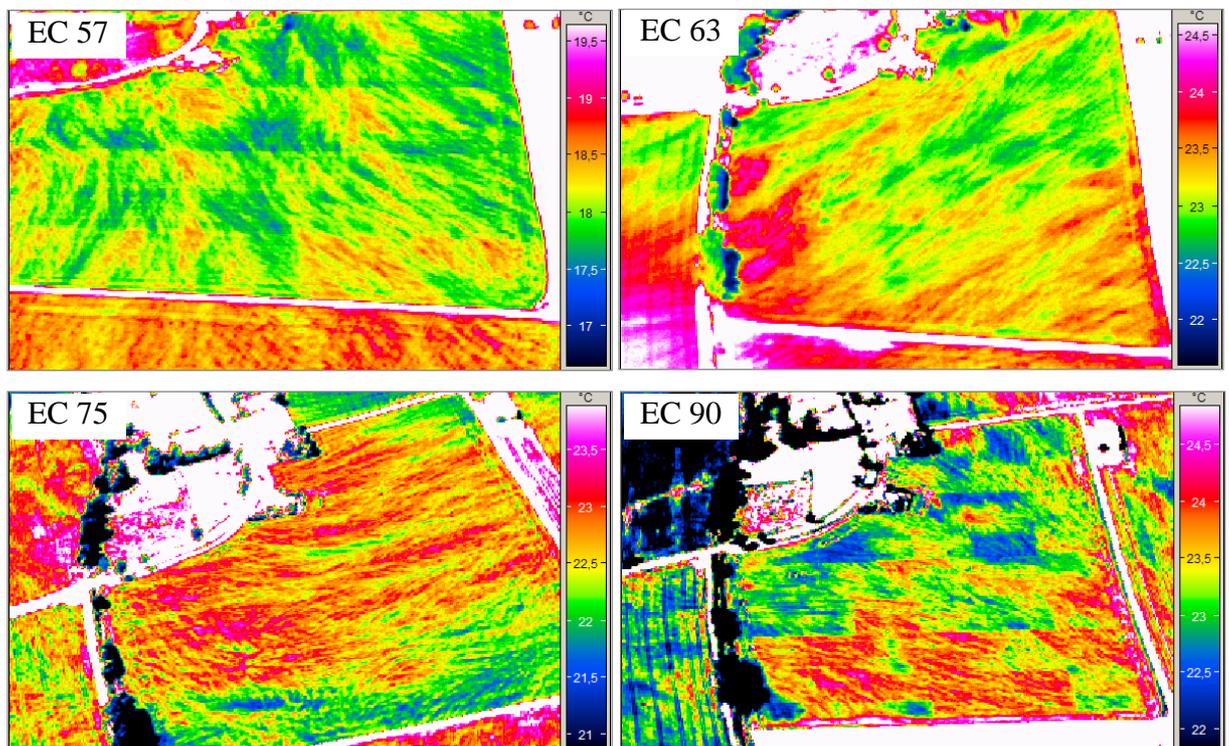


Abb. 93: Thermogramme des Parzellenversuchs (variierte Düngung und Fungizideinsatz); (Sorte Novalis, Klein Altendorf, 2003).

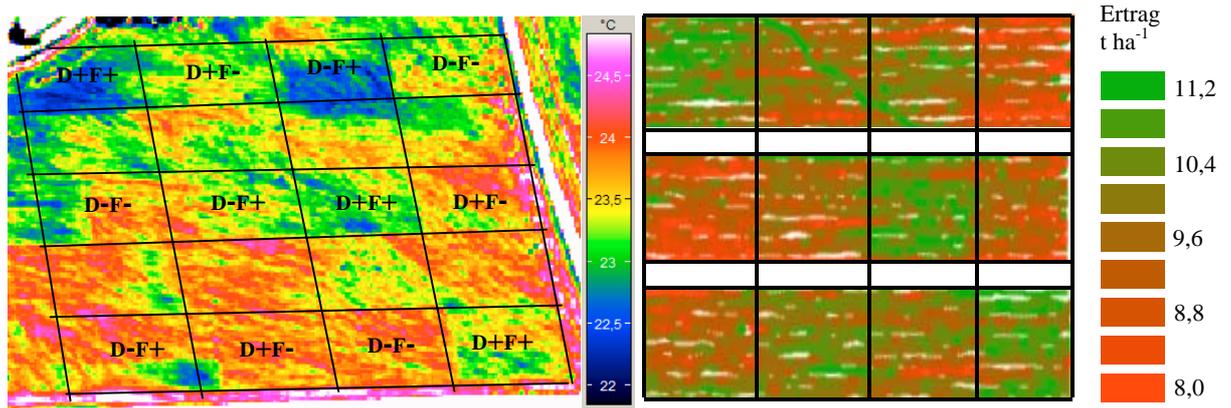


Abb. 94: Rechts: Bestandstemperatur in Weizenparzellen mit verschiedenen Düngungs- und Fungizidbehandlungsvarianten. Links: Ertragskartierung der Parzellen; (Sorte Novalis, Klein Altendorf, 2003).

Die Behandlungen D-F+ und D+F- ließen sich im Ertrag nicht unterscheiden, lagen aber zwischen dem Ertrag der Voll- und Minimalbehandlung. Die Bestandstemperaturen betragen kurz vor der Ernte 24,01 °C (D+F+) und 23,82 °C (D-F+) auf den fungizidbehandelten Parzellen und 24,38 °C (D+F-) und 24,14 °C (D-F-) auf den Parzellen ohne Fungizide.

Beim Vergleich innerhalb der Düngungsstufen war die Variante mit Fungizidbehandlung die kältere, was trotz weit fortgeschrittener Seneszens auf eine höhere Resttranspiration schließen ließ. Bei den beiden Fungizidbehandlungsstufen war die Behandlung mit der geringeren Düngungsintensität die kältere. Die Bestandstemperaturen der Behandlungen D+F- und D-F+ waren signifikant ($P = 0,05$) verschieden.

Die normierten Bestandstemperaturen aus vier thermografischen Aufnahmen der Parzellen zu EC 90 wurde statistisch verglichen (Abb. 94).

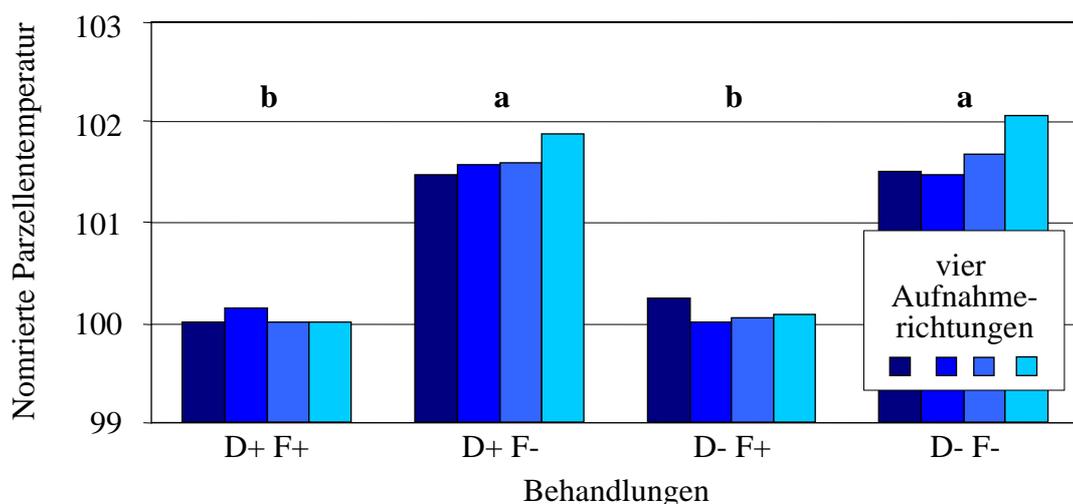


Abb. 95: Einfluss von unterschiedlicher Stickstoffdüngung (D) und Fungizidbehandlung (F) auf die Bestandstemperatur. Daten aus vier Thermogrammen, aufgenommen aus vier verschiedenen Richtungen zu EC 90 (Sorte Novalis, Klein Altendorf, 2003). Gleiche Buchstaben kennzeichnen homogene Gruppen, (Tukey, $p=0,05$). Normierung: kälteste Parzelle = 100, Daten stammten aus vier thermografischen Aufnahmen.

Die Fungizid behandelten Parzellen konnten signifikant einer homogenen Gruppe zugeordnet werde (b), die ohne Fungizid behandelten Parzellen einer anderen (a). Die Düngungsintensität hatte keinen Einfluss auf die Bestandstemperatur, da beide Düngungsintensitäten in den Gruppen a und b vertreten waren (Abb. 95).

3.7.3.3 Einfluss von Fungizideinsatz an verschiedenen Weizensorten

Der Einfluss einer Fungizidbehandlung auf die Bestandstemperatur wurde am Standort Jülich II, 2004 im Vergleich von behandelten und unbehandelten Parzellen mit zehn Winterweizensorten untersucht. Die Sorten unterschieden sich in der Bestandshöhe, nach Bundessortenliste (BSL) von 3 bis 6 eingestuft und der Entwicklungsgeschwindigkeit, nach BSL von 4 bis 6 eingestuft. Temperatur- und Ertragsunterschiede wurden Sorten übergreifend sowohl zwischen behandelten und unbehandelten Parzellen betrachtet als auch zwischen den Behandlungen (Abb. 96).

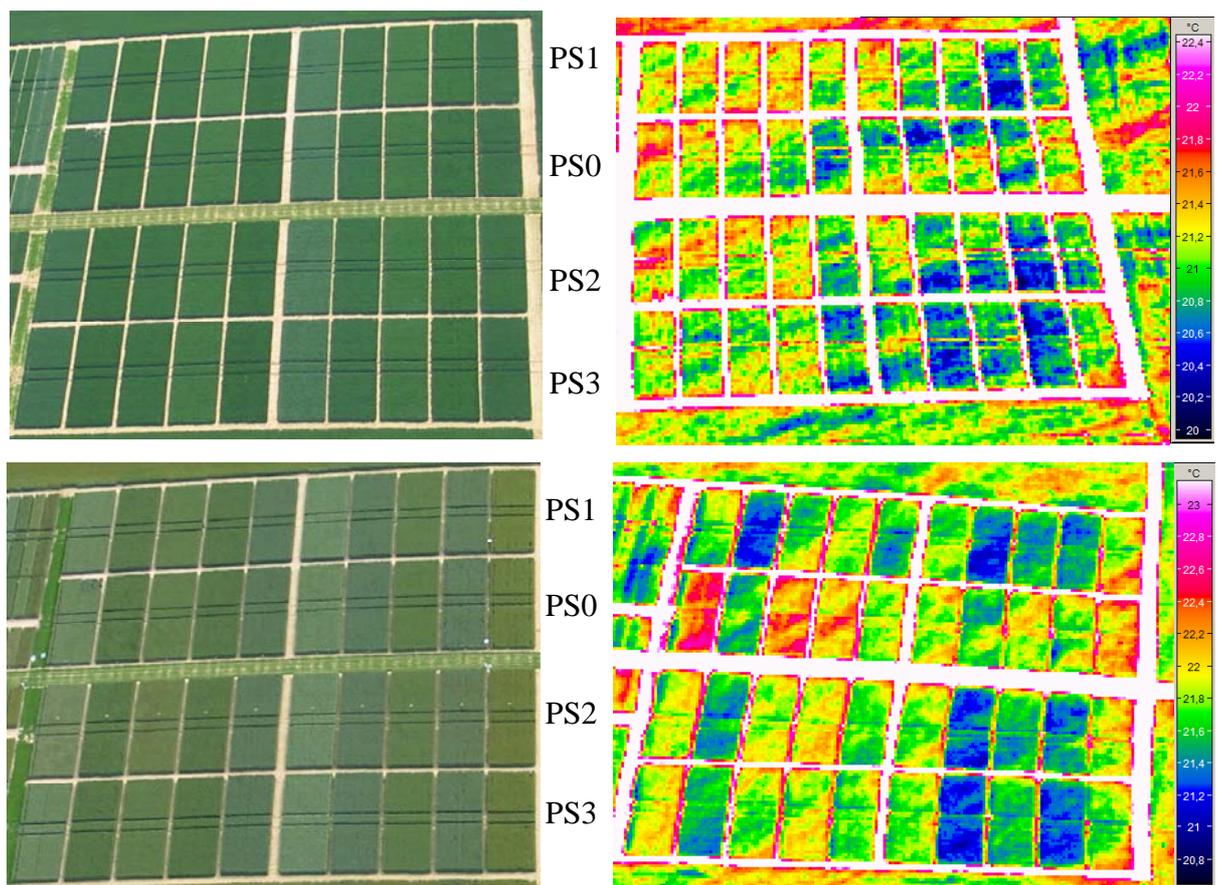


Abb. 96: Oben: Luftbild und Thermogramme der Versuchsanlage zu EC 75. Unten: Luftbild und Thermogramm der Versuchsanlage zu EC 39 (Jülich II, 2004).

Zu EC 39 (Abb. 96, Abb. 97) ergab der Vergleich der durchschnittlichen Absoluttemperaturen zwischen der unbehandelten Kontrolle PS0 und denen der Fungizidbehandlungen PS1, PS2 und PS3 keine signifikanten Unterschiede ($p = 0,05$). In späterem

Stadium zu EC 75 hingegen war der Unterschied des Durchschnitts der Absoluttemperatur aus allen Behandlungen zur Kontrolle signifikant ($p = 0,1$).

Auch trat bei der Betrachtung der durchschnittlichen Temperaturdifferenzen der einzelnen Behandlungen untereinander ein signifikanter ($p=0,05$) Unterschied zwischen den Behandlungen PS1 und PS2 auf.

Zu EC 39 waren die Bestandstemperaturen wesentlich durch ein diagonal durch die Versuchsanlage verlaufendes, streifenförmige Temperaturmuster geprägt (Abb. 96). Diese lokalen Gegebenheiten der Parzellen und die Unterschiede im Habitus der Sorten führten zu EC 39 zu ungerichteten Temperaturunterschieden von $+0,24$ und $-0,24$ K zwischen der Kontrolle und dem Mittel aus den drei Behandlungen je Sorte. Zwischen den drei behandelten Parzellen jeder Sorte traten zu diesem frühen Stadium teilweise größere absolute Temperaturunterschiede auf, mit bis zu $0,33$ K bei Sorte Isengrain, als zwischen dem Mittelwerten der Behandlungen und der Kontrolle.

Zu EC 75 waren die behandelten Parzellen durchgehend für alle Sorten kälter als die Kontrollparzellen, mit Differenzen zwischen $-0,08$ und $-0,65$ K. Zwischen den drei behandelten Parzellen jeder Sorte gab es zu diesem Entwicklungsstadium Unterschiede von bis zu $0,24$ K. Der Vergleich von EC 39 und EC 75 zeigte, dass die behandelten Parzellen der Sorten Maverick, Terrier und Dekan, die zu EC 39 wärmer waren als die unbehandelten Flächen, auch zu EC 75 die geringste Abkühlung gegenüber der Kontrolle aufwiesen (Abb. 97).

Ein Zusammenhang zwischen der Abkühlung der Fungizid behandelten Parzellen gegenüber den unbehandelten und der Anfälligkeit gegen Blattkrankheiten war nicht festzustellen. Die zwei für Braunrost anfälligsten Sorten (Angabe nach BSA) Atoll (7) und Dekan (8) wiesen deutlich unterschiedliche Temperaturdifferenzen auf. Während der Bestand der Sorte Atoll zu den kältesten zählte, war der Bestand von Dekan der wärmste. Die weniger anfälligen Sorten Tommi (2), Maverick (3), Terrier (3) und Biscay (3) zeigten ebenfalls ein uneinheitliches Temperaturniveau. Zwischen hoch und wenig anfälligen Sorten war ebenfalls keine einheitliche Temperaturabstufung zu finden. Abzuleiten ist, dass der Pathogenbefall nicht der ausschlaggebende Faktor für die Bestandstemperatur war.

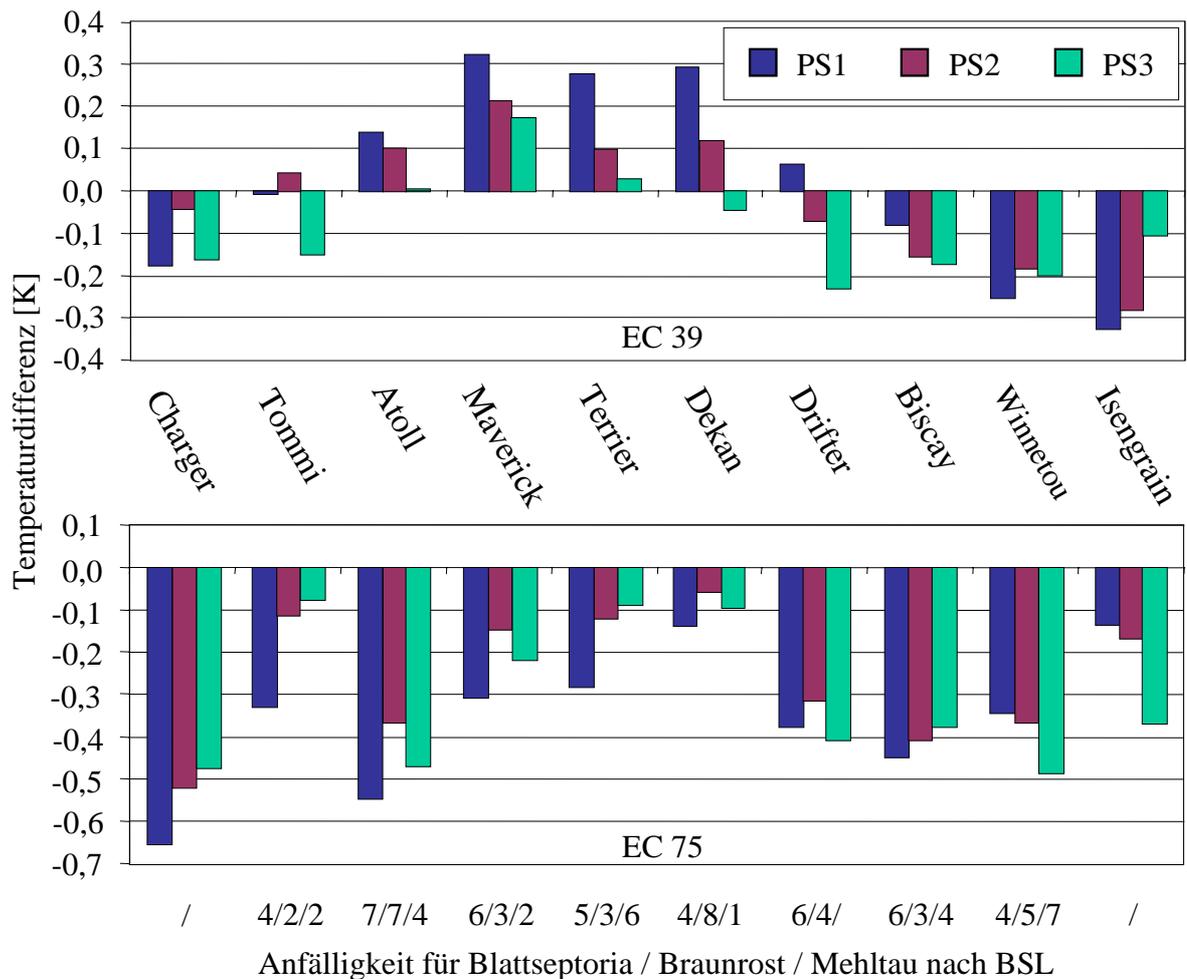


Abb. 97: Temperaturdifferenz zwischen unbehandelter Kontrolle und drei verschiedenen Fungizidbehandlungen zu EC 39 und EC 75 in zehn Sorten mit unterschiedlicher Anfälligkeit für Blattkrankheiten (Jülich II, 2004).

