

Institut für Nutzpflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz
der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn
Bereich Phytomedizin

**Anwendungsmöglichkeiten der Infrarotthermographie zur
Detektion von *Cercospora*-Blattfleckenkrankheit,
Echtem Mehltau und Rübenrost an Zuckerrüben**

Inaugural - Dissertation

zur

Erlangung des Grades

Doktor der Agrarwissenschaften

(Dr. agr.)

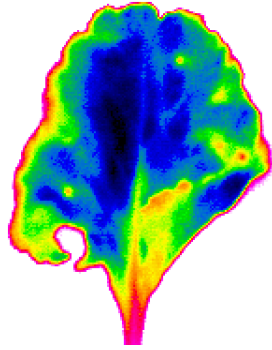
der Hohen Landwirtschaftlichen Fakultät
der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität zu Bonn

vorgelegt im Juli 2009

von

Dipl.-Ing. agr. Irene Heinrich

aus Freising



Diese Dissertation ist auf dem Hochschulschriftenserver der ULB Bonn http://hss.ulb.uni-bonn.de/diss_online publiziert (2011).

Referent:	Prof. Dr. H.-W. Dehne
Koreferent:	Prof. Dr. W. Kühbauch
Tag der mündlichen Prüfung:	28. Januar 2011
Erscheinungsjahr:	2011



...and the end of all our exploring will be to arrive where we started and know the place for the first time.

THOMAS STEARNS ELIOT

Irene Heinrich

Anwendungsmöglichkeiten der Infrarotthermographie zur Detektion von *Cercospora*-Blattfleckenkrankheit, Echtem Mehltau und Rübennrost an Zuckerrüben

Die Kenntnis über die räumliche Verteilung von Krankheiten im Feld ist Voraussetzung für den Präzisen Pflanzenschutz. In dieser Arbeit wurde geprüft, inwieweit sich die Infrarotthermographie eignet, die *Cercospora*-Blattfleckenkrankheit, Echten Mehltau und Rübennrost an Zuckerrüben zu detektieren. Die Temperatur gesunder Pflanzen und solcher unter abiotischem Stress wurde erfasst. Zur Untersuchung der Blattmorphologie kamen mikroskopische Methoden zur Anwendung. Die Auswirkungen von Symptomen auf die Temperatur und die photosynthetische Effektivität von Blattgewebe wurden mit einer Thermo- und einer Chlorophyllfluoreszenzkamera gemessen. An verschiedenen Standorten wurde die Thermographie im Feld eingesetzt.

Die Temperatur gesunder Zuckerrübenpflanzen änderte sich nicht während ihres Wachstums, die einzelner Blätter nahm zu. Die Höhe der Blätter, eine horizontale Ausrichtung und eine geringe Anzahl Stomata pro Flächeneinheit mit großen Poren waren mit einer Temperaturzunahme gegenüber der Lufttemperatur assoziiert. Pflanzen unter Wassermangel und Staunässe erwärmten sich im Vergleich zu nicht gestressten.

Blattflecken des perthotrophen Erregers *Cercospora beticola* (Sacc.) und Uredien des obligat biotrophen Erregers *Uromyces betae* (Pers.) Léveillé führten zu einer lokalen Temperaturerhöhung und einer Verringerung der Chlorophyllfluoreszenz. Symptome von *Cercospora beticola* konnten vor ihrem visuellen Erscheinen mit den Sensoren detektiert werden. Pusteln des obligat biotrophen Erregers *Erysiphe betae* (Van.) Weltzien ließen sich nicht im Detail erfassen.

Sowohl auf Standorten mit homogenem als auch mit heterogenem Bestand und ausgeprägtem Relief traten die Krankheiten bevorzugt in bestimmten Feldbereichen auf. Ihre Verbreitung unterschied sich bezüglich der Befallshäufigkeit und -stärke. Während die direkte Detektion der Krankheiten mittels Thermographie aufgrund von externen Störgrößen nicht möglich war, fielen Feldbereiche, die später besonders befallen wurden, bereits vor dem Auftreten von Symptomen durch eine geringe Bestandestemperatur auf.