Bestandstemperatur und Ertrag

Die Kornerträge der unbehandelten Kontrollparzellen und der behandelten Varianten sind für die einzelnen Sorten in Abb. 97 dargestellt. Verglichen mit der unbehandelten Kontrolle war der absolute Ertrag mit Fungizidbehandlung zwischen $10,9 \text{ dt ha}^{-1}$ bei der Sorte Tonmi und $28,3 \text{ dt ha}^{-1}$ bei der Sorte Drifter höher als in der unbehandelten Kontrolle. Der Unterschied war für die einzelnen Behandlungen signifikant ($p=0,01$). Nicht signifikant unterschiedlich waren die absoluten Erträge zwischen den Behandlungen ($p=0,1$); ebenfalls nicht signifikant unterschiedlich ($p=0,1$) waren die durchschnittlichen Ertragsdifferenzen der einzelnen Behandlungen zur Kontrolle ($p=0,1$). Ausgenommen die Sorten Biscay und Winnetou, bei denen bei PS1 ein geringerer Ertrag im Vergleich zu den PS2- und PS3-Parzellen auftrat, war aber der Trend zu verzeichnen, dass die Behandlung PS1 bei acht von zehn Sorten einen höheren Ertragszuwachs zur Folge hatte als die zwei anderen Behandlungen.

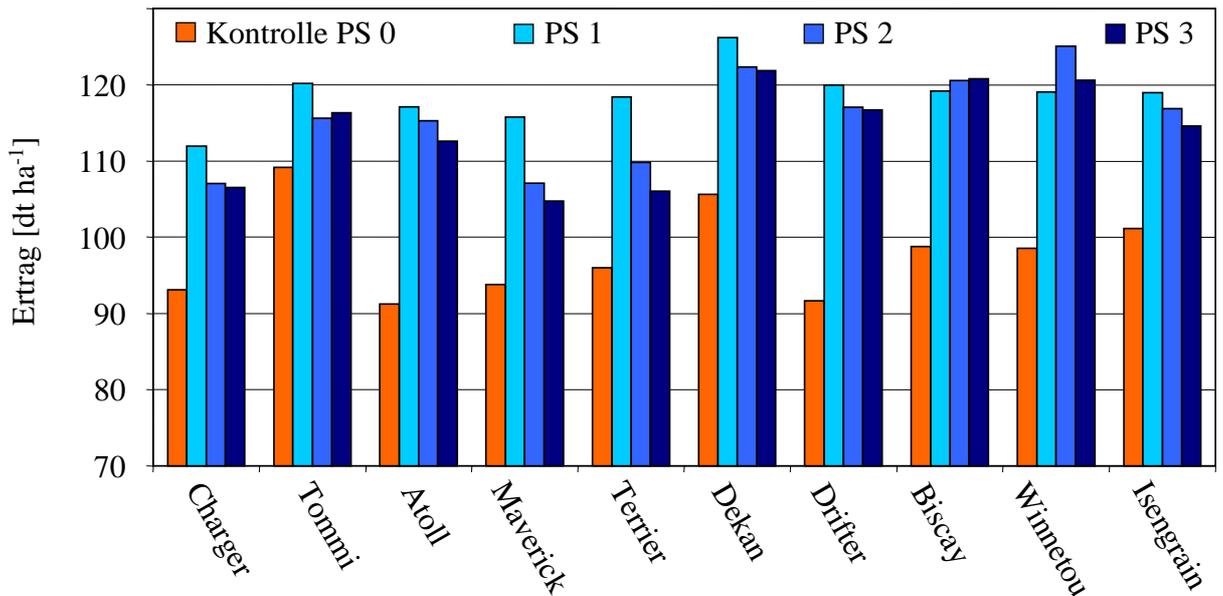


Abb. 98: Erträge von zehn Weizensorten, jeweils auf einer unbehandelten Kontrollparzelle und drei Parzellen mit verschiedenen Fungizidbehandlungen (Jülich II, 2004).

Der Zusammenhang von Abkühlung und Mehrertrag zwischen der unbehandelten Kontrollparzelle PS0 und den Parzellen mit den Behandlungen PS1, PS2 und PS3 wurde für jede Sorte einzeln betrachtet (Abb. 99).

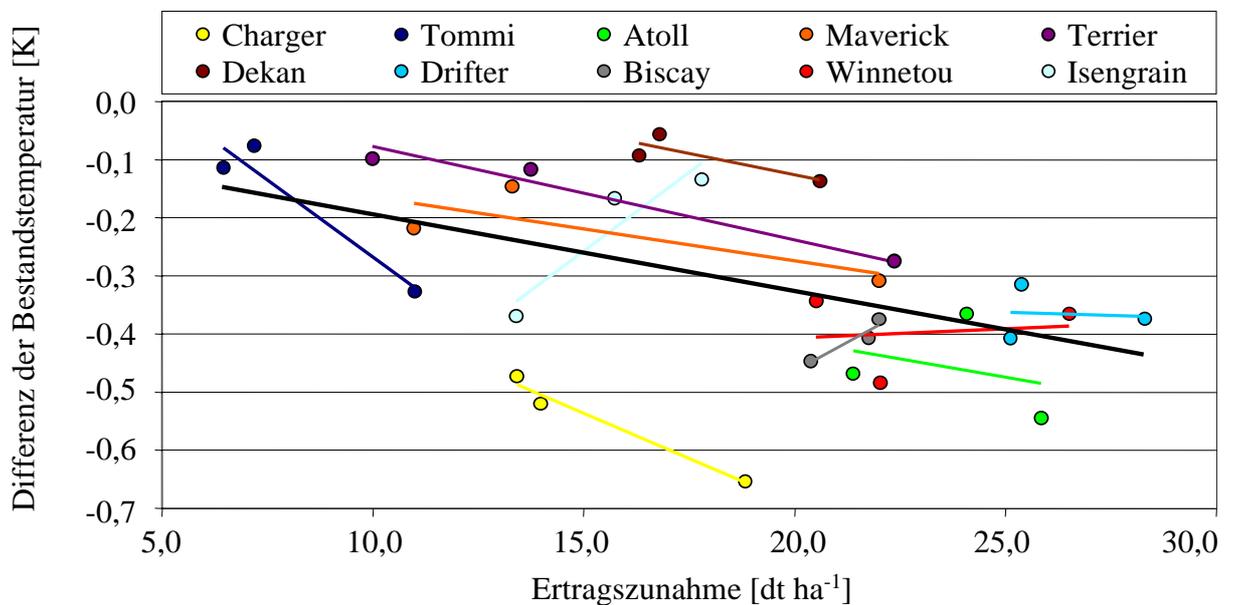


Abb. 99: Zusammenhang von Abkühlung und Mehrertrag von zehn Weizensorten mit jeweils drei verschiedenen Fungizidbehandlungen im Vergleich zur Kontrolle (Jülich II, 2004). Eingezeichnet sind die Trendlinien und der Sorten übergreifende Gesamttrend (schwarze Linie).

Die Einzeltrends waren bis auf die Ausnahmen Isengrain, Biscay und Winnetou ähnlich ausgerichtet. Sie wiesen sowohl für die Abkühlung als auch für den Ertragszuwachs einen großen Streubereich auf, blieben aber, jede Sorte für sich, auf einen bestimmten Bereich begrenzt, was durch Sorteneigenschaften, wie das unterschiedliche Ertragspotential bei einer Fungizidbehandlung und den Sortenhabitus zu erklären ist. Der Gesamttrend wies einen schwachen Zusammenhang auf ($R^2 = 0,25$) und verlief ebenso wie die meisten Einzeltrends in erwarteter Richtung: Eine höhere Abkühlung führt zu höherem Ertrag.

Betrachtet man Ertrag und Temperatur nur für die behandelten Parzellen, so waren weder die Temperatur- noch die Ertragsunterschiede signifikant. Zwischen den Behandlungen PS1 und PS3 traten durchschnittlich aber größere Ertragsunterschiede auf als zwischen PS1 und PS2; mit durchschnittlichen Werten zwischen $4,6 \text{ dt ha}^{-1}$ bzw. $3,0 \text{ dt ha}^{-1}$. Diese Differenz ließ sich aber nicht in einer erwartungsgemäß stärkeren Abkühlung der PS1-Parzellen gegenüber PS3 wiederfinden; der einzige signifikante Temperaturunterschied zwischen den Behandlungen bestand zwischen PS1 und PS2. Entsprechend bestand zwischen PS1 und PS2 ein mittelstarker Zusammenhang von Bestandstemperatur- und Ertragsveränderung ($R^2 = 0,47$). Für PS1 und PS3 war dieser Zusammenhang hingegen schwach ($R^2 = 0,17$). Beide Trends verliefen aber in die erwartete Richtung (ohne Abb.).

4 DISKUSSION

Die digitale Infrarot-Thermografie wurde als Sensor für die berührungslose, flächige Messung der Oberflächentemperatur von Pflanzen und Pflanzenbeständen eingesetzt. Im Labor und im Freiland wurde der Einfluss und damit die Erkennbarkeit von biotischen und abiotischen Stressfaktoren auf die Pflanzentemperatur untersucht. Neben dem Ansatz einer direkten Erkennung von Pathogenbefall wurde die thermografische Erkennung des, für die Pathogenese von Braunrost und Septoriablattdürre am Weizen bedeutsamen Faktors Blattnässe verfolgt. Zur Auswertung der räumlichen Temperaturdaten von Freilandbeständen wurden diese in ein Geoinformationssystem übertragen und mit räumlichen Ertrags-, Klima- und Befallsdaten verglichen.

Temperatur von Pflanzen

Kulturpflanzen sind wechselwarme Organismen. Die Blatttemperatur wird von physikalischen, daher passiven Vorgängen bestimmt, die entlang von Gradienten der Temperatur und des Wasserpotentials ablaufen. Von wenigen Ausnahmen - thermogene Pflanzen, hauptsächlich aus der Familie der Araceae - abgesehen, sind die meisten Pflanzen nicht in der Lage, ihre Gewebetemperatur durch exotherme, physiologische Prozesse anzuheben (Breidenbach et al., 1997) oder konstant zu halten. Die Autoren berechneten einen Temperaturanstieg durch Respiration für die Halmoberflächen von Gerste mit maximal 0,1 K. Ein thermischer Effekt, als Abwärme von Stoffwechselaktivität, ist bei Kulturpflanzen zu vernachlässigen (Chaerle & Van der Straeten, 2001). Pflanzen haben daher keine „normale“ Temperatur.

Blätter haben bei großer Oberfläche bei geringes Volumen. Ihre thermische Wechselwirkung mit umgebenden Wärmequellen wie dem Boden, umgebenden Pflanzen, Luft und Sonneneinstrahlung wird dadurch begünstigt. Von der Sonne empfängt die Pflanze so viel Wärme, dass Kühlungsmechanismen von entscheidender Bedeutung sind, um Gewebeschäden, die ab ca. 45 °C Gewebetemperatur einsetzen, zu vermeiden. So liegt die optimale Temperatur für die Entwicklung von Weizen zwischen 18 und 25 °C (Hatfield, 1990). Die Abgabe von Wärme, die aus absorbierte Sonneneinstrahlung stammt, geschieht vornehmlich als Konvektionswärme und als evaporative Wärmeabgabe (Taiz & Zeiger, 2000). Die Abgabe der Konvektionswärme ist nur möglich, wenn die umgebende Luft kälter ist als das Blatt. Die evaporative Wärmeabgabe beruht auf einer Abkühlung durch die Verdunstung von Wasser. Sie ist daher umso effektiver, je mehr Wasser über die Blätter verdunsten kann. Die Bedeutung der Blattkühlung zeigten Lu et al. (1998) bei Untersuchungen an Weizen und Baumwolle, die den Zusammenhang der Fähigkeit zur Blattkühlung durch Transpiration und dem Ertrag behandelten. Wigley & Clark (1974) maßen

Temperaturunterschiede von 1 bis 5 K zwischen Blattzonen mit hoher und geringer Transpiration. Der dritte Weg der Wärmeabgabe erfolgt über langwellige Strahlung; elektromagnetische Wärmestrahlung, wie sie jeder Körper mit einer Temperatur über 0 K an seiner Oberfläche abgibt.

Methodik der Thermografie

Multispektrale Methoden der Fernerkundung beruhen auf den reflektorischen Eigenschaften von Pflanzen und Pflanzenbeständen. Sie sind daher sensitiv für Veränderungen der Strukturen im Blattgewebe (Nilsson & Johnsson, 1996). Bei der Thermografie hingegen werden emittierte Wellenlängen in einem begrenzten Wellenlängenbereich von 8 bis 12 μm erfasst. Thermische Reflektionen sind dabei unerwünscht, denn sie entstammen nicht der Oberfläche, deren Temperatur gemessen werden soll. Sie sollten so weit wie möglich, durch Anpassung des Emissivitätswertes an die Objektoberfläche und durch einen entsprechenden Versuchsaufbau, berücksichtigt werden. Die Emissivität (ϵ) wurde bei allen Messungen im Labor und im Freiland auf 1,0 gestellt, obwohl der Wert für Pflanzenblätter bei ca. 0,96 und für Pflanzenbestände, wie Rasen bei 0,98 liegt (Häckel, 1999). Grund dafür war, dass die bei $\epsilon < 1,0$ zu berücksichtigende Umgebungstemperatur nicht verlässlich angegeben werden konnte; die Eingangs- und Ausgangswinkel von Reflektionen auf Blättern waren nicht beschreibbar. In Konsequenz sind die absoluten gemessenen Temperaturen mit einem systematischen Fehler behaftet. Bei einem zu hohen Emissionsfaktor (1,0) und einer Umgebungstemperatur, die kälter ist als das Objekt, wird die Objekttemperatur unterbewertet. Ist die Umgebungstemperatur wärmer als das Objekt, so wird die Objekttemperatur überschätzt (Infratec, 2002a). Bei Labormessungen kann davon ausgegangen werden, dass die Umgebungstemperaturen nahe der Objekttemperatur waren. Bei einer wahren Objekttemperatur von 20 °C und einem fälschlicherweise angenommenen $\epsilon = 1,0$ bei einem wahren $\epsilon = 0,95$, beträgt der Messfehler bei einer Differenz der Umgebungstemperatur von 10 K ca. 3 % der wahren Temperatur. Da die Aussagekraft absoluter Temperaturen von Pflanzenbeständen aber sehr gering ist und stattdessen Differenzen zwischen Messwert und einem Referenzwert bewertet wurden, ist der Fehler bei Vergleichen von Messwerten und vergleichbaren Bedingungen nicht von Bedeutung. Im Freiland ist die Bestandstemperatur unterschätzt worden, wenn als Hintergrund der Himmel mit einer vergleichsweise sehr geringen Strahlungstemperatur, Fuchs & Tanner (1966) nannten -4 °C, angenommen wird.

Mikroklima und Pathogenbefall

Nach Hatfield (1990) treten die meisten Pilzkrankheiten nicht in gleichmäßiger Verteilung in einem Bestand auf. Waggoner & Aylor (2000) sprechen von verwirrenden Mustern und

zeitlichem auf und ab von Infektionswellen. Die Verteilung der Infektionen ist von der Verteilung der Infektionsquellen und der Beweglichkeit der Sporen des Pathogens abhängig. Untersuchungen zu der Verteilung von Blattlaus übertragenem LNVY (*Lettuce necrotic yellows virus*) und bodenbürtig durch *Oplidium brassicae* übertragener LBVD (Lettuce big-vein disease) in einem Salatfeld von ca. 12 x 25 m zeigten deutlich unterschiedliche Verteilungsmuster und Befallsschwerpunkte. Die Befallsstärke mit LNVY war stark abhängig von der Entfernung zu der Blattlausquelle, während die Ausbreitung von LBVD durch die Zoosporenbeweglichkeit begrenzt war. Auf durch luftbürtige Sporen übertragene Pilzkrankheiten sind die Ergebnisse dieser beiden Viruserkrankungen nicht übertragbar, da bei der Ausbreitung von Sporen von einer relativ gleichmäßigen Verteilung auszugehen ist. Befallsunterschiede wären demnach nicht von der Anwesenheit von Sporen, sondern hauptsächlich von den lokalen Infektionsbedingungen abhängig (Coutts et al., 2004).

Damit es zu Teilschlag relevanten Befallsunterschieden in einem Pflanzenbestand kommen kann, der signifikant größer ist als die Variabilität in einer homogenen Bestandszone, muss sich das Mikroklima in ausreichendem Maße lokal unterscheiden. Aus den Versuchen zur Keimungsrate und dem Keimschlauchwachstum von Uredosporen von *Puccinia triticina* traten nennenswerte Entwicklungsunterschiede zwischen Temperaturunterschieden ab ca. 5 K auf. Ein Temperaturunterschied von 3 K, bei 15 zu 18 °C hatte kaum einen Effekt auf die Keimrate. Eversmeyer et al. (1988) stellten die größten Unterschiede in der Infektionsgeschwindigkeit zwischen der optimalen Temperatur von ca. 16 °C und der nicht optimalen Temperatur von 12 °C fest. Keine Unterschiede fanden die Autoren bei der Keimrate bei 14, 18 und 20 °C. Demnach wären bei nicht optimalen Bedingungen lokale Temperaturunterschiede von mindestens 5 K nötig, um unterschiedliche Befallsstärken von Braunrost zu bedingen. In dem homogenen Weizenbestand wurde aber nur ein maximaler, lokaler Temperaturunterschied von 0 bis +3,0 K gemessen. Auf den bonitierten Flächen traten Blattkrankheiten in homogenen Beständen relativ gleichmäßig auf.

Variationen der Befallsstärke waren dabei im kleinräumigen Bereich von 1 bis 3 m Ausdehnung zu finden. In dem heterogenen Bestand betrug der Unterschied der Lufttemperatur in der Zone mit geringer Bestandsdichte zu der mit hoher Bestandsdichte zwischen -1,1 und +5,8 K. Auf dieser Parzelle waren großräumige Befallsunterschiede von Blattkrankheiten zu finden. Vermutlich waren die Lufttemperaturunterschiede in den Bestandsdichten aber weniger der Grund für die Befallsstärke, als viel mehr die Folge unterschiedlicher Bestandsdichten, die durch Unterschiede des Bodens und der Wasserversorgung hervorgerufen wurden. Die dadurch bedingte unterschiedliche Bestandsvitalität ist somit als wesentlicher Grund für die Unterschiede der Befallsstärken zu nennen. Große Unterschiede der Lufttemperatur traten besonders tagsüber auf, allerdings bei für die Uredosporenkeimung zu geringem Feuchtigkeitsniveau. Nachts war die

Lufttemperatur in beiden Zonen ähnlich niedrig. Entsprechend trat hohe Luftfeuchtigkeit nachts auf. Dabei unterschieden sich die Werte in den unterschiedlichen Bestandsdichten am aber kaum. Festzuhalten ist, dass durch diese beiden Klimaparameter kaum Bedingungen für Unterschiede im Infektionsverlauf von Braunrost und Blattseptoria gegeben waren. Entweder waren Luftfeuchtigkeit und Temperatur für eine Infektion zu niedrig, oder die lokalen Unterschiede waren zu gering um Befallsunterschiede zu verursachen. Zu einer unterschiedlichen postinfektionellen Pathogenese können Temperaturunterschiede, wie sie hier gemessen wurden, aber beitragen. Voraussetzung ist, dass Pathogenese fördernde Parameter dauerhaft in gleicher Ausprägung auftreten, da eine Krankheit in mehreren Generationen und in verschiedenen Pathogenesestadien gleichzeitig auftritt. In einem homogenen Bestand waren nur geringe lokale Klimaunterschiede zu erwarten. Abzuleiten ist, dass Unterschiede im Befallsrisiko nur durch dramatische Unterschiede im Bestand, z.B. durch Beschattung und Topografie zu erwarten sind. In den Messungen aus den Jahren 2003 und 2004 ließ sich diese Annahme bestätigen. Im homogenen Bestand wurde zu fünf Aufnahmetermen Temperaturunterschiede zwischen der kältesten und wärmste Zone (16 x 30 m) von 0,6 bis 1,5 K gemessen. In einem heterogenen Bestand wurden etwas höhere Bestandstemperaturunterschiede zwischen den Zonen mit unterschiedlicher Bestandsdichte von 0,8 bis 2,2 K gemessen. Vergleichbare Werte von 0,2 bis 2,4 K traten zwischen unterschiedlichen Bestandsdichten auch im heterogenen Bestand auf. Alle Messungen erfolgten tagsüber, zu der Zeit, zu der die größten Lufttemperaturunterschiede im Bestand auftraten. Der Vergleich von Lufttemperatur und Temperaturdifferenz zwischen unterschiedlichen Bestandsdichten zeigte in der Tendenz einen positiven Zusammenhang, der durch die unterschiedliche Transpirationsfähigkeit der Bestände und den damit verbundenen unterschiedlichen Einfluss der Lufttemperatur auf die Bestandstemperatur zu erklären ist. Der Ausreisserwert der Temperaturdifferenz zu EC 37 könnte auf eine kurzfristig erhöhte Sonneneinstrahlung zurückzuführen sein, die den Bestand mit geringer Biomasse inklusive des trockenen Bodens stärker erwärmte als den Bestand mit hoher Biomasse, ohne aber die Lufttemperatur ebenfalls zu erhöhen.

Die Bestandstemperatur wird durch Messung an den obersten, in Sicht liegenden Blättern gemessen, deren Temperatur aber durch einen konvektiven und emissiven Temperaturfluss an tiefer liegenden Blattschichten und den Boden gekoppelt ist. Als Ansatz einer Modellierung von Klimabedingungen innerhalb des Bestandes wurden die vertikale Verteilung von Luftfeuchtigkeit und Lufttemperatur in Sorten mit unterschiedlichem Habitus untersucht. Dies zeigte den Einfluss des Bestandshabitus auf die Verteilung des Mikroklimas im Bestand. Huber & Gillespie (1992) wiesen auf einen Einfluss der Blattposition auf die Blattnässedauer durch Tau hin. Einen Abtrocknungsverlauf in Abhängigkeit von der Blattetage zeigte auch die thermografische Beobachtung der Abtrocknung eines Weizenbestandes unter kontrollierten

Bedingungen. Dieses erschwert die Interpretation der Bestandstemperatur. Schon weil es kein einheitliches Mikroklima in einem Bestand gibt, ist eine Ableitung der Blattnässedauer durch eine Bestandstemperaturmessung nicht möglich. Im Prinzip könnte die Oberflächentemperatur eines Bestandes als ein Pol bei der Berechnung der Klimabedingungen zwischen Boden und Luft dienen, zumal der Sprung von der Luft- zur Blatttemperatur überflüssig wird, worauf auch Huber & Gillespie (1992) hinweisen. Allerdings wird durch die abbildende Thermografie nicht die reine Oberflächentemperatur der Pflanzen gemessen, sondern die des Bestandes. Die vertikale Verteilung der rel. Luftfeuchtigkeit unterschied sich im Tagesverlauf zwischen den Sorten, wobei im erektophilen Bestand große Unterschiede in der rel. Luftfeuchtigkeit in Bodennähe und darüber auftraten, während in der planophilen und breitblättrigen Sorte solch ein Trend nicht auftrat. Ähnlich dem tageszeitabhängigen Auftreten von Luftfeuchtigkeitsunterschieden in unterschiedlichen Bestandsdichten, traten die größten Unterschiede in der vertikalen Verteilung bis $\Delta = 20\%$ bei relativ geringem Gesamtniveau (zwischen 50 und 70%) auf. Dabei war die Luftfeuchtigkeit in Bodennähe am höchsten. Selbst zwischen Bodennähe und Überbestandshöhe waren nur sehr geringe Unterschiede zu messen. Der gegenläufige Zusammenhang von Lufttemperatur und rel. Luftfeuchtigkeit war in den drei Bestandshöhen festzustellen. Erwartungsgemäß war die Lufttemperatur über dem Bestand variabler als im Bestand, d.h. hier wurde eine Erwärmung durch den Sonnenaufgang als erstes registriert. Je tiefer im Bestand gemessen wurde, umso träger war die Reaktion. Dies deutet darauf hin, dass kurzfristige Bestandstemperaturveränderungen weitgehend auf das Blätterdach des Bestandes beschränkt sind, was einen Schluss von der Bestandstemperatur auf das Klima im Bestand erschwerte.

Nach Derksen (1974) sind bei der Charakterisierung des lokalen Mikroklimas kurzfristige Extrema von Bedeutung, durch die sich lokale Unterschiede ergeben. Dieses traf auch auf die Unterschiede im Mikroklima zwischen fünf Punkten im Bestand, Standort Klein Altendorf, 2004 zu. Die Durchschnittswerte der Klimaparameter unterschieden sich nur minimal, während die aufsummierten, stündlichen Abweichungen vom Gesamtdurchschnitt erheblich unterschiedliche Klimacharakteristika zeigten. Derksen (1974) empfahl thermografische Aufnahmen zu Zeitpunkten, zu denen solche Klimaunterschiede auftreten. Der Zeitpunkt, an dem solche starken, lokalen Unterschiede auftreten, ist abhängig vom Klimaparameter. Die größten, lokalen Unterschiede in der rel. Luftfeuchtigkeit traten gegen Mittag auf, verglichen mit abends, nachts und am frühen Morgen. Das Feuchtigkeitsniveau war zu dieser Zeit aber vergleichsweise niedrig. Blattnässe trat unregelmäßig als Tau in den frühen Morgenstunden oder nach Niederschlägen auf. Aufsummiert über die gesamte Messdauer zeigten sich zwischen den lokalen Unterschieden in der Blattnässedauer teilweise Parallelen zu den Unterschieden in Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit. Der wärmste Punkt war auch der

trockenste (geringste Summe der Blattnässedauer), der kälteste Punkt der feuchteste. Zwei weitere Punkte waren ähnlich trocken, passend dazu war die Luftfeuchtigkeit an beiden unterdurchschnittlich. Nicht in diesen Trend passten die Luftfeuchtigkeit an zwei Messpunkten, an denen die Blattnässedauersumme zu hoch bzw. zu gering war. Allerdings waren die Unterschiede in der Blattnässedauer relativ gering. Die Unterschiede in der rel. Luftfeuchtigkeit und der Lufttemperatur zwischen den Messpunkten wiesen eine wesentliche größere Variabilität auf. Daraus ist zu schließen, dass die üblichen Klimaparameter nur bedingt zur Abschätzung von Blattnässedauer geeignet sind. In verschiedenen Prognosemodellen wurde die Blattnässedauer recht zuverlässig über die rel. Luftfeuchtigkeit geschätzt (Chtioui et al, 1997; Gleason et al, 1994; Wilks & Shen, 1991). Messungen von über 90 % wurden dabei mit Blattnässe gleichgesetzt. Allerdings wurden dabei viel größere Räume betrachtet als in den Feldklimamessungen dieser Arbeit. Auf die Messwerte in einem homogenen Bestand übertragen, führte eine Unterscheidung von Blattnässe und keiner Blattnässe anhand der rel. Luftfeuchtigkeit nicht zu sinnvollen Ergebnissen; zu häufig lag die Luftfeuchtigkeit bei gemessener Blattnässe unter dem Schwellenwert bzw. über dem Schwellenwert bei gemessener Trockenheit. Der Zusammenhang von Luftfeuchtigkeit und gemessener Blattnässe war zu gering. DeVallavieille-Pope et al. (1995) untersuchten den Einfluss von Unterbrechungen der Mindestblattnässedauer für eine Infektion mit *Puccinia triticina*. Je nach Temperatur stellten sie eine erforderliche Mindestblattnässedauer von 2 Stunden bei 25 °C bis zu 8 Stunden bei 5 °C fest. Zwischen den beiden Temperaturextremen traten erheblich Unterschiede im Infektionserfolg auf. Im Temperaturbereich zwischen 10 und 20 °C war der Infektionserfolg in Abhängigkeit von der Blattnässe vergleichsweise einheitlich. Wie von den Autoren gezeigt, führte eine Unterbrechung der Blattnässe von einer Stunde nach der Uredosporenkeimung zu einer Abtötung der gekeimten Sporen. Auch wenn ein solches Szenario unter Freilandbedingungen kaum auftreten wird, so zeigt es, wie genau der Anspruch eines Pathogens an eine bestimmte Blattnässedauer definiert ist. Für eine Überwachung ist daher eine zeitliche Auflösung von mindestens 30 Minuten erforderlich ist.

Die lokalen Unterschiede in der Blattnässe in einem homogenen Weizenbestand betragen im Extremfall bis zu 133 Stunden, entsprechend 34% länger als am trockensten Messpunkt. Diese Unterschiede sind als Pathogenese relevant zu bewerten. Noch größere Unterschiede in der lokalen Blattnässedauer von bis zu 256 Stunden, entsprechend 48% länger, traten in einem anderen homogenen Weizenbestand auf. Der trockene Sommer 2003 erklärt, dass im heterogenen Bestand wesentlich geringere Unterschiede auftraten. Von einem regelmäßig oder täglich auftretenden Unterschied in den Blattnässedauern kann aber in keinem der Fälle gesprochen werden. Bei einer täglichen Betrachtung der lokalen Unterschiede der Blattnässedauer traten Unterschiede zwischen 0 und 24 Stunden auf. Die Häufigkeitsverteilung von Blattnässeperiodendauern zeigte, dass alle fünf Messpunkte im Zeitspektrum

gleichmäßig vertreten waren. Eine Häufung besonders langer oder kurzer Perioden konnten keinem speziellen Punkt zugeordnet werden. Lokale Unterschiede in der Blattnässe sind von Bedeutung, wenn sie im Verlauf von kurzen Blattnässeperioden auftreten. Zwei Blattnässedauern von 14 bzw. 18 Stunden im Bestand werden nicht zu lokalen Befallsunterschieden von Braunrost führen, Blattnässedauern von 1 bzw. 5 Stunden hingegen schon. Entsprechend ist dem Faktor Blattnässedauer auch ein größerer Einfluss auf einen teilflächig unterschiedlichen Braunrostbefall zuzuschreiben als dem direkten Einfluss der Lufttemperatur. Indirekt könnten geringe Temperaturunterschiede, wenn sie sich um den Taupunkt bewegen, durch die Bildung von Blattnässe durch Tau aber einen entscheidenden Einfluss auf die Infektion mit Braunrost haben.

Lovell et al. (2004) untersuchten den Einfluss der Temperatur auf die Dauer der latenten Periode von Blattseptoria an Weizen. Eine ausreichend lange Blattnässeperiode voraussetzend, wurde dabei ein wesentlich längerer Entwicklungszeitraum betrachtet als bei den Untersuchungen zu Braunrost durch DeVallavieille-Pope et al. (1995). Temperaturen unter 20 °C führten zu einer überproportionalen Verlängerung der latenten Phase, so dass bei Temperaturen zwischen 10 und 15 °C eine Verzögerung des Befalls von ca. 9 Tagen auftrat. Da sich mikroklimatische Unterschiede zwischen den Messpunkten im homogenen Bestand besonders in den kumulierten Unterschieden zeigten, ist eine lokal unterschiedliche Pathogenese von Blattseptoria über den Parameter kumulierte Temperatur*Zeit abzuschätzen; wie von Lovell et al. (2004) berechnet. Hier summierte sich die kumulierte Temperaturdifferenz zwischen zwei Messpunkten auf ca. 570 Gradstunden über eine Messdauer von fast zwei Sommermonaten. In Anbetracht einer notwendigen Temperaturstundensumme von ca. 300 Grad*Stunden ab Infektion bis zur Ausbildung von 25 bis 50 % der schließlich gebildeten Läsionen ist der größte, in diesem Feld gemessene Temperaturunterschied gering. Auf Grund der Temperaturunterschiede kann somit auch für Blattseptoria nicht von einem lokal unterschiedlichen Befallsrisiko im homogenen Bestand gesprochen werden.

Die Erfassung kumulierter Klimaparameter als Summe kurzfristiger Mikroklimaphänomene oder mittelfristiger Bestandsparameter, wie Blattnässe mittels räumlich auflösender Thermographie, setzt eine dauerhafte Überwachung des Bestandes voraus, was mit erheblichen technischen Schwierigkeiten verbunden ist. Ersatzweise wäre eine Identifizierung von Zonen mit regelmäßig auftretenden Phänomene z.B. Taubildung oder der Abtrocknung von Niederschlägen denkbar. Aus einem einzelnen Bild kann die Frage nach der Blattnässedauer aber nicht beantwortet werden. Blattpathogene benötigen vergleichsweise langfristige, konstante klimatische Zustände (Blattnässe oder Temperatur) von einigen Stunden bis zu Tagen für die Entwicklung einer stabilen Wirt/Parasit-Interaktion (DeVallavieille-Pope et al., 1995). Wenn sich eine lokal unterschiedliche Blattnässedauer in

Folge zonal unterschiedlicher Abtrocknungsbedingungen aber auf ortstreue z.B. topografische Eigenschaften des Feldes zurückführen lässt, wie etwa in einem heterogenen Weizenbestand, wären nur wenige thermografische Aufnahmen zu ausgewählten Zeitpunkten notwendig, um Risikozonen zu erkennen. Thermografischen Aufnahmen zeigten die Ortsgebundenheit und Wiederfindbarkeit solcher Zonen im Verlauf der Vegetationsperiode. Abhängig von den Klimabedingungen zum Aufnahmezeitpunkt variierten zwar die Temperaturunterschiede, Abstufungen blieben aber erhalten.

Wassertropfen auf Blättern sind für ein Thermografiesystem durch ihre Verdunstungskälte erkennbar. Die Verdunstungsrate ist direkt abhängig vom Wassersättigungsdefizit der umgebenden Luft. Während Blattnässe im Labor und im Gewächshaus bei geringer relativer Luftfeuchtigkeit durch Temperaturunterschiede bis zu 5,0 K deutlich zu identifizieren waren, ist es bei hoher rel. Luftfeuchtigkeit nur bedingt möglich, eine nasse Zone anhand ihrer Bestandstemperatur zu identifizieren; ein nasses Blatt erfährt bei hoher Luftfeuchtigkeit nur eine geringe Abkühlung gegenüber trockenen Blättern. Um die Identifizierung von tropfbarem Wasser auf Blättern in einem Getreidefeld als Voraussetzung für die Abschätzung einer Infektionswahrscheinlichkeit durch phytopathogene Pilze zu nutzen, konnten zwei Ansätze gezeigt werden. Die Bestandstemperatur einer nassen und einer trockenen Weizenparzelle im Freiland konnte zeitgleich verglichen werden. Durch die Blattnässe sank die durchschnittliche Bestandstemperatur der nassen Parzelle um 0,7 K gegenüber dem trockenen, umgebenden Bestand. Gegenüber der Vergleichsparzelle betrug die Abkühlung aber nur 0,5 K, da die Vergleichsparzelle in einer Zone mit allgemein geringerer Bestandstemperatur lag. In Anbetracht der lokalen Variabilität der Bestandstemperatur im umliegenden trockenen Bestand von bis zu 1,3 K kann der Temperaturunterschied zwischen nass und trocken nicht als alleiniges Erkennungsmerkmal verwendet werden. Hinzu kommt, dass bestimmte nasse Bereiche weniger als 0,1 K kälter waren als bestimmte trockene Bereiche, was eine Identifizierung unbekannter Zonen erschwerte. Der zweite Erkennungsansatz betrachtet die Veränderung der Heterogenität der Bestandstemperatur durch ein Regenereignis. Zwanzig Minuten nach einem Niederschlag von 2 mm stieg die kleinräumige Temperaturspanne von 0,4 auf bis zu 1,5 K. Ein ähnlicher Effekt war auch bei der Abtrocknung eines nassen Weizenbestandes in einem Pflanzcontainer zu vermerken. Im Gewächshaus konnte die Abtrocknungsdauer thermografisch in hoher zeitlicher Auflösung erfasst werden. Dabei führte die applizierte Blattnässe sofort zu einem erheblichen Absinken der Bestandstemperatur. Der Temperaturanstieg im Verlauf der Abtrocknung erfolgte in einer asymptotischen Kurve. Durch die geringe Entfernung zum Objekt war die Abtrocknung in unterschiedlichen Bestandsebenen anhand kalter Zonen zu erkennen. Die schnellere Abtrocknung höher gelegener Blätter führte zu einer erhöhten Heterogenität der Bestandstemperaturen während der Abtrocknung, verglichen mit dem trockenen Bestand.

Eine Situation, wie sie unter kontrollierten Bedingungen gestellt wurde, tropfnasser Bestand neben trockenem Bestand, kommt unter natürlichen Bedingungen nicht vor. Für die Erfassung von Bestandszonen mit unterschiedlicher Blattnässedauer ist besonders die Phase fortgeschrittener Abtrocknung von Interesse. Gerade dann ist die Blattnässe als Temperaturunterschied aber nur noch schwer zu erfassen, da das Temperatursignal durch Blattnässe im thermischen Hintergrundrauschen verschimmt. Aus 100 m Entfernung und mehr können einzelne $0,5 \text{ mm}^2$ große, $-2,0 \text{ K}$ bis $-0,5 \text{ K}$ kältere Blattzonen nicht aufgelöst werden.