Die Infrarotthermographie stellt somit ein hilfreiches Utensil bei der frühzeitigen Detektion von Symptomen auf Blattebene und bei der Bestimmung von Managementzonen für den Präzisen Pflanzenschutz bei Zuckerrüben dar.

Irene Heinrich

Possibilities of application of infrared thermography in the detection of *Cercospora*-disease, powdery mildew and rust on sugar beet

Knowledge on the spatial distribution of diseases in the field is a precondition for precision crop protection. In this work it was tested, in how far infrared thermography is applicable to detect *Cercospora*-disease, powdery mildew and rust on sugar beet. Temperature of healthy plants and of such under abiotic stress was measured. For the investigation on leaf morphology microscopic methods were used. Effects of symptoms on temperature and on the photosynthetic effectiveness of leaf tissue were measured with a thermal and a chlorophyll fluorescence camera. The thermal sensor was applied to different field sites.

Temperature of healthy sugar beet plants did not change during plant growth, temperature of single leaves increased. Height of leaves, horizontal orientation and small amount of stomatal openings per unit leaf area with large pore size were associated with a temperature increase compared to air temperature. Plants stressed by water deficiency and waterlogging grew warmer in comparison to plants non-stressed.

Leaf spots of the perthotroph pathogen *Cercospora beticola* (Sacc.) and uredia of the obligate biotroph pathogen *Uromyces betae* (Pers.) Léveillé induced a local rise in temperature and a decrease in chlorophyll fluorescence. Symptoms of *Cercospora beticola* were detectable by the sensors before their visual appearance. Pustules of the obligate biotroph pathogen *Erysiphe betae* (Van.) Weltzien could not be measured in detail.

In field sites with homogeneous as well as in sites with heterogeneous plant stand and distinct relief diseases preferred certain areas. Their distribution differed regarding infection frequency and disease severity. While direct detection of the diseases by thermography was not possible due to external disturbances, field areas, which favoured disease infestation could be localised before first symptoms arose due to their low canopy temperature.

Infrared thermography is therefore a useful device in the early detection of symptoms on leaf scale and in the delineation of management zones for precision crop protection in sugar beet.

1	EINLEITUNG.....	1
2	MATERIAL UND METHODEN.....	9
2.1	Pflanzen	9
2.2	Pflanzenanzucht	10
2.3	Bewertung der Pflanzenentwicklung	10
2.4	Pathogene	11
2.5	Erhaltung und Vermehrung der Pathogene	12
2.6	Inokulation der Pflanzen	13
2.7	Bonitur des Befalls	14
2.8	Mikroskopische Untersuchungen	15
2.8.1	Probenahme und - aufbereitung	15
2.8.2	Färbung der Pilzstrukturen	16
2.9	Messung des Wassergehalts	16
2.10	Induktion von abiotisch bedingtem Stress	17
2.10.1	Wassermangel	17
2.10.2	Stauässe	17
2.11	Digitale Infrarotthermographie	18
2.11.1	Kameras	18
2.11.2	Durchführung der Temperaturmessung.....	18
2.11.3	Software und Auswertung der Messergebnisse.....	22
2.12	Chlorophyllfluoreszenz	24
2.12.1	Sensor	24
2.12.2	Software und Auswertung der Messergebnisse.....	24
2.13	Digitale Photographie und Videoaufnahmen	26
2.14	Automatisierte Messvorrichtung zur Sensorsteuerung	26
2.15	Multispektrale Fernerkundung	28
2.16	Freilandversuche	28
2.16.1	Poppelsdorf.....	28