Für eine Identifizierung von Risikozonen ist auch die Verteilung relevanter Parameter im Bestand entscheidend. Wenn in sehr kleinen Abständen große Unterschiede in der Blattnässe auftreten, so könne diese nicht berücksichtigt werden, bzw. die Daten des Blattnässefühlers können keine Aussage über seine weitere Umgebung machen. Ebenso ist es problematisch, wenn lokale Bedingungen relativ zueinander nicht stabil sind, etwa wenn mehrere Faktoren Einfluss nehmen. Dann müsste jedes einzelne Blattnässeereignis erfasst werden. Die räumliche Verteilung der über zwei Monate kumulierten Blattnässedauer an acht Messpunkten in einem homogenen Weizenfeld zeigte keinen Zusammenhang. Zwischen den vergleichsweise geringern Differenzen der Blattnässedauer an den Messpunkten (0 bis 17 %) und dem Abstand der Messpunkte (8 bis 137 m) im Feld ließ sich kein Zusammenhang ermitteln. Daher ist anzunehmen, dass die gemessenen Unterschiede der Blattnässedauer auf homogenen Flächen auf sehr kleinräumige Gegebenheiten zurückzuführen sind.

Methodik der Blatttemperaturmessung

Die Bestimmung der Blatttemperatur von Weizenpflanzen im Labor war wegen der komplexen Form der Gesamtblattfläche problematisch. Durch die hohe Fragmentierung der Blattfläche hatte der große Anteil von Mischtemperaturpixeln im Übergangsbereich von Blattoberfläche zum Hintergrund, was sich als glockenförmiger Verlauf des Temperaturprofils von Weizenblättern zeigte, einen großen Einfluss auf die ermittelte Blatttemperatur. Anders als bei Pflanzen mit großflächiger, zusammenhängender Blattform, z.B. Bohnen, stellte die Verarbeitungssoftware IRBIS PLUS keine geeignete Funktion zur Verfügung, um die Temperatur stark fragmentierter Flächen zu bestimmen (Infratec II, 2002). Die Möglichkeit maximal 99 Messpunkte auf den Formen der Blätter zu verteilen war nicht sinnvoll, da mit dem Platzieren der Messpunkte eine Auswahl der Blattregion getroffen wurde. Diese war geprägt von der Neigung, den Messpunkt auf die Mitte der am besten zu erkennenden Blätter zu platzieren. Auch gibt ein Messpunkt nur die Temperatur eines einzigen Pixels aus. Die zweite mögliche Methode, Polygone über die Blätter zu legen, war ebenfalls nicht sinnvoll in Anbetracht der limitierten Anzahl von Polygoneckpunkten, der

Schwierigkeit die Grenze zwischen Blatt und Hintergrund zu erkennen und dem Zeitaufwand, der bei der Auswertung von Aufnahmeserien die Möglichkeiten überstieg. Für die Bestimmung der Blatttemperatur hätte die Software zwischen Pixeln, die zum Hintergrund gehören und solchen, die zur Blattfläche gehören, unterscheiden müssen. Um diesen Schritt digital vornehmen zu können, wurde als Differenzierungsfaktor die Temperatur verwendet. Dazu musste ein Temperaturkontrast zwischen Blatt und Hintergrund geschaffen werden, der garantierte, dass der kälteste Blattpixel wärmer war als der wärmste Hintergrundpixel. Ein erwärmter Hintergrund war nicht sinnvoll, da Wärme entlang eines Gradienten auf Objekte, hier der Pflanze übergeht (Taiz & Zeiger, 2000). Daher wurde in dieser Arbeit der Hintergrund gegenüber der Pflanze abgekühlt. So war es im Prinzip möglich, die Blattfläche in einem Thermogramm in wiederholbarer Weise zu bestimmen und aus dem entsprechenden Prozentsatz wärmster Pixel die Blatttemperatur zu mitteln. Dieser Weg wäre theoretisch auch mit einem Farbkontrast in einem Foto mit dem gleichen Bildausschnitt, wie der des Thermogramms, möglich gewesen. Einfacher ist es Thermogramm und optisches Bild anhand von Passpunkten übereinander zu legen, wie von Alchanatis et al. (2005) im Freiland demonstriert wurde. Die Funktion der Messmethode von fragmentierten Blattflächen wurde an einer Form aus weißem Papier mit unterschiedlichen, definierten Fragmentierungsgraden untersucht. Auf diese Weise konnten die wahren Temperaturen, sowohl des Hintergrundes, als auch der simulierten Blattfläche direkt gemessen und mit den berechneten Temperaturen verglichen werden. Dabei zeigte sich, dass die Methode bei geringem Fragmentierungsgrad Werte lieferte, die sehr nahe am wahren Temperaturwert lagen. Sobald die Fläche aber fragmentierter wurde, also der Form der Blattfläche einer Weizenpflanze näher kam, nahm die Abweichung deutlich zu. Dass die Abweichung auch von der Höhe des Temperaturkontrastes zwischen Objekt und Hintergrund abhing, zeigte, dass sie durch die Anzahl von Pixeln geprägt wurde, die eine gemischte Temperaturinformation von Blatt und Hintergrund enthielten. Somit trat bei dieser Methode ebenfalls das Problem der genauen Differenzierung von Blatt und Hintergrund auf, das auch die Bestimmung der Blatttemperatur durch manuelles Setzen von Messflächen störte. Der Vorteil der digitalen Verarbeitung lag aber in der Reproduzierbarkeit des berechneten Temperaturwertes und dem Zeitgewinn bei der Auswertung.

Alternativ zu der auf grafischer Ermittlung der Blattfläche basierenden Trennung von Hintergrund und Objekt wurde ein messbarer Wert getestet, nämlich die höchste Hintergrundtemperatur. Dadurch sollte ein möglicher Fehler bei der grafischen Bestimmung der Blattflächen ausgeschaltet werden. Allerdings wurde die wahre Temperatur mit der alternativen Trenntemperatur durchgehend weniger gut getroffen. Die Trenntemperatur war bei der alternativ getesteten Methode wesentlich geringer als bei der grafischen, so dass es zu einer Verringerung der gemessenen Blatttemperatur kam, weil mehr kältere Mischtemperatur-

pixel in die Blattemperatur einfließen als bei der grafischen Methode. Daher wurden die Temperaturmessungen an Weizenblättern mit der grafischen Methode durchgeführt. Für den Vergleich von Messungen unter gleichen Bedingungen war der dabei auftretende Messfehler nicht von Bedeutung. Auch bei dem Vergleich der Abweichung von einer gemessenen Referenztemperatur wurde durch den Messfehler nur das Niveau der Differenzen verschoben. Im Labor erhöhte sich durch die Variation der Aufnahmeorientierung die Streuung zwischen berechneten Temperaturen derselben Weizenpflanze um den Faktor vier. Vorausgesetzt, dass die wahre Blattemperatur unabhängig von der Aufnahmeorientierung ist, war die deutlich erhöhte Streuung auf die unterschiedlichen Blattflächeanteile zurückzuführen. Die Schwankungen der gemessenen Blattemperatur bei konstanter Blickrichtung lagen mit ca. 0,2 K im gleichen Bereich wie die Schwankungen der Referenztemperatur und bildeten daher nur die Temperaturschwankungen der Umgebung auf den Blättern ab. Bei variierter Blickrichtung lag sie bei 0,8 K. Dieser Wert kann als Genauigkeitsbereich der Messmethode betrachtet werden.

Einflussfaktoren auf die Blattemperatur

Bei der thermografischen Aufnahme der Pflanzen waren äußere Einflüsse, wie die Intensität von Wärmestrahlung, Licht und Luftbewegung sowie die Reaktion der Pflanzen auf diese zu berücksichtigen. Um thermische Symptome einer bestimmten Ursache aufnehmen und mit Kontrollpflanzen vergleichen zu können, müssen die Aufnahmen unter standardisierten Bedingungen stattfinden. Nicht konstante Licht- und Wärmequellen, die zu unterschiedlichen thermischen Zonen auf den Blättern führen, müssen deshalb abgeschirmt werden. Das gilt besonders für die Sonneneinstrahlung. Andererseits sollten die Pflanzen vor der Aufnahme nicht durch Veränderungen der Lichtintensität und des Mikroklimas gestresst werden. Nach dem Einstellen der Pflanzen in einen großvolumigen Pappkarton wurde eine Abkühlung der Blätter beobachtet, die auf die Abschirmung von Sonneneinstrahlung und Wärmestrahlung aus der Umgebung zurückgeführt wurde. Dabei ist die Reaktion der Stomata auf die veränderten Lichtverhältnisse und eine damit verbundene Veränderung der Blattemperatur nicht zu vermeiden. Im Sinne einer Anwendung unter wenig bis nicht kontrollierten Bedingungen wurden die Aufnahmen weitgehend an ungeschirmten Pflanzen, außerhalb direkter Sonneneinstrahlung, zu gleichen Tageszeiten durchgeführt.

Wasserstress ist der bestimmende, indirekt thermisch wirkende Faktor. Untersuchungen an Sojabohne von Mengistu et al. (1987) verglichen den Einfluss von Wasserstress in Kombination mit einer *Phialophora gregata*-Infektion und stellten fest, dass bewässerte Pflanzen trotz hohen Infektionsniveaus noch kälter waren als trockengestresste Pflanzen mit geringem Infektionsniveau. In der Literatur werden Temperaturunterschiede über 5 K

zwischen Pflanzen mit und ohne biotischen Schäden an wasserleitenden Organen beschrieben (Nilsson, 1995), wobei die erkrankten Pflanzen wärmer waren als die gesunden. Geringere Temperaturunterschiede von 2 bis 3 K fand Nilsson (1984) durch eine *Pyrenophora graminea*-Infektion.

Im Laborversuch zeigten Weizenpflanzen mit guter Stickstoffversorgung eine deutlich höhere Abkühlung gegenüber der Referenztemperatur als Pflanzen mit Stickstoffmangel. Grund dafür könnte eine höhere Wasseraufnahme durch ein besser entwickeltes Wurzelwerk sein. Bei Freilanduntersuchungen zum Stickstoffmangel, führten Nilsson & Linnér (1987) die verminderte Transpirationsfähigkeit auf eine schlechtere Wurzelentwicklung zurück. Da die Pflanzen im Freilandanbau wesentlich länger unter Stickstoffmangel litten als die Pflanzen im Laborversuch, scheint dieser Erklärungsansatz nur begrenzt anwendbar. Im Gegensatz zu den Beobachtungen von Nilsson und Linnér zeigten Parzellen mit Stickstoffmangel im Freiland geringfügig niedrigere Bestandstemperaturen als gut versorgte Parzellen, allerdings erst zu EC 90. Dieser Gegensatz ist vermutlich auf das späte Entwicklungsstadium zurückzuführen, zu dem die Bestände weitgehend abgereift waren. Die gemessenen Temperaturunterschiede waren gering und nicht mehr auf unterschiedliche Transpirationsraten zurückzuführen.

Unter nicht idealen Aufnahmebedingungen, z.B. im Gewächshaus oder im Freiland sind Faktoren, wie die Einstrahlungsintensität, relative Luftfeuchtigkeit oder Wind zu berücksichtigen, die die Blattemperatur direkt oder indirekt über die Transpiration beeinflussen. Nilsson & Linnér (1987) stellten eine Verringerung der Bestandstemperatur um 1 bis 2 K durch leichte Windböen von nur 1 bis 2 m s⁻¹ fest.

Thermische Symptome

Eine Veränderung der Blattemperatur ist ein Symptom für Stress, welches als solches keinen Einfluss auf die Vitalität der Pflanze nimmt. Ein ertragsrelevanter, physiologischer Effekt ist durch eine Veränderung der Blattemperatur durch Stressfaktoren nicht zu erwarten. Er ist im Vergleich zu einem Entwicklungsverzug und Ertragsverlust durch die Stressursache z.B. Trockenheit oder Assimilatentzug durch Pathogenbefall, verschwindend klein. Dafür ist das Ausmaß der thermischen Veränderung bis ca. 3 K zu gering.

Im Laborversuch führte die Infektion der Weizenpflanzen mit *Puccinia triticina* nach sechs Tagen zu einer Abkühlung gegenüber gesunden Pflanzen. Zu diesem Zeitpunkt waren vereinzelt Uredosporenlager unter der Kutikula der Blättern sichtbar. Die Abkühlung der Blattemperatur der infizierten Pflanzen gegenüber gesunden Pflanzen lag mindestens bei 0,1 bis 0,8 K. Das entspricht der absoluten Temperaturveränderung, die durch *Puccinia striiformis* in Feldversuchen gemessen wurde (Smith et al., 1986). Der Autor nannte als Ertrag mindernde Faktoren von Rostkrankheiten an Getreide die reduzierte Photosyntheseleistung in

Verbindung mit reduzierter CO₂-Aufnahme, erhöhte Respiration und erhöhte Transpiration durch verminderten stomatären Widerstand. Die erhöhte Transpiration ist ein frühes Symptom im Verlauf der Pathogenese, das theoretisch zu einer Abkühlung von befallenen Blättern führt und dessen Dauer von der Überlebensdauer der Blätter abhängig ist. Die Nekrotisierung von befallenem Gewebe kehrte den Temperatureffekt um.

Durch Überlagerung von Infektionszyklen ist bei der Beobachtung von Freilandbeständen eine Überlagerung der Temperatureffekte zu erwarten. McGrath & Pennypacker (1990) beschreiben einen weiteren transpiratorisch relevanten Aspekt: Rostpusteln sind im Durchmesser wesentlich größer als Stomata, und für die Verdunstung von Wasser sind wenige große Öffnungen (Uredosporenlager) weniger effizient als viele kleine Öffnungen (Stomata). Dieser Effekt würde sich aber erst bei starkem Rostbefall und bei guten Transpirationsbedingungen bemerkbar machen. Vermutlich ist er aber zu gering, um unter nicht idealen Bedingungen thermisch von Bedeutung zu sein. Nachts und bei Trockenstress sollte die Transpiration Rost befallener Pflanzen höher sein als bei gesunden Pflanzen, deren Stomata dann geschlossen sind, weil die Transpiration durch Kutikulaverletzungen nicht gesteuert werden kann. Diese Annahme wurde von Duniway & Durbin (1971) durch Versuche zum Einfluss von Bohnenrost auf die stomatäre Aktivität von Bohnen bestätigt. Eine Früherkennung eines Rostbefalls aufgrund solcher Symptome scheint kaum möglich. Es ist davon auszugehen, dass ein Befall im frühen Stadium schwächere Symptome bewirkt als im fortgeschrittenen Stadium mit reifen Uredosporenlagern. Prinzipiell gilt für eine fernerkundliche Erfassung, dass ein gewisser Blattflächenanteil Symptome aufweisen muss. Lili et al. (1991) fanden in einem Weizenbestand im Freiland ab ca. 10 % befallener Blattfläche mit Blattseptoria und Echem Mehltau einen thermischen Effekt von +0,1 bis +0,8 K. Zusätzlich erschwert wird die Erkennung von Blattkrankheiten durch gegenläufig gerichtete Temperatureffekte von verschiedenen Blattkrankheiten und den, im Verlauf der Pathogenese, gegenläufig wirkenden Temperatureffekten, z.B. für Bohnenrost an Bohne Echten Mehltau an Erbse und Gelbrost an Weizen (Ayres, 1976; Duniway & Durbin, 1971; Smith et al., 1986).

Ergebnisse aus dem Freiland sind wegen des undefinierten Zustandes der infizierten Pflanzen und der Umgebungsbedingungen nur bedingt mit den Ergebnissen unter kontrollierten Bedingungen zu vergleichen. Ein Zusammenhang zwischen Befallsstärke von Braunrost an Weizen und der Blatttemperatur war im Labor nur am 7. Tag zu erkennen. Dabei nahm die Abkühlung bei stärkerem Befall zu. Bei aufgebrochenen Sporenlagern war dieser Trend am 10. Tag nicht mehr zu beobachten. Insgesamt war die Abkühlung der Blätter an diesem Aufnahmetag geringer als an den vorherigen. Die Blatttemperatur der Kontrollpflanzen lag nur 0,2 K bis 0,8 K unter der Referenztemperatur, die auf dem Niveau vorheriger Termine lag. Eine relativ hohe Luftfeuchtigkeit könnte hier der Grund gewesen sein, dass sich

Transpirationsunterschiede durch unterschiedliche Befallsstärke nicht auf die Blatttemperatur auswirkten. Dass Blatttemperaturunterschiede verstärkt unter ariden Bedingungen auftreten, zeigte sich im Vergleich der Blatttemperatur von Sojabohne und Baumwolle. Unter humiden Bedingungen hingegen traten keine Temperaturunterschiede auf (Isoda & Wang, 2002). Die thermischen Symptome verschiedener Blattkrankheiten wurden betrachtet und führten unabhängig von der Krankheit zu ähnlichen Temperaturunterschieden. Dies ist ein Indiz für die Unspezifität der Thermografie als Methode zur Erkennung von Pflanzenkrankheiten. Eine präsymptomatische Erkennung von Blattkrankheiten ist mit der DIT nur möglich, wenn die Transpiration lokal durch den Pathogenbefall verändert wird (Lindenthal et al., 2005), z.B. durch die Bildung von Salicylsäure, die Stomata schließend wirkt und von vielen Pflanzen als Reaktion auf eine Infektion gebildet wird (Manthe et al., 1992). Solange es aber nicht zu einer transpiratorisch, d.h. thermisch wirksamen Reaktion der Pflanze kommt, ist eine thermografische Früherkennung nicht möglich.

Fernerkundliche Aufnahmen sollten zu einem Zeitpunkt oder unter Bedingungen durchgeführt werden, zu denen der stärkste Einfluss des Faktors, z.B. eines Pathogens auf die Transpiration, zu erwarten ist. Ein unkontrollierter Wasserverlust über befallene Blätter wäre besonders gut zu erkennen, wenn die normale Transpiration sehr gering ist, also nachts oder bei Trockenstress, wie Isoda & Wang (2002) an Baumwolle feststellten. Messungen zur Erkennung von Trockenstressresistenz von Weizensorten, wie von Rashid et al. (1999) durchgeführt, sollten zu Zeiten hoher Transpiration durchgeführt werden, um Sorten mit hoher Wassernutzungseffizienz anhand ihrer höheren Temperatur identifizieren zu können.

Auf rostinfizierten Bohnenblättern traten verschiedene thermische Strukturen auf, die nur teilweise als Symptome einer Infektion zu interpretieren waren. Besonders deutlich zeigten sich mechanische Schäden als lokale, scharf abgegrenzte, kältere Formen, die auch nach zehn Tagen nach Beschädigung thermisch auffällig waren. Temperaturzonen auf gesunden Blättern traten mit verschiedener Fragmentierung auf. Während auf einem Blatt großflächige, meist durch Blattadern begrenzte Zonen zu erkennen waren, traten auf einem anderen Blatt kleinere, oval geformte Temperaturzonen auf. Anhand der mittleren Blatttemperatur und Standardabweichung waren solche Unterschiede in der Form nicht zu unterscheiden. Weyers & Lawson (1997) untersuchten die Variabilität des Verhalten von Stomata auf Bohnenblättern und beschrieben neben einer Mikrovariabilität zwischen benachbarten Stomata auch eine Makrovariabilität, die zwischen Regionen innerhalb eines Blattes auftrat. Da die Blatttemperatur unter kontrollierten Messbedingungen eng an die Transpiration gebunden ist (Inoue et al., 1990), lässt sich die Variabilität der Stomataöffnung als Erklärung für Temperaturmuster heranziehen (Jones, 1999). Sie unterschieden eine durch Blattadern scharf abgegrenzte Fleckenstruktur und eine Trendstruktur, die durch fließende Übergänge zwischen Zonen mit unterschiedlicher Stomataöffnung entstand. Diese beiden Strukturen waren auf den

untersuchten Bohnenblättern nicht explizit zu unterscheiden. Auf gesunden Blättern traten häufig die Blattadern als abgrenzende Strukturen hervor.