2.16.1.1	Versuchsanlage	28
2.16.1.2	Versuchsdurchführung.....	29
2.16.2	Klein-Altendorf.....	29
2.16.2.1	Versuchsanlage	29
2.16.2.2	Versuchsdurchführung.....	30
2.16.3	Frankenforst	30
2.16.3.1	Versuchsanlage	30
2.16.3.2	Versuchsdurchführung.....	31
2.16.4	Dikopshof.....	31
2.16.4.1	Versuchsanlage	31
2.16.4.2	Versuchsdurchführung.....	32
2.16.5	Messung der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit.....	32
2.16.6	Erhebung von Witterungsdaten.....	33
2.16.7	Ermittlung von Befallsrängen	33
2.16.8	Georeferenzierung der Versuchsflächen.....	34
2.17	Statistische Auswertungen.....	34
3	ERGEBNISSE	35
3.1	Einfluss von Pflanzenentwicklung und abiotischem Stress auf die Temperatur von Zuckerrüben	35
3.1.1	Entwicklungsstadium.....	35
3.1.2	Blattalter.....	36
3.1.3	Morphologische Blattmerkmale.....	40
3.1.4	Wassergehalt der Blätter	45
3.1.5	Abiotische Stressfaktoren	46
3.1.5.1	Wassermangel.....	46
3.1.5.2	Staunässe.....	48
3.2	Sensorische Erfassung des Pathogenbefalls.....	51
3.2.1	<i>Cercospora</i> -Blattfleckenkrankheit.....	51
3.2.1.1	Befallsverlauf.....	51
3.2.1.2	Einfluss auf die Blattoberflächentemperatur	54
3.2.1.3	Einfluss auf die Effektivität der Photosynthese.....	60
3.2.2	Echter Mehltau	62

3.2.2.1	Befallsverlauf	62
3.2.2.2	Einfluss auf die Blatttemperatur.....	63
3.2.2.3	Einfluss auf die Effektivität der Photosynthese	67
3.2.3	Rübenrost.....	67
3.2.3.1	Befallsverlauf	67
3.2.3.2	Einfluss auf die Blatttemperatur.....	70
3.2.3.3	Einfluss auf die Effektivität der Photosynthese	75
3.2.4	Sensorenpotential zur präsymptomatischen Erfassung von Infektionen.....	76
3.3	Sensorgestützte Darstellung und Beurteilung der Heterogenität von Zuckerrübenbeständen	79
3.3.1	Einfluss des Bodens und der Topographie	79
3.3.2	Bestandesdichte und -vitalität als Indikator für Heterogenität.....	85
3.4	Sensorgestützte Darstellung und Beurteilung der Heterogenität von Blattfleckenkrankheiten an Zuckerrüben.....	93
3.4.1	Auftreten und zeitliche Variabilität.....	93
3.4.2	Verbreitung und räumliche Heterogenität.....	97
3.5	Detektion von Krankheitssymptomen im Bestand mittels Thermographie	104
3.6	Detektion von Befalls-Risikobereichen über Temperaturzonen im Bestand	107
4	DISKUSSION.....	120
5	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	152
6	LITERATURVERZEICHNIS	157

1 EINLEITUNG

Weltweit werden 35 % des Rohzuckerbedarfes durch Zuckerrüben (*Beta vulgaris* L.) gedeckt (OERKE und DEHNE, 2004). Im Wirtschaftsjahr 2004/2005 wurden in der EU knapp 15 Millionen Tonnen produziert (MARSH, 2006). Deutschland ist der dritt-wichtigste Zuckerrübenproduzent. Die Hauptanbaugebiete befinden sich in der Köln-Aachener Bucht, der Hildesheimer Börde südlich von Hannover, im Länderdreieck von Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz und Hessen, und dem Gäuboden in Bayern. Trotz des konkurrierenden Anbaus von Zuckerrohr aus tropischen Ländern, war die Zuckerrübe in Europa stets eine der wettbewerbsfähigsten Feldfrüchte. Ihr Anbau wird in der gemeinsamen Agrarpolitik durch die Marktorganisation für Zucker über Quoten geregelt. Im Februar 2006 verabschiedete die Europäische Union für das Wirtschaftsjahr 2006/2007 eine Reform der Zuckermarktordnung (Nr. 318/2006). Diese war unter anderem mit einer Senkung der Zuckerrübenpreise um 39,7 % verbunden. Die ursprünglich drei Quoten wurden zu einer einheitlichen, gekürzten Quote zusammengefasst, die jährlich neu festgelegt wird. Damit soll der Anbau von Zuckerrüben in der EU reduziert werden. Landwirte müssen daher noch stärker versuchen, die Kosten für den Anbau zu verringern. Dies wird unter anderem durch die weitere Intensivierung der Produktion über den Einsatz von Hochleistungssorten und die Vergrößerung der zusammenhängenden Anbaufläche erreicht. Dadurch werden wiederum Krankheiten und Schädlinge begünstigt. Aus diesem Grund entfällt ein Großteil der Kosten in der Zuckerrübenproduktion auf Pflanzenschutzmaßnahmen. Nach OERKE und DEHNE (2004) machen Schäden durch Unkräuter und Ungräser bis zu 50 % und durch pilzliche Pathogene bis zu 14 % der potentiellen Ertragsverluste aus.

Cercospora beticola (Sacc.), pilzlicher Erreger der *Cercospora*-Blattfleckenkrankheit, wird zu den Blattpathogenen mit dem größten Schadpotential gezählt. Je nach Standort und Epidemiebeginn können Verluste von bis zu 20 t/ha entstehen (WOLF et al., 1998). Zehn Prozent nekrotisierte Blattfläche entspräche dabei etwa 2 t/ha Ertragsverlust. Das entspricht bei einer Spannweite von 400 bis 1000 dt/ha Ertrag heutiger Zuckerrübensorten bis zu 50 % Ertragsverlust. Im Gegensatz zu Unkräutern wirkt sich die

Cercospora-Blattfleckenkrankheit auch nachteilig auf die Qualität des Ernteproduktes aus. Bei starkem Befall können Fungizide den Mehrertrag an bereinigtem Zucker im Vergleich zu unbehandelten Pflanzen um bis zu 40 % erhöhen (WOLF et al., 1995). Natrium und α -Aminostickstoff, zwei der sogenannten Melassebildner, die den Zucker binden und dessen Auskristallisation beim Raffinieren behindern, sind bei hohen Befallswerten tendenziell mehr vorhanden (WOLF et al., 1998).

Das Pathogen ist überall dort vertreten, wo einer seiner zahlreichen Wirte zu finden ist. Neben der Zuckerrübe sind das unter anderem weitere Arten der Gattung *Beta*, verwandte Mitglieder der *Chenopodiaceae*, und Spinat aus der Familie *Amaranthaceae* (CHUPP, 1953). *C. beticola* ist in nahezu allen Regionen der Welt nachzuweisen (BLEIHOLDER und WELTZIEN, 1972).

Typische Symptome sind zahlreiche runde Nekrosen auf den mittleren Blättern einer Pflanze, deren äußerer Rand scharf vom gesunden Gewebe abgegrenzt ist (CHUPP, 1953, FEINDT et al., 1981a, HOFFMANN und SCHMUTTERER, 1983, WOLF, 2002). Bei günstigen Wetterbedingungen nimmt deren Anzahl so stark zu, dass sie zusammenlaufen und die Blätter schließlich absterben. Die Pflanzen bilden daher immer wieder neue Blätter, dem Rübenkörper stehen weniger Assimilationsprodukte zur Verfügung. Die Konidien keimen und infizieren innerhalb eines weiten Temperaturbereiches, das Optimum liegt jedoch zwischen 23 und 30 °C und bei einer Luftfeuchtigkeit nahe 100 % (BLEIHOLDER und WELTZIEN, 1972, FEINDT et al., 1981a, HOFFMANN und SCHMUTTERER, 1983, WOLF et al., 2001). Im Feld sporuliert der Pilz nach einer Inkubationszeit von fünf bis acht Tagen. Eine Dunkelperiode von 16 Stunden mit einer vorhergehenden Hellperiode von acht Stunden fördert die Bildung von Konidien (BLEIHOLDER, 1971). Dieser Vorgang wiederholt sich fortlaufend während der Vegetationsperiode. Die Sporen werden dabei durch Regenspritzer und Wind von Pflanze zu Pflanze verbreitet (POOL und MCKAY, 1916a, KHAN et al., 2008). Sind die Bedingungen dafür unzureichend, stellt der Erreger die Konidienbildung ein und überdauert in der Pflanze. *C. beticola* tötet das Wirtsgewebe ab, um sich von Assimilaten zu ernähren, und zählt damit zu den perthotrophen Pathogenen. Dies bewerkstelligt das Pathogen durch die Produktion von Toxinen, darunter das Cercosporin (DAUB, 1982).