Im Verlauf der Pathogenese von Bohnenrost zeigte sich ein Trend von großflächigen Temperaturzonen hin zu einem gesprenkelten Muster, dessen Auftreten mit dem Erscheinen erster Chlorosen einher ging. Ein fragmentiertes Muster war aber nicht eindeutig einer Blattkrankheit zuzuordnen, sondern trat teilweise auch an nicht inokulierten Blättern auf. Nach den Beschreibungen von Weyers & Lawson (1997) ist ein fleckiges Muster jedoch als ein Zeichen von Stress, der die Regulation der Stomata stört, zu interpretieren. Verschiedene Autoren nennen kurzfristig einsetzenden Wasserstress (Gunasekera & Berkowitz, 1992) und Veränderungen der Luftfeuchtigkeit (Mott & Parkhurst, 1991) als Ursache für fleckige Muster. Das normale Temperaturmuster von gesunden Blättern ist daher durch großflächige Temperaturzonen mit fließenden Übergängen geprägt. Bei zeitlich stabiler Ausprägung wären solche Zonen auf die Variabilität der Stomataöffnung zurückzuführen. Instabile Zonen ließen eher auf Temperaturunterschiede durch unterschiedliche Exposition der Blattoberfläche zu einfallender Strahlung schließen. Um solche Einflüsse zu erkennen, ist es sinnvoll, eine Serie von Aufnahmen von einem Objekt über einen Zeitraum von ca. zwei Minuten zu machen. Nach Wigley & Clark (1974) können Temperaturunterschiede auf einem Blatt auch auf Unterschiede im Wärmeaustausch zwischen Blattoberfläche und der Luft zurückzuführen sein. Die Größe des Blattes und die umgebende Luftströmung sind für diesen Effekt von Bedeutung (Häckel, 1999).

Detektion von Blattschädigungen im Freiland

Die Entwicklung von Blattkrankheiten wurde in zwei Weizenparzellen mit und ohne Fungizidbehandlung, jeweils unterteilt in zwei Bestandszonen, mit der thermografisch gemessenen Bestandstemperatur verglichen. In Untersuchungen von Lili et al. (1991) und Smith et al. (1986) zu thermischen Symptomen von Blattkrankheiten wie Echtem Mehltau und Blattseptoria an Weizen bzw. Gelbrost an Weizen traten uneinheitliche Ergebnisse auf, was die Richtung der Veränderung der Bestandstemperatur angeht. Bei Lili et al. war die Bestandstemperatur des befallenen Bestandes ab einer Befallsstärke von 10 % um 0,2 bis 0,8 K wärmer. Bei Smith et al. war dies abhängig vom Entwicklungsstadium des Weizenbestandes. Vor der Kornfüllungsphase (EC 70) war der befallene Bestand um 0,2 bis 1,0 K kälter als der gesunde. Ab EC 70 kehrte sich dieser Trend um, was sich auf die verfrühte Seneszens der befallenen Blattfläche zurückführen lässt.

Im Feldversuch war ein Zusammenhang von Befalls- und Bestandstemperaturunterschieden zwischen den Behandlungen nicht festzustellen. Der Krankheitsbefall auf den untersuchten Flächen war zu EC 57 und EC 63 auf beiden Parzellen mit < 5% befallener Blattfläche sehr

gering. Zu EC 75 trat dann ein unterschiedlich starker Rostbefall von 9 bzw. 19 % auf. In den Bestandstemperaturen ließ sich diese Entwicklung nicht nachvollziehen. Die Temperaturunterschiede zwischen der behandelten und der nicht behandelten Parzelle waren mit $-0,24$ bis $+0,47$ relativ gering, verglichen mit den Messwerten aus der Literatur. Während sich in einer Auswertungszone ansatzweise ein Trend hin zu einer größeren Temperaturdifferenz zu EC 75 zeigte, war der zweiten Auswertungszone in derselben Parzelle ein gegenläufiger Trend zu finden; der größte Temperaturunterschied trat hier zu EC 37 auf. Durch die Unterteilung der Parzellen in zwei Zonen gleicher Behandlung konnte die Variabilität in den Parzellen bewertet werden. Trotz geringfügiger Unterschiede im Krankheitsbefall traten erhebliche Unterschiede in den Bestandstemperaturdifferenzen auf.

Die Befallsheterogenität innerhalb eines Bestandes ohne Fungizideinsatz wurde in zwei Zonen mit unterschiedlicher Bestandstemperatur betrachtet. In diesem Bestand trat hauptsächlich Blattseptoria auf. Andere Blattkrankheiten waren zu vernachlässigen. Auch hier ließ sich kein Trend im Zusammenhang von Bestandstemperatur und Befallsstärke erkennen. Der größte Befallsunterschied mit 5 % trat zu EC 57 auf, gleichzeitig mit dem höchsten Befallsniveau von 20 bzw. 25 %. Erwartungsgemäß hätte hier auch der größte Temperaturunterschied auftreten müssen. Der war mit 0,12 K aber der geringste der sechs Aufnahmetermine; bei geringeren Befallsstärken traten größere Temperaturunterschiede bis 0,45 K auf. In vier von fünf Fällen war die stärker befallene Zone die kältere, mit Ausnahme von EC 63. Dieser Trend zwischen den Zonen war aber rein qualitativ. Ein quantitativer Zusammenhang war nicht zu finden. Dazu waren die Befallsunterschiede zwischen den Zonen innerhalb einer Parzelle vor EC 75 zu gering und die dazugehörigen Temperaturunterschiede zu uneinheitlich. Der Temperatureffekt durch krankheitsbedingte Reduktion der vitalen Blattfläche ist daher geringer einzustufen als der Effekt durch anderweitig bedingte Variationen der Bestandstemperatur. Die Uneinheitlichkeit der Temperaturunterschiede kann in Übereinstimmung mit der Bewertung des Einflusses der Bestandstemperatur von verschiedenen Krankheiten durch Nilsson (1991) gesehen werden: Braunrost und Blattseptoria wurden mit schwachem Einfluss bewertet, Echter Mehltau mit mittlerem bis starkem Einfluss.

Ertrag, Stickstoffdüngung und Fungizideinsatz im Freiland

Auf Weizenparzellen mit unterschiedlichem Stickstoff- und Fungizideinsatz mit Ertragsmessung waren die Temperaturunterschiede zwischen den Parzellen vor EC 90 so gering, dass die Bestandstemperatur nicht parzellenweise auswertbar war. Die vorherrschenden, zonalen Unterschiede der Bestandstemperatur zogen sich als ein streifenförmiges Muster über die gesamte Fläche, wie es auch in anderen Weizenbeständen in

dieser Arbeit auftrat. Die Temperaturunterschiede kurz vor der Ernte ließen sich auf unterschiedliches Abreifeverhalten der Parzellen zurückführen. Eine ähnliche Entwicklung trat bei Nilsson (1984) bei der Korrelation der Differenzen von Bestandstemperatur und Lufttemperatur und dem Befall von Gerste durch *Pyrenophora graminea* auf. Je weiter der Bestand entwickelt war, umso stärker waren Temperatur und Befall positiv korreliert. Der Temperaturunterschied zwischen gesundem und befallenem Bestand betrug maximal 1,2 K. Neben der befallenen Blattfläche wirken sich bei der Streifenkrankheit der Gerste aber auch die vaskulären Schäden auf die Bestandstemperatur aus. In Parzellen ohne Fungizidbehandlung trat die Seneszenz der Pflanzen früher ein. Somit war weniger transpirierende Oberfläche als in den gesunden Parzellen vorhanden, was die leicht erhöhte Bestandstemperatur erklärt. Der maximale Temperaturunterschied von 0,4 K zwischen voll gedüngten Parzellen mit und ohne Fungizidbehandlung war im Vergleich zu der Temperaturvariabilität in homogen bestellten Beständen als sehr gering einzustufen. Die reduzierte Düngergabe führte in diesem Feldversuch zu einer Reduktion der Bestandstemperatur, wirkte somit dem Effekt des Befalls entgegen, so dass zwischen den Parzellen mit vollem Dünger- und Fungizideinsatz und denen ohne diese Behandlungen nur ein Temperaturunterschied von 0,14 K auftrat. Zusätzlich variierte die Bestandstemperatur zwischen den drei Wiederholungen stark. Auch wenn Unterschieden der Bestandstemperatur zwischen den Behandlungen kaum messbaren waren, traten doch deutliche Ertragsunterschiede von bis zu 2,0 t ha⁻¹ zwischen voll- und gänzlich unbehandelten Parzellen auf. Auch beim Ertrag zeigte sich der Effekt, dass dieser nicht verlässlich auf die Düngungsintensität zurückzuführen war. Gleiches galt für die Bestandstemperatur.

Der Zusammenhang von Ertrag und Bestandstemperatur wurde auf einem homogenen Weizenbestand untersucht. Auf diesem Bestand trat ebenfalls, wiederholt an vier von fünf Aufnahmetermen, eine streifenförmige, thermografisch aber nicht optisch erkennbare Strukturierung auf. Vermutlich waren kleinräumige Bodenunterschiede die Ursache. Entweder kam es durch die Strukturen zu einer Verdeckung von zonalen Bestandstemperaturen, die mit der Ertragsverteilung in Verbindung hätten gebracht werden können, oder es handelte sich um ein thermisches Hintergrundrauschen, das so gering war, dass ihm keine physiologischen Auswirkungen zuzuschreiben waren. Auf diese grundlegende Problematik weist die völlig unterschiedliche Ausrichtung von Ertrags- und Temperaturzonen hin, sowie der Effekt, dass Zonen mit Ertragsunterschieden von über 3 t ha⁻¹ nicht eindeutig im Thermogramm wiederzufinden waren. Dabei spielte der Termin der thermografischen Aufnahme keine Rolle. Die Punktwolke, die sich aus der Gegenüberstellung von punktuellen Bestandstemperaturen und Ertragsdaten ergab, hatte von EC 33 bis EC 75 die gleiche Form, ebenso die, über die fünf Termine aufsummierte Bestandstemperatur zur Abbildung der Einflüsse der gesamten Vegetationsperiode auf den Ertrag. Alle Punktwolken hatten einen

Schwerpunkt bei 9,0 bis 9,5 t ha⁻¹, der mit Temperaturunterschieden von ca. 0,5 K einherging. Durch die Streuung der Ertragswerte über einen breiten Bereich von mindestens 2,0 t ha⁻¹, bei einem relativ kleinen Temperaturintervall, ließ sich aus der Bestandstemperatur keine Abschätzung des Ertrages ableiten. Erwartungsgemäß hätte in kälteren, stärker transpirierenden Zonen ein höherer Ertrag in Folge von vermehrter Assimilation durch bessere Wasserversorgung auftreten müssen. Solch ein Zusammenhang trat mit hoher Korrelation in Freilandversuchen zu Ertrag und Bestandstemperatur von Gerste mit und ohne Behandlung gegen Streifenrost auf (Smith et al., 1986). Nilsson & Linnér (1987) fanden zwischen Weizenbeständen mit unterschiedlichen Bewässerungsintensitäten hohe Korrelationen zwischen Bestandstemperatur und Ertrag. Bei diesen beiden positiven Beispielen handelte es sich um Temperatur- und Ertragsunterschiede durch Wasser- und Pathogenstress, die stärker korreliert waren als die Temperatur- und Ertragsheterogenität eines gesunden Bestands.

Ein deutlicherer Unterschied der Bestandstemperatur trat in einem Parzellenversuch mit verschiedenen Weizensorten mit und ohne Fungizidbehandlung auf. Zu EC 39 traten zwischen den behandelten und unbehandelten Parzellen der zehn angebauten Sorten nur geringfügige Unterschiede auf. Die Variationsbreite war wesentlich auf ein streifenförmiges Temperaturmuster, das sich über den Standort zog, zurückzuführen und kann die statistische Differenzierbarkeit von behandelten und unbehandelten Parzellen zu diesem frühen Stadium im Sinne einer Früherkennung verhindert haben. Das Streifenmuster hatte auch zu EC 75 einen Einfluss auf die Bestandstemperatur, wie sich am parallelen Verlauf der Kontur über den Diagrammbalken zu den beiden Entwicklungsstadien erkennen lässt. Durch die Fungizidbehandlungen war die Temperaturdifferenz zwischen behandelten und unbehandelten Parzellen um ca. 0,4 K angestiegen. Die Unterschiede in der Bestandstemperatur sind auf den Anteil nekrotischer Blattfläche zurückzuführen, die in direkter Nachbarschaft zu der Parzellenanlage in einem unbehandelten Bestand von EC 37 auf EC 75 um das dreifache zunahm. Ein quantitativer Zusammenhang zwischen Befallsanfälligkeit und Abkühlung war auch in diesem Versuch nicht festzustellen.

Die Bestandstemperatur zu den beiden EC-Stadien wurde über alle zehn Sorten gemittelt. Da sie auch einen gewissen Bodenanteil beinhaltet, können Unterschiede des Sortenhabitus (Blattstellung, Aufwuchshöhe, Blattfarbe, Blattfläche) (Häckl, 1999) und sortentypische Transpiration (Rashid et al., 1999) zu prinzipiell unterschiedlichen Bestandstemperaturen führen. Dieser Aspekt wurde in dieser Arbeit nicht berücksichtigt, da der allgemeine Trend von Bestandstemperatur und Pflanzenvitalität im Vordergrund stand. Signifikante Temperaturunterschiede zwischen behandelten und unbehandelten Parzellen traten während der Phase der Kornfüllung (EC 75) auf und lassen in Verbindung mit den Mehrerträgen in allen behandelten Parzellen auf einen Zusammenhang von Bestandstemperatur und Ertrag

schließen. Dass die Unterschiede der mittleren Bestandstemperatur trotz erhöhter Variationsbreite durch Sortenunterschiede signifikant waren, unterstreicht den Trend. Die Thermografie ermöglichte es, Unterschiede in der ertragsrelevanten Vitalität von Weizenbeständen zu erfassen. Die Unterschiede der mittleren Bestandstemperatur und der Erträge zwischen den drei Fungizidbehandlungsvarianten waren wesentlich geringer als der durchschnittliche Temperaturunterschied aller Behandlungen zur unbehandelten Kontrolle. Ein Zusammenhang beider Parameter innerhalb der Pflanzenschutzbehandlungen konnte daher nicht festgestellt werden. Festzuhalten ist, dass auch bei dieser Untersuchung nur erhebliche Befallsunterschiede zu einem signifikanten Temperaturunterschied führten. Feinere Abstufungen der Bestandstemperatur innerhalb der drei Behandlungen ließen kaum Zusammenhänge erkennen.

Unspezifität des Signals 'Blatttemperatur'

Alle Stressfaktoren, biotische und abiotische, die die Transpirationsrate von Pflanzen verändern und so Einfluss auf die Oberflächentemperatur nehmen, haben thermografisch detektierbare Auswirkungen auf die Blatttemperatur (Hatfield, 1990; Lili, 1991). Die Ursache für eine veränderte Temperatur ist aber allein am Parameter Blatttemperatur nicht zu identifizieren (Chaerle & Van der Straeten, 2000). Nach Bacci et al. (1991) können gleiche thermografische Symptome durch Wassermangel, Pathogenbefall, Nährstoffmangel und sogar Luftverschmutzung hervorgerufen werden. Ebenso führen mechanische Schäden an Blättern zu unkontrolliertem Wasserverlust, der speziell bei hohem stomatären Widerstand zu hohen Temperaturspannen auf Blättern führt. Dieses fanden auch Tartachnyk & Blanke (2002) an der Blatttemperatur von Apfelblättern mit mechanischen Schäden durch simulierten Hagelschlag.

Smith et al. (1986) verglichen die thermischen Symptome eines Befalls mit *Puccinia striiformis* und unterschiedlicher Wasserversorgung. Beide Stressfaktoren führten zu gleichen thermischen Symptomen. Die Bestandstemperatur kann eine Angabe über die allgemeine Vitalität der Pflanzen machen. Zur Abschätzung des Ertrages reicht die Transpiration alleine aber nicht aus. Speziell bei Pathogenbefall kann der Einfluss auf die Transpiration relativ gering sein, aber trotzdem zu erheblichen Ertragseinbußen führen (Smith et al., 1986).

Unter Freiland ähnlichen Bedingungen traten auch auf symptomlosen Weizenblättern Temperaturzonen auf, die auf unterschiedliche Sonnenexposition und Seneszenz zurückzuführen waren. Dabei kann die Temperaturspanne auf symptomlosen Blättern größer sein als auf Blättern mit Krankheitssymptomen. Externe Einstrahlung erhöhte die Temperaturspanne auf Blättern, sowohl bei Weizen als auch bei Bohne, so dass ein absoluter Temperaturunterschied nicht aussagekräftig war. Vergleichend konnten Temperatur-

unterschiede aber verwendet werden, da sich die Temperaturzonen relativ zueinander nicht verschoben. Ähnliche Effekte werden vermutlich auch durch unterschiedliche Transpirationsaktivität, wie für Bohnen beschrieben wurde, auftreten. Seneszenten und nekrotisches Gewebe wird besonders bei starker Blatttranspiration für die Heterogenität der Blatttemperatur ins Gewicht fallen. Hingegen wäre verletztes, aber lebendes Gewebe, etwa durch Uredosporenlager, vor dem Hintergrund stark transpirierenden, umliegenden Gewebes kaum zu erkennen. In diesem Fall wären Phasen schwacher Transpiration für eine Detektion von Krankheitssymptomen vorzuziehen. Unter ungünstigen Bedingungen kann ein Symptom somit thermografisch unsichtbar sein, während es optisch deutlich zu erkennen ist.

Auswertung von thermografischen Aufnahmen aus Freilandversuchen

In der Feldsaison 2003 wurden an zwei Versuchsstandorten Weizenflächen zu vier Terminen zum Zweck der Infrarot-Thermografie der Pflanzenbestände aus der Luft mit einem Hubschrauber überflogen. An einem Standort wurde die Versuchsfläche wöchentlich auch vom Boden aus thermografisch erfasst. Im Jahr darauf wurden verschiedene Versuchsstandorte 14-tägig aus der Luft thermografisch aufgenommen. Die Erfahrungen aus diesen Vegetationsperioden zeigten, dass die Aufnahme aus der Luft zwei Vorteile bietet. Durch die Flughöhe war es möglich, das gesamte Feld auf einem Bild festzuhalten. Nur so sind unterschiedlich behandelte Parzellen bzw. Teilflächen hinsichtlich der Bestandstemperatur thermisch zu vergleichen, wie am Beispiel der Erkennung unterschiedlicher Bestandsdichten dargestellt ist. Vom Boden aus konnte der Pflanzenbestand nur in einer Sequenz von Teilausschnitten aufgenommen werden, so dass sich kurzfristige Veränderungen der Umweltfaktoren, insbesondere die Sonneneinstrahlung, negativ auf die Vergleichbarkeit von Aufnahmen auswirkten.

In allen aufgenommenen Beständen war die Verteilung der Bestandstemperatur von einer Streifenstruktur geprägt. Am Versuchsstandort trat das Muster zu vier Aufnahmetermen (Ausnahme war der letzte Termin zu EC 75) in gleicher Ausrichtung, in Ost-West-Richtung, gedreht um ca. 45° zur Drillrichtung auf. Bei wechselnder Aufnahmerichtung blieb die Struktur in gleicher Ausrichtung erhalten. Da eine entsprechende optische Bestandsstrukturierung aus der Luft nicht zu erkennen war, ist eine Ausrichtung der Pflanzen nach der vorherrschenden Windrichtung als Ursache unwahrscheinlich. Die Strukturierung wies eine hohe Orts- und Zeitstabilität auf. Sie war nicht nur in der Saison 2004 sondern auch in der Saison 2003 zu erkennen, als auf dieser Fläche Zuckerrüben angebaut waren. Zum Aufnahmeterrn am 23.6.2003 war in dem Zuckerrübenbestand noch kein Reihenschluss erfolgt. So ist zu vermuten, dass sich eine Strukturierung des Bodens auf die Bestandstemperatur auswirkte. Die Streifenstruktur im Weizenbestand ist ein Phänomen, dass

sich nur in den Thermogrammen zeigte, nicht aber in optischen Aufnahmen. Im Sinne einer randomisierten Versuchsanlage wäre das Wissen um solche Standorteigenschaften zu berücksichtigen.

Die Georeferenzierung der Temperaturdaten, die für die Zuordnung zu Bestandsdaten wie Ertrag, Pathogenbefall und Bodeneigenschaften notwendig ist, wurde durch den Aufnahmewinkel von maximal 60° erschwert. Stativaufnahmen von Pflanzenbeständen waren räumlich nicht auswertbar. Zusätzlich ist zu beachten, dass sich aus dem geringen Aufnahmewinkel bei zunehmendem Abstand zwischen Objekt und Objektiv eine abnehmende Bildauflösung ergab, also einer Variabilität der Informationsdichte und -qualität je Flächeneinheit.

In der Bestandstemperatur ist, anders als in der Blattemperatur, nicht nur die Oberflächentemperatur einzelner Blättern enthalten, sondern auch die von sämtlichen Oberflächen, die unverdeckt im Aufnahmebereich des Objektivs liegen. Dazu zählt senescentes Pflanzengewebe und der Boden. Der Anteil der Oberflächen, die tiefer im Bestand liegen, ist dabei abhängig vom Aufnahmewinkel. Bei großem Aufnahmewinkel (näher an die Senkrechte) ist ein größerer Anteil, ggf. unerwünschter tieferer Bestandsebenen im Thermogramm enthalten. Wählt man einen flacheren Winkel, so lässt sich im Thermogramm hauptsächlich Blattfläche aufnehmen. Durch einen flachen Winkel bei Aufnahmen von Beständen mit großer räumlicher Tiefe aus geringer Höhe entsteht im Thermogramm eine thermische Heterogenität, die vom hinteren zum vorderen Bildbereich zunimmt. Sie ist durch die relativ geringe Auflösung des Thermogramms bedingt. Daher bietet sich der verwendete Winkel von ca. 60° als Mittelweg zwischen Ausblendung von Boden und geringer perspektivischer Verzerrung an, um eine Weiterverarbeitung in Geoinformationssystemen zu ermöglichen.

Derksen (1974) beschrieb den Einfluss der Aufnahmerichtung von Thermogrammen im Bezug zum Sonnenstand. Bei einem Aufnahmewinkel unterhalb der Ortho-Position liegen bei Aufnahmen gegen die Sonne mehr beschattete Oberflächen im Aufnahmebereich als bei einer Aufnahme mit der Sonne im Rücken. Entsprechend wird im ersten Fall die Bestandstemperatur geringer sein als im zweiten Fall. Nilsson & Linnér (1987) beschrieben den gleichen Effekt mit Temperaturunterschieden von bis zu 1,0 K. Für vergleichende Aufnahmen über längere Zeiträume ist die Aufnahmerichtung gegen die Sonne vorzuziehen, da die beschatteten Oberflächen im Bestand weniger den kurzfristigen Schwankungen durch wechselnde Strahlungsintensität ausgesetzt sind. Um aber Transpirationsunterschiede, durch lokal unterschiedliche Wasserversorgung in einem Bestand festzustellen, wäre eine Aufnahme der direkt beschienenen Bestandsoberflächen von Vorteil. Bei Aufnahmen eines Bestandes zu EC 90 aus vier verschiedenen Richtungen traten Unterschiede im Temperaturniveau auf, die

nur bedingt auf den Sonnenstand zurück zuführen sind. Die mittlere Parzellentemperatur in NW-Richtung war zwar um 1,0 K wärmer als in SO-Richtung; bei NO zu SW lag der Temperaturunterschied aber nur bei ca. 0,1 K. Die Abstufungen der Bestandstemperatur von unterschiedlich behandelten Parzellen blieben von den unterschiedlichen Temperaturniveaus unbeeinflusst. Es ist anzunehmen, dass die Temperaturunterschiede auf unterschiedliche Sonnestrahlungsintensitäten zurück zuführen waren.

Bei der direkten Verwendung von Thermobildern als Grafikdatei im GIS wird die Temperaturinformation als Farbwert übersetzt. Die zugrunde liegende Temperatur geht damit verloren. Alternativ wurden Temperaturinformationen aus dem Thermogramm entnommen und Koordinaten zugeordnet. Dazu wurde zum einen der Mittelwert über eine Fläche von 16 x 30 m Kantenlänge übertragen, zum anderen die Temperatur einzelner Pixel auf einem Raster. Beide Wege führten zum Verlust von Informationen. So reduzierte sich die Temperaturspanne im homogenen Bestand durch die Bewertung nach Zonen von 1,1 bis 4,0 K bei Pixel weisem Vergleich auf 0,4 bis 0,8 K. Bei der zonalen Methode ging die thermische Heterogenität mit Ausdehnungen unterhalb der Kantenlänge der Zonen verloren. Für eine anwendungsorientierte Zoneneinteilung sind lokale Extremwerte aber nicht von Bedeutung. Die Rastermethode wurde besonders durch den Grad der kleinräumigen Heterogenität beeinflusst. Ist dieser hoch und die Verteilung heterogen, so kann diese Methode zu einer unrealistischen Darstellung von Bestandstemperaturzonen führen.

Eine Übertragung aller Pixelinformationen aus dem Thermogramm in das GIS setzt eine ausreichend hohe Zahl von Passpunkten im Thermogramm voraus. Diese waren durch Markierung der aufgenommenen Parzellen durch bewuchsfreie Streifen und durch die Erkennbarkeit der Fahrspuren im Thermogramm gegeben. So war es möglich, die Temperaturdaten trotz einer perspektivischen Verzerrung in einem GIS zu verarbeiten. Von Vorteil wären thermografisch erkennbare Punkte, die zusätzlich zu den Ecken auch über die Fläche eines Bestandes verteilt sind. Die thermografischen Karten wurden zunächst geglättet und dann in Klassen eingeteilt. Diese Verarbeitungsschritte wären für das Anlegen eines Schlagkartenstapels ebenfalls durchzuführen. Durch die Glättung wurde auf Information von Strukturen kleiner als ca. 4 m² verzichtet. Diese minimale Zellengröße kann gemäß der Strukturierung der vorhandenen Daten und dem Verwendungszweck angepasst werden. Die Anzahl der Klassen, in die die Temperaturkarte eingeteilt wird, bedingt die Anzahl und Größe der entstehenden Temperaturzonen und muss sich daher an der Fragestellung und ggf. an dem resultierenden Bearbeitungsaufwand orientieren (Ludowicy et al., 2002). In der vorliegenden Arbeit wurde die Bestandstemperatur in acht Klassen unterteilt. Für eine Ausweisung von Managementzonen sind das, in Abhängigkeit von der Schlaggröße und der Dosierbarkeit der Massnahmen zu viele. Da es aber in dieser Arbeit um den Vergleich der Temperaturkarten zu verschiedenen Terminen ging und eine Reduzierung der Klassen die Karten ähnlicher macht,

wurden acht Klassen gewählt, um so ein gewisses Maß an Differenzierung zu erhalten. Entsprechend unterschiedlich war die räumliche Verteilung von Temperaturzonen, was sich in den geringen Korrelationen zwischen den Karten der fünf Aufnahmetermine ausdrückte.

Die Korrelation zwischen je zwei Aufnahmetermen zeigte einen Trend, der eine größere Ähnlichkeit zwischen direkt aufeinander folgenden Terminen beschrieb. Die Abschwächung der Korrelation im zeitlichen Verlauf von Termin 1 über 2, 3 hin zu 4, zeigt, dass es keine dauerhaften Ausprägungen von Temperaturzonen im Bestand gab. Stattdessen ist die Ausdehnung bestimmter Zonen als ein Phänomen des Aufnahmetermins bzw. des Entwicklungsstadiums des Bestandes zu deuten. Die relativ hohe Korrelation von Termin 5 (EC 75) mit allen anderen Terminen könnte auf eine Kumulation der saisonalen Bestandstemperaturen zu diesem späten Termin zurück geführt werden. Dann sollte sich eine Korrelation der Bestandstemperatur mit dem Ertrag auf erntenahe Temperaturdaten stützen. Zu erwarten wäre eine ähnliche Korrelation zwischen einem Termin und dem vorherigen, sowie dem Termin und dem folgenden. Dieses war bei Aufnahmetermin 3 der Fall, bei Termin 2 und 4 hingegen nicht. Es ist zu vermuten, dass es neben dem Abstand der Entwicklungsstadien weitere Faktoren gab, die den Grad der Ähnlichkeit zwischen den Temperaturkarten beeinflussten, da auch die Erwartung einer höheren Ähnlichkeit zwischen späteren Terminen, bedingt durch stärkere Veränderungen des Habitus in der früheren Bestandsentwicklung, nicht bestätigt wurde.

Die Stabilität von Temperaturzonen im Bestand ist von Bedeutung, wenn Befallsrisikozonen in einem Bestand ausgewiesen werden sollen. Befallsunterschiede werden nur auftreten, wenn das lokale Klima dauerhaft anders ist als in einer anderen Zone. Dazu wurden lokale, georeferenzierte Temperaturdaten verrechnet. Aus der pixelweisen Verrechnung entstand eine Streuungskarte, die die Standardabweichung der Temperaturen in jeder Zelle zu den fünf verglichenen Aufnahmetermen darstellt. Die Karte wurde in fünf gleichmäßig abgestufte Stabilitätszonen unterteilt. Die Zonen waren relativ stark fragmentiert, so dass eine Unterteilung in nur drei Zonen sinnvoller gewesen wäre. Durch die Zusammenlegung von benachbarten Zonen ist abzuschätzen, dass Zonen gleicher thermischer Stabilität Diagonalenlängen von mindestens fünfzehn Metern aufwiesen. Festzuhalten ist, dass mehr stabile als instabile Zellen auftraten. Die Nachbarschaft der Zonen hatten keinen Einfluss auf die Temperaturstabilität. Stabile Bereiche lagen sowohl nahe am Rand des Zuckerrübenfeldes als auch im zentralen Parzellenbereich. In Richtung des umgebenden Weizenbestandes traten instabilere Zellen auf als in Nähe zum Rübenfeld. Ein Zusammenhang zwischen der lokalen Temperatur und der Stabilität konnte nicht festgestellt werden.

Diese Ergebnisse deckten sich mit den Ergebnissen aus der Bewertung von Temperaturzonen anhand des relativen Temperaturrenges. Durch den relativen Vergleich von Zonen konnten

räumlichen Temperaturdaten, die zu verschiedenen Terminen aufgenommen wurden und folglich ein unterschiedliches Temperaturniveau aufwiesen, verglichen werden. Von Nachteil ist diese Methode, wenn die Temperaturspanne zu verschiedenen Terminen stark variiert. Da keine absoluten Temperaturen berücksichtigt wurden, wirkten sich sehr geringe Temperaturunterschiede übermäßig stark aus. Als Alternative könnte eine Klassenbildung verwendet werden, z.B. unterteilt in folgende drei Klassen: sicher Pathogenese relevant, fraglich, nicht Pathogenese relevant. Diese Klassengrenzen müssten, abhängig von den klimatischen Anforderungen des Pathogens, anhand von Daten aus Freiland nahen Untersuchungen gezogen werden. Die mikroklimatischen Unterschiede innerhalb des relativ homogenen Weizenbestandes waren vermutlich als nicht Pathogenese relevant einzustufen.

Neben der Transpiration nehmen umgebende Klimafaktoren Einfluss auf die Bestandstemperatur. So kann die Oberflächentemperatur transpirierender Blätter als Funktion mikroklimatischer Parameter (Lufttemperatur, Einstrahlung, Luftfeuchtigkeit) betrachtet werden. Entsprechend wird die Oberflächentemperatur von Pflanzenbeständen durch kurzfristig auftretende klimatische Veränderungen stark beeinflusst (Derksen, 1974). Wie sich in den Thermografien eines Weizenbestandes im Gewächshaus, von Freilandbeständen vom Boden und aus der Luft zeigte, unterlag das Niveau der Bestandstemperatur für den Gesamtbestand kurzfristigen Schwankungen. Temperaturzonen blieben dabei aber weitgehend erhalten. Durch unterschiedliche Bewölkung kann die Bestandstemperatur aber teilflächig verändert werden. Auch können Wechselwirkungen mit anderen Standortfaktoren, z.B. Boden und Wasserversorgung dazu führen, dass Teilbestände unterschiedlich auf einen gleichmäßig auftretenden Klimafaktor reagieren.

In den Versuchen dieser Arbeit wurden unterschiedlich stark befallene Weizenbestände verglichen. Es konnte also der Temperaturunterschied zu einer Vergleichsparzelle, für die gleiche Umgebungsbedingungen herrschten, als Vergleichswert verwendet werden. Wenn keine vitalen Kontrollpflanzen als Referenz zur Verfügung stehen, oder Aufnahmen von verschiedenen Zeitpunkten verglichen werden sollen, kann die Bewertung der Stabilität von thermischen Zonen über einen bestimmten Zeitraum als bestandsinterner Parameter hilfreich sein. Speziell bei der Thermografie von einzelnen Blättern gibt die bildliche Darstellung neben der Temperatur von Oberflächen zusätzliche Information über die Form und Verteilung von thermisch auffälligen Zonen, anhand derer mit entsprechender Software stresstypische Temperaturmuster erkannt werden können (Lindenthal et al., 2005). Nilsson (1991) verwendete zur Beschreibung der Bestandstemperatur von trockengestresstem und zusätzlich mit *Gaeumannomyces graminis* befallenem Sommerweizen die Temperaturdifferenz zwischen Bestand und Luft. Luft- und Bestandstemperatur stehen aufgrund ihrer direkten Wechselwirkung bei extrem großer Kontaktfläche in engem Zusammenhang. Auf die Bestandstemperatur wirken neben einem ausgleichenden Wärmefluss durch

Konvektionswärme im Wesentlichen zwei direkte Einflussgrößen, die auf die Lufttemperatur in geringerem Maße Einfluss nehmen: langwellige Wärmestrahlung durch die Sonne und umgebende Körper (Pflanzen, Boden) und Abkühlung durch Verdunstungskälte. Da es sich bei der Bestandstemperatur um die Oberflächentemperatur von Festkörpern handelt, bei der Lufttemperatur aber um die Temperatur eines Gasgemisches, gelten für beide Temperaturen unterschiedliche Einflussgrößen. Das erklärt, dass im Freiland auch höhere Bestandstemperaturen als Lufttemperaturen auftreten (Häckel, 1999), wie auch Isoda & Wang, (2002) bei Transpirationsuntersuchungen an Soja und Baumwolle feststellten. Bei den Messungen dieser Arbeit in einem homogenen Weizenbestand betrug die Differenz zwischen thermografisch gemessener Bestandstemperatur und der im Bestand gemessenen Lufttemperatur zu allen Aufnahmetermine ca. -1 bis -3 K. Es bestand ein enger Zusammenhang zwischen thermografisch gemessener Bestandstemperatur und der Lufttemperatur zum Aufnahmezeitpunkt. Die Betrachtung der Verteilung von Luft- und Bestandstemperatur zeigte zu einzelnen Terminen aber keinen Zusammenhang.

Um aus der Bestandstemperatur Aussagen über die transpiratorische Aktivität und somit die Vitalität der Pflanzen des Bestandes abzuleiten, muss der funktionelle Zusammenhang zwischen Lufttemperatur und Bestandstemperatur bekannt sein. Unter simulierten Freilandbedingungen im Gewächshaus, also bei abgeschwächter Sonneneinstrahlung, wurde über 35 Stunden fast durchgehend eine geringere Bestands- als Lufttemperatur gemessen. Der Unterschied lag zwischen -0,26 und 6,5 K und war zwischen 13:00 und 17:00 Uhr am größten. Der Zusammenhang von Luft- und Bestandstemperatur ließ sich durch eine nicht lineare Funktion nur geringfügig besser beschreiben als durch eine lineare. Das Bestimmtheitsmaß betrug 0,71, bzw. 0,69. Bei der relativ guten linearen Anpassung ist zu berücksichtigen, dass die Bestandstemperatur über den gesamten Temperaturbereich der Luft von 19,3 bis 24,8 °C um bis zu 2,5 K variierte. Dieser Variationsbereich war durch kurzfristige Veränderungen der Bestandstemperatur als Reaktion auf eine Zu- und Abnahme der Sonneneinstrahlung zu erklären. Daher scheint die Lufttemperatur nur begrenzt als charakterisierender Wert für einen Bestand geeignet zu sein.

Für die Erkennung von teilflächig auftretendem Stress ist die Temperaturdifferenz zwischen Luft und Bestand zur Differenzierung brauchbar. Aus dem Wert ist aber keine Aussage über den absoluten Zustand eines Bestandes abzuleiten. Bei Untersuchungen von Nilsson & Linnér (1987) in Getreide variierte dieser Differenzwert über drei Termine in trendloser Folge zwischen positiven und negativen Werten. Wenn es gelänge, die Bestandstemperatur, basierend auf der Lufttemperatur und der relevanten Einflussgrößen zu modellieren, Hatfield (1990) nennt die Sonneneinstrahlung, Windgeschwindigkeit und die rel. Luftfeuchtigkeit, könnte eine thermografisch ermittelte Bestandstemperatur anhand einer Soll-Bestandstemperatur für einen vitalen Bestand interpretiert werden. Zu berücksichtigen wäre

dabei, dass mit zunehmender Lufttemperatur die rel. Luftfeuchtigkeit sinkt und so der Kühlungseffekt durch zunehmende Transpiration zunimmt. Bei ausreichender Wasserversorgung wird der Verlauf der Bestandstemperatur mit zunehmender Lufttemperatur abflachen. Bei Trockenstress wird die Bestandstemperatur mit der Lufttemperatur vergleichsweise kontinuierlich ansteigen. Diese Temperaturverläufe zeigte auch der Vergleich von Transpiration und Blatttemperatur von Weizen bei ansteigender Lufttemperatur von 18 auf 31 °C im Labor. Dabei waren die Blätter um mindestens 2 K kälter als die Lufttemperatur.