Erysiphe betae (Van.) Weltzien verursacht den Echten Mehltau. Im Gegensatz zu *C. beticola* ist er ein obligat biotropher Pilz, der zum Überleben auf lebendes Wirtsgewebe angewiesen ist. Die Ertragsverluste bei der Rübenfrischmasse können 25 %

betragen, der Zuckerertrag kann um bis zu 30 % reduziert sein (WELTZIEN und AHRENS, 1977, HOFFMANN und SCHMUTTERER, 1983). Der Befall beeinflusst nicht den Gehalt an Kalium und Natrium, erhöht aber unabhängig von seiner Höhe geringfügig den Anteil an α -Aminostickstoff (WOLF, 2002).

Zu den Wirtspflanzen gehören Ampfer aus der Familie der *Polygonaceae* und der klebrige Gänsefuß aus der Familie der *Chenopodiaceae* (BLUMER, 1967, BRAUN, 1987). Das Pathogen ist nicht überall dort zu finden, wo Wirte sind. Die Witterung beeinflusst Ausbreitung und Schaden; bevorzugt sind aride und semiaride Regionen im Nahen und Mittleren Osten. Betroffen sind auch Süd- und Südosteuropa, der Süden Russlands und einige Bundesstaaten Nordamerikas. Vereinzelt Vorkommen gibt es in Südamerika, Asien und Australien (WELTZIEN, 1978).

Das Vorkommen ist auf die Ansprüche des Pathogens an die klimatischen Verhältnisse zurückzuführen. Weil die Konidien einen hohen Wassergehalt besitzen (ca. 60 %), ist die Keimung weniger von externem Wasser abhängig und erfolgt vorwiegend bei geringer relativer Luftfeuchtigkeit (DRANDAREVSKI, 1969b, HAMACHER, 1985). Das gleiche gilt für die Bildung neuer Konidien. Blattnässe hemmt die Appressorienbildung (HAMACHER, 1985). Alle Prozesse werden von hohen Temperaturen zwischen 27 und 32 °C gefördert. Zudem scheint eine hohe Differenz zwischen Tages- und Nachttemperaturen von besonderer Bedeutung zu sein. Die Sporen werden vor allem über den Wind verbreitet (DRANDAREVSKI, 1969b).

Typisches Symptom ist der mehlartige, gräulich weiße Überzug befallener Blätter, welcher von einzelnen, rundlichen Pusteln ausgeht (RIECKMANN und STECK, 1995). Über Haustorien entzieht das Pathogen den Wirtszellen Assimilate und reduziert die Photosyntheseleistung der Blätter (GORDON und DUNIWAY, 1982a, HAMACHER, 1987).

Rübenrost kommt zwar kosmopolitisch vor, ist aber von keiner großen wirtschaftlichen Bedeutung (HOFFMANN und SCHMUTTERER, 1983, RIECKMANN und STECK, 1995). In Deutschland sind die vom pilzlichen Erreger *Uromyces betae* (Pers.) Léveillé verursachten Schäden im Verhältnis zu denen der beiden anderen Blattkrankheiten vernachlässigbar, da er in der Regel erst gegen Ende der Vegetationsperiode auftritt. Das Pathogen ist wie *E. betae* obligat biotroph. Es lebt auf Pflanzen der Gattung *Beta*, zum Beispiel Mangold und Roter Rübe, sowie Spinat (GÄUMANN, 1959, HOFFMANN und SCHMUTTERER, 1983).

Die Lebensvorgänge des Pathogens werden durch Temperaturen zwischen 15 und

22 °C und eine hohe Luftfeuchtigkeit gefördert (HOFFMANN und SCHMUTTERER, 1983). Der Erreger durchläuft verschiedene Sporenformen. Die vegetative Form der Uredosporen ist die mit dem meisten Schadpotential. Zum einen, weil sie während der Vegetationsperiode ständig neu auf dem Wirtsgewebe gebildet werden, zum anderen weil sie über den Wind sehr weite Strecken transportiert werden können (BULLER, 1958, SCOTT und CHAKRAVORTY, 1982, NAGAJARAN und SINGH, 1990, MENDGEN, 1997, PETERSON und KOSTA, 2005). Die Sporen werden in Uredosporenlagern gebildet, welche als vereinzelte, kleine, runde Erhebungen auf den mittleren und älteren Blättern der Pflanzen zu sehen sind (HOFFMANN und SCHMUTTERER, 1983). Ihre rostrote Farbe verleiht der Krankheit ihren Namen. Ein weiteres Merkmal der Rostpilze ist ihre Fähigkeit, den physiologischen Zustand des Wirtes so zu verändern, dass sie davon profitieren. Zu einem späten Krankheitsstadium, wenn die Blattvergilbung bereits eingesetzt hat, ist dies anhand der „grünen Inseln“ um die Pusteln herum erkennbar. So sichert sich der Pilz seine Nahrungsgrundlage (MENDGEN, 1997).

Es gibt eine Vielzahl von Fungiziden, die gegen diese Krankheiten eingesetzt werden können. Sie wirken überwiegend systemisch und sollten beim Erscheinen der ersten Symptome ausgebracht werden (ANONYM, 2008a). Aufgrund des hohen Schadpotentials von *C. beticola* und *E. betae* und der Schwierigkeit, den Befallsbeginn vorherzusagen, kann im Zuckerrübenanbau derzeit nicht auf das Ausbringen von Fungiziden verzichtet werden. Bemühungen, diese kostenintensive Maßnahme einzuschränken, führten zum Konzept des Integrierten Pflanzenschutzsystems (WOLF et al., 2004). Dieses beinhaltet zwar die Anwendung von Fungiziden, impliziert aber, dass deren Gebrauch nur im Falle eines tatsächlich vorhandenen Schadenrisikos als letztes Mittel gehandhabt wird. Um den richtigen Einsatzzeitpunkt für eine Behandlung zu ermitteln, wird der Krankheitsbefall nach der Rupfmethode festgestellt (WOLF und VERREET, 2001). Demnach wird das Feld von einer Ecke zur anderen durchschritten, und jeweils ein Blatt pro Rübe gesammelt. Der Befall von 100 Blättern spiegelt den aktuellen Befall im Bestand wider. Der prozentuale Anteil befallener Blätter und der Zeitpunkt während der Vegetationsperiode geben Auskunft darüber, ob eine Pflanzenschutzmaßnahme sinn-voll ist. Ein Einsatz sollte in der Regel nach Bekämpfungsschwellen erfolgen, und nicht erst bei Erreichen der Schadensschwelle. Diese bezeichnet den Befall, bei dem die potentiellen Ertragsverluste die Kosten der Behandlung übersteigen. Daher bezog WOLF (2002) den von KRANZ und HOLZ (1993)

entwickelten Parameter „AUDPC“ (Area under disease progress curve) mit ein. Dieser ermöglicht, Bekämpfungsschwellen aufgrund des Verlaufs der Befallsstärke einer Krankheit über die gesamte Vegetationsperiode zu kalkulieren, und nicht nur aufgrund des Endbefalls.