Bestandszonen und teilschlagspezifische Bestellung

Das Auftreten von Bestandszonen, die durch unterschiedliches Ertragspotential gekennzeichnet sind, ist eine Grundvoraussetzung für eine teilflächenspezifische Bestandsführung (Pierce & Nowak, 1999). Hatfield (1990) empfahl für den Einsatz multispektraler Sensorik die Beobachtung der räumlichen Variabilität, sprich Zonenbildung in Pflanzenbeständen und ihre Veränderung, um die Ausbreitung von Krankheiten zu studieren. Vrindts et al. (2003) schlagen die Ausweisung von uniformen Bestandszonen vor, die in gleicher Weise, hinsichtlich Bodenbearbeitung, Saat, Düngung und Pflanzenschutz, bestellt werden können. Je mehr Faktoren in die Suche nach solchen Zonen eingehen, umso kleiner werden allerdings die Chancen, überhaupt uniforme Zonen zu finden, die zusätzlich auch groß genug sein müssen, um mit gängigen Maschinengrößen bearbeitet zu werden. Secher (1997) führte einen teilschlagspezifischen Fungizideinsatz durch, behandelte den Bestand aber nicht nach vordefinierten Risikozonen, sondern nach dem durchschnittlichen Bedarf in Zellen eines 12 x 12 m Rasters, entsprechend der Breite der Feldspritze. Dieses Behandlungsschema entspricht der rasterweisen Auswertung von Temperaturzonen und ist in der Praxis einfacher umsetzbar als die Behandlung komplex geformter Zonen, wie sie in interpolierten Schlagkarten entstehen.

Eine weitere Voraussetzung für eine teilschlagspezifische Bearbeitbarkeit eines Bestandes ist die Orts- und Zeittreue von Zonen. Kurzfristige Phänomene müssen daher bei der Zonenidentifikation ausgeschlossen werden; dazu müssen sie bekannt sein. Dieser Aspekt spielte speziell bei fernerkundeten Daten eine Rolle. Eine zeitliche Stabilität ist bei Reflektions- und Emissionseigenschaften von Beständen nur begrenzt zu erwarten, etwa zu gleicher Tageszeit bei gleichem Bewölkungsgrad. Gleiches gilt durch Veränderungen im Bestandshabitus bei fortschreitender Bestandsentwicklung. Entscheidend ist, dass die Zonengrenzen unabhängig vom Messwertniveau erhalten bleiben. Im Weizenbestand Dikopshof, 2004 war dies begrenzt der Fall, wie sich in der Beschreibung der Zonenstabilität darstellt. Ausschlaggebend dafür war die Prägung der Bestandstemperatur durch eine

Streifenstruktur, verdreht zur Bearbeitungsrichtung verlaufend, in Verbindung mit der fortschreitenden Bestandsentwicklung.

Für ein teilschlagspezifisches Pflanzenschutzmanagement ist die Ausbildung von Zonen unterschiedlicher Merkmalsausprägung im Bestand eine grundlegende Voraussetzung. Im heterogenen Versuchsbestand traten hohe Befallsunterschiede auf, bedingt durch extreme lokale Bodenunterschiede. Vergleichbare Bodenunterschiede führten auf einem anderen Schlag zur Ausprägung stark unterschiedlicher Temperaturzonen. Solche abiotischen Faktoren eignen sich durch ihre Orttreue besonders für ein teilschlagsorientiertes Feldmanagement. Über die stabilsten Faktoren, Topografie und Saumvegetation lassen sich entsprechend stabile und allgemein gültige Aussagen über das Mikroklima und die Wasserversorgung ableiten, etwa im Schatten von Bäumen oder Erhebungen, in kalten Senken oder auf sonnenexponierten Kuppen. Der Boden ist, trotz Beeinflussung durch Nährstoffentzug und Wasserzufuhr, als stabil anzusehen und braucht daher nur alle ein bis fünf Jahre beprobt werden (Ludowicy et al., 2002). Er bedingt wesentlich das Ertragspotential eines Standortes und ist daher geeignet, um Managementzonen auszuweisen. Eine Identifizierung von Relief bedingten Warm- und Kaltluftzonen, wie von Grenzdörfer (1991) vorgeschlagen, ist durch Thermografie möglich und ein vielversprechender Ansatz. Mikroklimatische Faktoren sind, abgesehen von der Hauptwindrichtung, vergleichsweise sehr kurzfristige Ereignisse. Um solche unregelmäßig eintretenden Ereignisse, speziell Blattnässedauer durch Niederschlag, im Sinne einer räumlichen oder zeitlichen Präzisierung, zonal zu erkennen, wäre eine zeitlich engmaschige Überwachung in maximal 30-minütigen Intervallen notwendig. Mit vorhandener Technik ist solches nicht möglich. Einfacher wäre die Erfassung von Blattnässe durch Tau, da dieses Ereignis zeitlich einzugrenzen ist. In Verbindung mit Befallsprognosemodellen könnte eine Einstufung der festgestellten Klimaunterschiede nach ihrer Pathogeneserelevanz erfolgen. Eine direkte Erkennung von Pathogenbefall zu einem Zeitpunkt, der eine protektive oder zumindest kurative Pflanzenschutzbehandlung erlaubt, scheint mit vorhandenen Methoden fraglich. Bei der Interpretation von thermografischen Aufnahmen von Pflanzenbeständen ist die Unspezifität der Bestandstemperatur zu berücksichtigen. Vorausgesetzt, dass sich im Bestand Zonen unterschiedlicher Temperatur abzeichnen, ist zu beachten, dass diese viele Ursachen haben können. Die Kombination von Sensoren, etwa der Chlorophyll-Fluorescence und der Thermographie könnte zu einer Differenzierung von Symptomen beitragen (Chaerle et al., 2001).

Die Referenz für die Empfindlichkeit fernerkundlicher Sensorik ist das menschliche Auge, verbunden mit der Interpretationsfähigkeit des Gehirns, aber auch dessen Individualität und Fähigkeit zu Fehleinschätzungen. Die Fernerkundung ist eine technisch aufwendige und kostenintensive Informationsquelle. Sie ist in der Praxis nur einzusetzen, wenn sie entweder

bedeutende Informationen liefert, die aus Bodennähe rein optisch nicht zu erhalten sind, wenn sie zuverlässiger ist als die menschliche Wahrnehmung oder wenn sie Zeit und damit Kosten spart (Nilsson, 1995). Zu bedeutenden Informationen würde die Erkennung von Problemen in der Bestandsführung in einem frühen Stadium zählen: Krankheitsbefall, Nährstoff- oder Wassermangel, bevor es zu wirtschaftlichen Schäden kommt, also solange ein kuratives Eingreifen noch möglich ist. Eine andere Variante wäre die Verbesserung von Prognosen, so dass es gar nicht erst zu einem Befall kommen muss. Darunter würde die Identifizierung von dauerhaft auftretenden, idealerweise Kultur unabhängigen Bestandszonen fallen. Wäre eine qualitative Zonierung, abgeleitet aus wenigen Luftaufnahme eines Schläges möglich, so könnte sie als eine dauerhafte Hintergrundkarte für die Bestellung von Kulturpflanzenbeständen dienen.

Im Falle der Thermografie müssen für eine zuverlässige Interpretation der gewonnenen Daten zeitlich variable Phänomene berücksichtigt werden. Solche können durch viele Faktoren entstehen, z.B. Sonnenstand, partielle Wolkenbeschattung, Aufnahmerichtung, Windrichtung und -stärke und Blattnässe, sowie Luftfeuchtigkeitsbedingungen, Habitus der Sorte zu verschiedenen Entwicklungsstadien und die Witterung der Saison. Daher ist die Thermografie nur ein Baustein der fernerkundlichen Sensorik und muss in Verbindung mit weiteren fernerkundlichen Sensoren, z.B. im multispektralen und optischen Bereich eingesetzt werden. Idealerweise wäre für jeden vitalitäts- und letztendlich ertragsbestimmenden Faktor ein geeigneter Sensor einzusetzen, um Bestandszonen mit unterschiedlicher Charakteristik identifizieren zu können. Der resultierende Stapel von Schlagkarten kann dann für die Ausweisung von Managementzonen kombiniert werden. Die thermografische Messung der Bestandstemperatur würde sich besonders für die Erkennung des Wasserstatus von Pflanzen anbieten, da die Transpiration die Blatttemperatur maßgeblich beeinflusst. Für die Erkennung von Blattkrankheiten im Freiland scheint sie weniger geeignet, da thermische Symptome von Blattkrankheiten weder für eine Krankheit noch für biotischen Stress spezifisch sind. Erst massive, großflächig auftretende Symptome würden zu einer Veränderung der Bestandstemperatur führen. Unter kontrollierten Bedingungen kann die Thermografie nützlich sein, um das Auftreten oder Fehlen eines einzelnen bekannten Faktors oder einer Eigenschaft z.B. latenter Virose oder der Trockenstressanfälligkeit zu unterscheiden (Chaerle et al., 1999; Rashid et al., 1998).

5 ZUSAMMENFASSUNG

Die digitale Infrarot-Thermografie (DIT) ist eine Technik, die die Messung von Temperaturen von Blättern bzw. Pflanzenbeständen berührungslos und damit auch aus größerer Entfernung ermöglicht. Die abbildende Darstellung der räumlich aufgelösten Temperaturdaten vereinfacht die Anwendung und erlaubt eine Verarbeitung hin zur Erstellung von Temperaturkarten von ganzen Pflanzenbeständen.

Lokale Veränderungen der Oberflächentemperatur lassen auf Veränderungen des Blattes schließen, die unspezifisch auf abiotische oder biotische Stressfaktoren zurückzuführen sind. Verletzungen der Kutikula führen zu einem unkontrollierten Wasserverlust und somit zu lokal begrenzter Abkühlung der Blattoberfläche. Nekrotisches Gewebe hingegen ist wärmer als vitales Gewebe. Bei der thermischen Betrachtung von Pflanzenbeständen kann die Blatttemperatur, je nach Bestandsdichte und Blickwinkel, oft nicht als einzelner Parameter erfasst werden. Stattdessen wird durch das Wärmebild die Bestandstemperatur erfasst. Diese setzt sich aus den Oberflächentemperaturen der Pflanzen und, abhängig vom Grad der Bodenbedeckung, aus der des Bodenanteils im Wärmebild zusammen. Eine präsymptomatische Erkennung von Blattkrankheiten ist mit der DIT möglich, wenn die Transpiration lokal durch den Pathogenbefall verändert wird.

Aus den durchgeführten Untersuchungen lassen sich folgende Erkenntnisse ableiten:

- Pflanzen sind nur durch die Veränderung der Transpirationsrate in der Lage, ihre Blatttemperatur zu regulieren. Dies führt zu einer Abkühlung der Blattoberfläche gegenüber der Oberflächentemperatur nicht transpirierender Objekte. Laboruntersuchungen an einzelnen Weizenpflanzen zeigten, dass bei steigender Umgebungstemperatur der Temperaturunterschied von vitalem, transpirierendem Gewebe zu einer weniger oder gar nicht transpirierenden Referenzoberfläche zunimmt.
- Die Blatttemperatur ist durch die große Austauschfläche eng an umgebende Temperaturen gebunden, die sich durch Konvektionswärme (Lufttemperatur) und Strahlungswärme auf das Blatt übertragen. Kurzfristige Veränderungen der Umgebungsbedingungen wirken sich direkt auf die Bestandstemperatur aus. Entweder verschiebt sich nur das Temperaturniveau, dabei bleiben relative Temperaturunterschiede erhalten, oder relative Temperaturunterschiede verändern sich, weil bestimmte Bestandszonen unterschiedlich auf die Veränderung der Umgebungsbedingungen reagieren.
- Der hohe Fragmentierungsgrad der Blattflächen von Weizenpflanzen erschwerte die Messung der Blatttemperatur im Labor. Um Blattfläche und Hintergrund in den Thermogrammen zu trennen, wurde der Hintergrund um ca. 15 K gegenüber der Umgebungstemperatur gekühlt. So konnten die einzelnen Pixel des Thermogramms anhand einer

Trenntemperatur entweder dem Hintergrund oder der Blattfläche zugeordnet werden. Nach Bestimmung der Blattfläche konnte die Blatttemperatur als Temperatur des Anteils wärmster Pixel berechnet werden.

- Der Befall von Weizenpflanzen mit Braunrost war unter kontrollierten Bedingungen thermografisch an einer Abkühlung der Blattfläche zu erkennen. Bei hoher Variabilität zwischen den Wiederholungen trat dieses ab dem sechsten Tagen nach Inokulation auf. Die Temperaturdifferenz folgte im Verlauf der Pathogenese keinem einheitlichen Trend und war nicht signifikant. Auch ließen sich unterschiedliche Befallsstärken nicht thermografisch unterscheiden.
- Durch eine Infektion mit Bohnenrost änderte sich die Blatttemperatur von Bohnenblättern kaum. Hingegen stiegen die Streuung der Temperaturen und die Temperaturspanne auf den einzelnen Blättern an. Die Form von Blatttemperaturzonen veränderte sich von großen, zusammenhängenden Zonen mit fließenden Übergängen hin zu stark fragmentierten, scharf gegeneinander abgegrenzten Zonen. Thermografisch war die Infektion geringfügig früher zu erkennen als optisch.
- Zur Aufnahme der Bestandstemperatur eines Weizenbestandes stellten sich Stativaufnahmen als ungeeignet heraus, da für die einzeln aufgenommenen Streifen keine einheitlichen Messbedingungen galten. Die Verarbeitbarkeit von Luftaufnahmen setzte voraus, dass sich die perspektivische Verzerrung bei nicht senkrechten Aufnahmen in Grenzen hielt. Zur Georeferenzierung waren sowohl Passpunkte an den Feldecken als auch innerhalb der Feldfläche notwendig. Diese Punkte mussten im Thermogramm erkennbar sein; ausgemähte Streifen von mindestens 0,5 m Breite waren dazu nützlich.
- Die Befallsstärke von Mischinfektionen durch Braunrost und Blattseptoria an Weizen in zwei Großparzellen konnte im Freiland anhand der Bestandstemperaturen nicht differenziert werden. Dieses galt sowohl für den Vergleich mit / ohne Fungizidbehandlung als auch für die lokal unterschiedlichen Befallsstärken in einem Bestand ohne Fungizidbehandlung.
- In einem Kleinparzellenversuch hatten Parzellen ohne Fungizidbehandlung eine um bis zu 0,8 K höhere Bestandstemperatur als Parzellen mit Fungizidbehandlung; der Unterschied war signifikant. Ertragsunterschiede ließen sich aus den Bestandstemperaturunterschieden nicht ableiten.
- Unterschiedliche Bestandsdichte war durch eine Veränderung der Bestandstemperatur zu erkennen. Dichte Zonen waren zwischen 0,8 und 2,2 K kälter als Zonen mit geringerer Bestandsdichte.
- Wiederholt trat in einem Weizenbestand ein streifenförmiges Temperaturmuster auf, das nicht parallel zur Bearbeitungsrichtung ausgerichtet war. Da es sich um einen ebenen,

homogenen Bestand handelte, weist die Variation der Bestandstemperatur darauf hin, dass es ein thermisches Grundrauschen gibt.

- Die Ertragsvariation des homogenen Bestandes zeigte keine räumliche Korrelation mit der Bestandstemperatur. Es ist anzunehmen, dass die gemessenen Temperaturunterschiede zu gering waren, als dass man sie als Anzeichen für ertragsrelevante, physiologische Unterschiede hätte interpretieren können.
- Blattnässe war als einzelne Tropfen und als Bestandsnässe thermografisch durch eine Abkühlung um bis zu 4,0 K erfassbar. Im Freiland betrug der Temperaturunterschied nach einer künstlichen Beregnung von ca. 3mm bis 0,8 K. Der Vergleich der Bestandstemperatur vor und nach einem Niederschlag von ca. 2 mm zeigte keine Abkühlung des nassen Bestandes, führte aber zu einer Erhöhung der kleinräumigen Temperaturheterogenität. Die Überlagerung von lokalen Blattnässemesswerten und der Bestandstemperaturverteilung zeigte, dass sich beide Parameter auf gegenläufigen Gradienten bewegten; höhere Blattnässe im Bereich geringerer Bestandstemperatur, geringere Blattnässe im Bereich höherer Bestandstemperatur.
- Eine heterogene Verteilung des Mikroklimas mit den Pathogenese relevanten Parametern Lufttemperatur, rel. Luftfeuchtigkeit und Blattnässe führt zu einer heterogenen Verteilung von Befallsstärke und -häufigkeit. In einem homogenen Weizenbestand zeigten Vergleiche des lokal gemessenen Mikroklimas eine deutlich unterschiedliche Ausprägung der wesentlichen Parameter. In der Summe traten über die Messdauer Pathogenese relevante, lokale Unterschiede in der Blattnässedauer auf. In einem heterogenen Bestand zeigte sich die Abhängigkeit von Bestandsdichte und Abtrocknungsdauer von Niederschlägen unterschiedlicher Höhe. Im selben Bestand variierten auch die Lufttemperatur und rel. Luftfeuchtigkeit. Die Lufttemperatur variierte tagsüber am stärksten; ein Zusammenhang mit dem Temperaturniveau war dabei nicht zu erkennen. Die Luftfeuchtigkeitverteilung wies tagsüber die größte Heterogenität auf, jedoch bei Pathogenese unrelevantem Niveau < 60%. Nachts traten deutlich höhere Werte auf, > 80 %, die aber kaum variierten.

Ein teilfächiger Pflanzenschutz basiert auf einer örtlich und zeitlich präzisierten Prognose der Entwicklung bedeutender Blattkrankheiten wie Braunrost und Septoriablattdürre. Die digitale Infrarotthermografie kann zu einer Erkennung und Ausweisung von unterschiedlichen Managementzonen in einem Weizenbestand beitragen.