Trotz des Versuchs so den Einsatz von Fungiziden zu reduzieren, erfolgen Spritzungen dennoch stets über die gesamte Fläche. Fungizide gegen *C. beticola* und *E. betae* basieren hauptsächlich auf dem Strobilurin Azoxystrobin, den Triazol-Wirkstoffen Epoxiconazol, Difenconazol und Tetraconazol, dem Dithiocarbamat Mancozeb, sowie Kupferoxychlorid (ANESIADIS et al., 2003, LIZ, 2008). Nach PILLING et al. (1996) ist der Einfluss von Azoxystrobin auf terrestrische Nicht-Zielorganismen minimal und vernachlässigbar, weil es im Boden schnell abgebaut wird und seine Abbauprodukte eine geringe Mobilität aufweisen. Den übrigen Wirkstoffen werden dagegen verschiedene negative Effekte auf Nicht-Zielorganismen zugeordnet. Einigen Triazolen wurde beispielsweise bei Forellen die Unterdrückung eines im Hormonhaushalt wichtigen Enzyms nachgewiesen (HINFRAY et al., 2006). Mancozeb soll die Nitrifikation und das Wachstum von Rhizobakterien hemmen (BÜNEMANN et al., 2006, MUBEEN et al., 2006). Kupfer als Wirkstoff-Bestandteil in Pestiziden gilt als toxisch für die Fauna in Gewässern und im Boden (BÜNEMANN et al., 2006, PERÉZ-COLL und HERKOVITS, 2006). Nach RELYEA und HOVERMAN (2006) wurde in 80 % der Toxizitätsstudien stets nur die Wirkung eines Pestizids untersucht, davon fanden nur 2 % zu Fungiziden statt. Würden sowohl die synergistischen Effekte mehrerer Fungizide als auch der Einfluss auf die Interaktionen verschiedener Spezies innerhalb eines Habitats untersucht, würden auch indirekte negative Effekte offensichtlicher. Dies wiederum könnte helfen, bessere Entscheidungen bezüglich des Zeitpunkts und der Häufigkeit der Pestizid-Ausbringung zu treffen.

Da Fungizidbehandlungen sowohl Kosten für den Landwirt als auch die Umwelt implizieren, konzentriert sich die Forschung derzeit auf ein neues Feld. Ziel ist, die Idee der Präzisionslandwirtschaft (Precision Agriculture) auf den Pflanzenschutz anzuwenden. Precision Agriculture bezieht alle Produktionsbereiche landwirtschaftlicher Unternehmen, also die Tierproduktion und den Ackerbau mit ein. Im Pflanzenbau spricht man von Precision Farming - teilflächenspezifische Bewirtschaftung. Hierfür gibt es verschiedene Definitionen. Precision Farming ist zum Beispiel eine Form der Betriebsführung, bei welcher Informationstechnologien genutzt werden, um Datensätze aus

verschiedenen Quellen zu erhalten, auf Basis welcher Entscheidungen zur Pflanzenproduktion getroffen werden können (ANONYM, 1998). In der Praxis wird bei der teilflächenspezifischen Bewirtschaftung also berücksichtigt, dass Faktoren wie Bodenbedingungen oder frühere Bewirtschaftungsformen, zeitlich und räumlich über die zu bearbeitenden Flächen variieren. Deshalb müssen Entscheidungen spezifisch getroffen werden, und nicht terminlich gebunden und einheitlich für die gesamte Fläche.