6 LITERATURVERZEICHNIS

- Alchanatis V, Cohen Y, Meron M, Tsipris J, Naor A, Cohen S, Harit Z, Ostrovsky V, 2005. Fusion for thermal IR and color images for evaluation of crop water stress. In: Book of Abstracts 5 ECPA-2 ECPLF. Stafford J V, (Ed.), Wageningen Academic Publishers, Wageningen, NL, 141: 6, 30-32. ISBN 91 7072
- Anonym, 2002a. Einführung in die Theorie und Praxis der Infrarot-Thermografie. Infratec GmbH, Dresden.
- Anonym, 2002b. Benutzerhandbuch IRBIS Plus – Infrarot-Thermografiesoftware. Infratec GmbH, Dresden.
- Avendano F, Pierce F J, Schabenberger O, Melakeberhan H, 2004. The spatial distribution of soybean cyst nematode in relation to soil texture and soil map unit. *Agronomy Journal* 96: 181-194.
- Ayeneh A, Van Ginkel M, Reynolds M P, Ammar K, 2002. Comparison of leaf, spike, peduncle and canopy temperature depression in wheat under heat stress. *Field Crops Research*, 79: 173-184.
- Ayres R G, 1976. Patterns of stomatal behaviour, transpiration, and CO₂ Exchange in pea following infection by powdery mildew (*erysiphe pisi*). *Journal of Experimental Botany*, 27(101): 1196-1205.
- Bacci L, Benincasa F, Marachi G, Zipoli G, 1991. Ground-based remote-sensing measurements for early detection of plant stresses. *Bulletin OEPP / EPPO Bulletin*, 21: 673-681.
- Bassanezi R B, Amorim L, Bergamin Filho A, Berger R D, 2002. Gas exchange and emission of chlorophyll fluorescence during the monocycle of rust, angular leaf spot and anthracnose on bean leaves as a function of the trophic characteristics. *J. Phytopathology*, 150: 37-47.
- Breidenbach R W, Saxton M J, Hansen L D, Criddle R S, 1997. Heat generation and dissipation in plants: Can the alternative oxidative phosphorylation pathway serve a thermoregulatory role in plant tissues other than specialized organs? *Plant Physiology*, 114: 1137-1140.
- Chaerle L, van Caeneghem W, Messen E, Lambers H, Van Montagu M, Van der Straeten D, 1999. Presymptomatic visualization of plant-virus interaction by thermography. *Nature Biotechnology*, 17: 813-816.
- Chaerle L, Van der Straeten D, 2000. Imaging techniques and the early detection of plant stress. *Trends in Plant Science*, 5(11): 495-501.

- Chaerle L, Van der Straeten D, 2001. Seeing is believing: imaging techniques to monitor plant health. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1519: 153-166.
- Chtioui Y, Francl L J, Panigrahi S, 1997. Artificial neural network models for wheat leaf wetness. *Agric For. Meteorol.*, 88: 57-65.
- Coutts B A, Thomas-Carroll M L, Jones R A C, 2004. Analysing spatial patterns of spread of *Lettuce necrotic yellows virus* and lettuce big-vein disease in lettuce field plantings. *Ann. Appl. Biol.*, 145: 339-343.
- Derksen W J, 1974. Thermal infrared pictures and the mapping of microclimate. *Neth. J. Agri. Sci.*, 22: 119-132.
- DeVallavieille-Pope C, Huber L, Leconte M, Goyeau H, 1995. Comparative effects of temperature and interrupted wet periods on germination, penetration and infection of *Puccinia recondita* f. sp. *tritici* and *P. striiformis* on wheat seedlings. *Phytopathology*, 85(4): 409-415.
- Dammer K-H, Reh A, Wartenberg G, Ehlert D, Hammen V, Dohmen B, Wagner U, 2001. Recording of present plant parameters by pendulum sensor, remote sensing and ground measurements as fundamentals for site-specific fungicide application in winter wheat. *Proceedings 3rd European Conference on Precision Agriculture*, 2: 647-652.
- Dabbert S, Kilian B, 2002. Ökonomie. In: *Precision Agriculture, Herausforderung an integrative Forschung, Entwicklung und Anwendung in der Praxis*. Werner A & Jarfe A, (Eds.), KTBL (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.), Darmstadt, 423-446.
- Dawson C J, 1997. Management for spatial variability. In: *Precision Agriculture '97: Volume 1, Spatial variability in soil and crop*. Stafford J V, (Ed.), BIOS Scientific publishers, Oxford, UK, 45-58.
- Duniway J M, Durbin, R D, 1971. Some effects of *uromyces phaseoli* on the transpiration rate and stomatal response of bean leaves. *Phytopathology*, 61: 114-119.
- Ellis R H, 1997. Determining appropriate seed sowing rates. In: *Precision Agriculture '97: Volume 1, Spatial variability in soil and crop*. Stafford J V, (Ed.), BIOS Scientific publishers, Oxford, UK, 281-288.
- Eversmeyer M G, Kramer C L, Hassan Z M, 1988. Environmental influences on the establishment of *Puccinia recondita* infection structures. *Plant Disease*, 71: 409-412.
- Fenton J P, 1998. On-farm experiences of precision farming. *Proceedings 426 of International Fertiliser Society Conference*, Cambridge, UK, 11th dec. 1998, ISBN: 0 85310 060 8.
- Fuchs M, Tanner C B, 1966. Infrared thermometry of vegetation. *Agronomy Journal*, 58: 597-601.

- Gebhardt A, 1984. Möglichkeiten zur Früherkennung phytopathologischer Erscheinungen mit Hilfe der Thermografie – Übersicht und erste Ergebnisse. Arch. Phytopathol. u. Pflanzenschutz, 20(5): 437-455.
- Gleason M L, Taylor S E, Loughin T M, Koehler K J, 1994. Development of validation of an empirical model to estimate the duration of dew periods. Plant Disease, 78: 1011-1016.
- Godwin R J, Wood G A, Taylor J C, Knight S M, Welsh J P, 2003. Precision farming on cereal crops: a review of a six year experiment to develop management guidelines. Biosystem Engineering, 84(4): 375-391.
- Grenzdörffer G, 1999. Dokumentation und Analyse kleinräumiger Heterogenität mit Fernerkundung und GIS.- KTBL Arbeitspapier 264, 93-105.
- Gunasekera D, Berkowitz, G A, 1992. Heterogenous stomata closure in response to leaf water deficits is not a universal phenomenon. Plant Physiology, 98: 660-665.
- Gutsche V, Kluge E, 1995. Das neue Phytophthora Prognoseverfahren SIMPHYT. Kartoffelbau, 46 (5): 198-201.
- Kleinhenz B, Gutsche V. Validation and utilization of the forecasting models SIMCERC and SIMPHYT in plant protection adive. SP-Report, Danish Inst. Plant and Soil Science, 15: 49-58.
- Häckel H, 1999. Meteorologie. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, ISBN 3-8001-2728-8.
- Hammer P A, Tibbits, T W, Langhans R W, McFarlane J C, 1987. Base-line growth studies of „Grand Rapids“ lettuce in controlled environments. J. Amer. Soc. Hort. Sci., 103: 649-655.
- Hatfield J L, Pinter P J Jr, Chasseray E, Ezra C E, Reginato R J, Idso S B, Jackson R D, 1984. Effects of panicles on infrared thermometer measurements of canopy temperature in wheat. Agricultural and Forest Meteorolgy, 32: 97-105.
- Hatfield J L, 1990. Remote detection of crop stress: Application to plant pathology. Phytopathology, 80: 37-39.
- Hoffmann G M, Neinhaus F, Poehling H-M, Schönbeck F, Weltzien H C, Wilbert H, 1994. Lehrbuch der Phytomedizin, 3. Auflage, Blackwell Wissenschafts-Verlag, Berlin.
- Huber L, Gillespie T J, 1992. Modeling leaf wetness in relation to plant disease epidemiology. Ann. Rev. Phytopathol., 30: 553-577.
- Inoue Y, 1990. Remote sensing of physiological depression in crop plants with thermal imagery. Japan. J. Crop Sci., 59(4): 762-768.
- Inoue Y, Kimball B A, Jackson R D, Pinter P J Jr, Reginato R J, 1990. Remote sensing of leaf transpiration rate and stomatal resistance based on infrared thermometry. Agricultural and Forest Meteorolgy, 51: 21-33.

- Isoda A, Wang P, 2002. Leaf temperature and transpiration of field grown cotton and soybean under arid and humid conditions. *Plant Prod. Sci.*, 5(3): 224-228.
- Jackson R D, 1986. Remote sensing of biotic and abiotic plant stress. *Ann. Rev. Phytopathology*, 24: 265-287.
- Jones F G W, 1980. Some aspects of the epidemiology of plant-parasitic nematodes. In: *Comparative epidemiology. A tool for better disease management.* Palti J., Kranz J. (Eds.). Wageningen, Netherlands, 71-92.
- Jones H G, 1999. Use of thermography for quantitative studies of spatioal and temporal variation of stomatal conductuance over leaf surfaces. *Plant, Cell and Environment*, 22: 1043-1055.
- Kluge E, Enzian S, Gutsche V, 1999. Atlas der potentiellen Befallsgefährdung durch wichtige Schadorganismen im Ackerbau Deutschlands. BBA für Land- u. Forstwirtschaft Berlin u. Braunschweig.
- Lamari L, 2002. Image analysis software for plant disease quantification. Department of Plant Science, University of Manitoba, Canada, APS Press, St. Paul, MN, USA.
- Lindenthal M, Steiner U, Dehne H W, 2005. Effect of downy mildew development on transpiration of cucumber leaves visualized by digital infrared thermography. *Phytopathology*, 95(3): 233-240.
- Lili Z, Duchesne J, Nicolas H, Rivoal R, 1991. Détection infrarouge thermique des maladies du blé d'hiver. *Bulletin OEPP/EPPO Bulletin*, 21: 659-672.
- Lovell D J, Hunter T, Powers S J, Parker S R, Van den Bosch F, 2004. Effect of temperature on latent period of septoria leaf blotch on winter wheat under outdoor conditions. *Plant Pathology*, 53:170-181.
- Lu Z M, Percy R G, Qualset C O, Zeiger E, 1998. Stomatal conductance predicts yields in irrigated Pima cotton and bread wheat grown at high temperatures. *J. Exp. Bot.*, 49: 453-460.
- Ludowicy C, Schwaiberger R, Leithold P, 2002. *Precision Farming: Handbuch für die Praxis.* DLG-Verlag, Frankfurt a.M., ISBN 3-7690-0600-3.
- Madden L, Pennypacker S P, MacNab A A, 1978. FAST, a forecast system for *Alternaria solani* on tomatoes. *Phytopathology*, 68: 1354-1358.
- Manthe B, Schulz M, Schnabl H, 1992. Effects of salicylic acid on growth and stomatal movement of *Vicia faba* L.: Evidence for salicylic acid metabolization. *Journal of Chemical Ecology*, 18(9): 1525-1539.
- McGrath M T, Pennypacker S P, 1990. Alteration of physiological processes in wheat flag leaves caused by stem rust and leaf rust. *Phytopathology*, 80(8): 677-686.

- Mengistu A, Tachibana J, Epstein A H, Bidne, K G Hatfield, J D, 1987. Use of leaf temperature to measure the effect of brown stem rot and soil moisture stress and its relation to yields of soybean. *Plant Disease*, 71: 632-634.
- Merlot S, Mustilli A C, Genty B, North, H, Lefebvre V, Sotta B, Vavasseur A, Giraudat J, 2002. Use of infrared thermal imaging to isolate arabidopsis mutants defective in stomatal regulation. *Plant Journal.*, 30(4): 601-609.
- Mott K A, Parkhurst D F, 1991. Stomatal responses to humidity in air and helox. *Plant, Cell and Environment*, 14, 509-515.
- Nilsson H E, 1984. Remote Sensing of 6-row barley infected by barley stripe disease. *Växtskyddsrapporter, Jordbruk, Uppsala*, 36: 1-49.
- Nilsson H E, 1991. Hand-held radiometry and IR-thermography of plant diseases in field plot experiments. *Int. J. Remote Sensing*, 12(3): 545-557.
- Nilsson H E, 1995. Remote sensing and image analysis in plant pathology. *Annu. Rev. Phytopathol.*, 33: 489-527.
- Nilsson H, Johnsson L, 1996. Hand-held radiometry of barley infected by barley stripe disease in a field experiment. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz*, 103(5): 517-526.
- Nilsson H E, Linnér H, 1987. IR-thermography of canopy temperatures of wheat and barley at different nitrogen fertilization and irrigation. *Växtskyddsrapporter, Jordbruk (Uppsala)*, 43: 1-49.
- Nordmeyer H, Häusler A, Niemann P, 1997. Patchy weed control as an approach in precision farming. In: *Precision Agriculture '97: Volume 1, Spatial variability in soil and crop*. Stafford J V, (Ed.), 307-314.
- Oerke E-C, Steiner U, 2003. Wie funktionieren Fungizide? Bayer Kurier online.
- Østergaard H S, 1997. Agronomic consequences of variable fertilization. In: *Precision Agriculture '97: Volume 1, Spatial variability in soil and crop*. Stafford J V, (Ed.), 315-320.
- O'Toole J C, Hatfield J L, 1983. Effect of wind on the crop water stress index derived by infrared thermometry. *Agronomy Journal*, 75: 812-817.
- Pierce F J, Nowak P, 1999. Aspects of precision agriculture. *Advances in Agronomy*, 67: 1-85.
- Pinter P J Jr., 1979. Remote detection of biological stresses in plants with infrared thermometry. *Science*, 205: 585-587.
- Pinter P J Jr., Zipol G, Reginato R J, Jackson R D, Idso S B, Hohmann J P, 1990. Canopy temperature as an indicator of differential water use and yield performance among wheat cultivars. *Agri. Water Management*, 18: 35-48.

- Rashid A, Stark J C, Tanveer A, Mustafa T, 1999. Use of canopy temperature measurements as a screening tool for drought tolerance in spring wheat. *J. Agronomy & Crop Science*, 182: 231-237.
- Schueller J K, 1997. Technology for precision agriculture. In: *Precision Agriculture '97: Volume 1, Spatial variability in soil and crop*. Stafford J V, (Ed.), 33-44.
- Schwaiberger R, 2001. „Hydro-N-Sensorsysteme“ im praktischen Einsatz – Status Quo 2001. Tagungsband VDI, 297-302.
- Secher B J M, 1997. Site specific control of diseases in winter wheat. *Aspects of Applied Biology*, 48: 57-64.
- Seem R C, Magnus, H A, Hjönnevaag V, 1991. High resolution weather information for plant protection. *Bulletin OEPP / EPPO Bulletin*, 21: 355-364.
- Shtienberg D, 1992. Effects of foliar diseases on gas exchange processes: a comparative study. *Phytopathology*, 82: 760-765.
- Smith R C G, Heritage A D, Stapper M, Barrs H D, 1986. Effect of stripe rust (*puccinia striiformis* west.) and irrigation on the yield of foliage temperature of wheat. *Field Crops Research*, 14: 39-51.
- Stuckey R E , Zadoks J C, 1989. Effect of interrupted leaf wetness periods on pustule development of *Puccinia recondita* f. sp. *tritici* on wheat. *Neth. J. Plant Pathol.*, 95:175-185 (Suppl.).
- Taiz L, Zeiger E, 2000. *Physiologie der Pflanzen*. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.
- Tartachnyk I, Blanke M, 2002, Effect of mechanically-simulated hail on photosynthesis, dark respiration and transpiration of apple leaves. *Environmental and Experimental Botany*, 48(2), 169–175 .
- Tartachnyk I, Rademacher I, 2003. Estimation of nitrogen deficiency of sugar beet and wheat using parameters of laser induced and pulse amplitude modulated chlorophyll fluorescence. *Journal of Applied Botany*, 67: 61-67.
- Verreet J A, Kink H, Hoffmann G M, 2000. Regional monitoring for disease prediction and optimization of plant protection measures: the IPM wheat model. *Plant Disease*, 84(8): 816-826.
- Volk T, Frahm J, 1993. Das Pflanzenschutz-Beratungssystem PRO_PLANT: Photomedizinische Grundlagen am Beispiel der Netzfleckenkrankheit der Gerste. In: *Gesunde Pflanzen*, 45: 216-222.

- Vrindts E, Reyniers M, Darius P, De Baerdemaeker J, Gilot M, Sadaoui Y, Frankinet M, Hanquet B, Destain M-F, 2003. Analysis of soil and crop properties for precision agriculture for winter wheat. *Biosystems Engineering*, 85(2): 141-152.
- Weyers J D B, Lawson T, 1997. Heterogeneity in stomatal characteristics. *Advances in Botanical Research*, 26: 317-353.
- Waggoner P E, Aylor D E, 2000. Epidemiology: a science of patterns. *Annual Review of Phytopathology*, 38: 71-94.
- Wiegand C L, Namken L N, 1966. Influences of plant moisture stress, solar radiation and air temperature on cotton leaf temperature. *Agronomy Journal*, 58: 582-586.
- Wieringa J, 1998. How far can agrometeorological station observations be considered representative. 23rd Conference on Agricultural and Forest Meteorology, 9-12.
- Wigley G, Clark JA, 1974. Heat transport coefficients of constant energy flux models of broad leaves. *Boundary Layer Meteorology*, 7: 139-150.
- Wilks, D S, Shen, K W, 1991. Threshold relative humidity duration forecasts for plant disease prediction. *Journal of Applied Meteorology*, 30: 463-477.

Eigene Publikationen

- Lenthe J H, Oerke E C, Dehne H W, 2003. Thermography as a tool for the forecasting of fungal infections of wheat. In: Werner A & Jarfe A (Eds.). Programm book of the joint conference of ECPA – ECPLF, Berlin, p.477-478.
- Lenthe J H, Oerke E C, Dehne H W, 2004. Einsatz digitaler Infrarot-Thermografie zur Erfassung ertragsrelevanter Bestandsparameter im Weizen. In: Hering O & Brandt B, (Hrsg.). *Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft*, S.524.
- Lenthe J H, Oerke E C, Dehne H W, 2005. Digital infrared thermography for monitoring canopy health of wheat. In: Stafford J V (Ed.). *Precision Agriculture 2005*, Wageningen, Academic Publishers, p.281-288.

Danksagungen

Herrn Prof. Dr. H.-W. Dehne danke ich für die Überlassung des Themas, für die Unterstützung und das mir entgegengebrachte Vertrauen in die Durchführung dieser Arbeit.

Herrn Prof. Dr. W. Kühbauch vom Institut für Pflanzenbau danke ich für sein Interesse und die freundlichen Übernahme des Korreferats.

Herrn Dr. E.-C. Oerke danke ich besonders für die unermüdliche Unterstützung bei Fragen und Problemen, für zahlreiche Diskussionen und Anregungen.

Bei den Versuchstechnikern des Versuchshofs Dikopshof und Klein Altendorf bedanke ich mich für die reibungslose, pflanzenbauliche Betreuung der Freilandversuche.

Herrn D. Boeckenhoff von der BASF AG und Herrn H. Peters vom Dingbuchenhof danke ich sehr für die Bereitstellung und Betreuung von Versuchsfeldern.

Meinen Kollegen aus dem Institut für Pflanzenkrankheiten und den Kollegiaten des Graduiertenkollegs 722 danke ich ganz herzlich für alle Hilfe, für fachliche und ausserfachliche Anregungen und Diskussionen.

Allen Mitarbeitern des Instituts für Pflanzenkrankheiten danke ich herzlich für ihre Hilfsbereitschaft und die freundliche Arbeitsatmosphäre.

Der DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft) danke ich für die Finanzierung dieses Projektes.