Um die Heterogenitäten landwirtschaftlicher Flächen zu bestimmen, werden in der Regel Geoinformationssysteme verwendet (NELSON et al., 1999). Mittels des satellitengestützten Globalen Positionsbestimmungssystem (GPS) kann die Lage ertragslimitierender Einflussgrößen ermittelt werden. Rechnergestützte Informationssysteme (GIS) verarbeiten die erworbenen Daten und stellen sie bildlich dar. Mittels Geostatistik können sie räumlich korreliert werden und auf Basis der Ergebnisse Bewirtschaftungszonen ausgewiesen werden. Ein Ansatz, im Bereich des Pflanzenschutzes Bewirtschaftungszonen, also bevorzugte Befallsbereiche zu bestimmen, bedient sich beispielsweise des sogenannten CROP-Meters. Bei Getreide angewendet, ermittelt dieser die Dichte des Bestandes. Da bestimmte Blattpathogene, wie der Getreidemehltau *Blumeria graminis*, eine erhöhte Befallswahrscheinlichkeit in Bereichen mit hoher pflanzlicher Biomasse aufweisen, lässt sich das CROP-Meter in Prognose-systeme integrieren (WOLLNY et al., 2007). Andere Ansätze bauen auf der Bestimmung des Chlorophyllgehalts der Pflanzen auf, der durch Pathogenbefall reduziert sein kann (TARTACHNYK et al., 2005). Auch über die Analyse von Bildinformationen aus verschiedenen spektralen Bereichen können Feldbereiche mit befallenen Pflanzen von gesunden unterschieden werden (JACOBI und KÜHBAUCH, 2005).

In dieser Arbeit wurde die Thermographietechnik auf ihre Eignung für einen präzisen Pflanzenschutz untersucht. Es handelt sich dabei um einen Sensor, welcher die elektromagnetische Strahlung von Objekten im mittleren Infrarotbereich bei Wellenlängen zwischen acht bis vierzehn Mikrometer erfasst. Das Kamerasystem nimmt neben der Eigenstrahlung des Messobjekts auch die an diesem reflektierte Strahlung von anderen in der Nähe befindlichen Objekten und die Eigenstrahlung der Luftstrecke auf, und setzt daraus die Gesamtstrahlung zusammen (InfraTec GmbH, Dresden, Deutschland, Produktinformation). Diese wird dann in Form eines Falschfarnebildes sichtbar gemacht. Mit der Thermographie lässt sich somit die Wärmestrahlung von Objekten messen und abbilden.

Da die Transpiration der Pflanzen und die Blattfeuchtigkeit negativ mit der Temperatur korreliert sind, können sie über die Infrarotthermographie erfasst werden (LINDENTHAL et al., 2005). Aufgrund des Diffusionswiderstands, der sich aus dem Stomata- und dem Grenzschichtwiderstand zusammensetzt, sowie des Unterschieds in der Wasserdampfkonzentration zwischen den Interzellularen und der Atmosphäre, transpirieren Pflanzen (TAIZ und ZEIGER, 2000, HÄCKEL, 2005). Da die Energie für die Verdunstung des Wassers der Pflanzenoberfläche entzogen wird, kühlt sich diese ab. Die Verdunstungsrate und somit die Temperatur eines Blattes hängen von dem zur Verfügung stehenden Wasser, der relativen Feuchtigkeit und der Temperatur der Umgebungsluft, der Windgeschwindigkeit und der Sonnenstrahlung ab (GATES, 1980). GATES (1980) beschrieb eingehend den Einfluss externer Faktoren sowohl auf die Temperaturgrenzschicht, als auch auf die Temperatur von Pflanzen. Die Temperaturgrenzschicht ist der Übergangsbereich zwischen der Temperatur der Blattoberfläche und der Temperatur der Luft, die über diese Oberfläche hinweg streicht. In der Grenzschicht vollzieht sich der Temperaturübergang laminar und nicht über Turbulenzen.

Einen Anwendungsschwerpunkt findet die Thermographie im Bereich der Pflanzenphysiologie. Hier ist die Technik im Gegensatz zu herkömmlichen Methoden von Vorteil, da sie Messgrößen erfasst, ohne direkt mit dem Messobjekt in Berührung zu kommen. Sie wird zur Bestimmung der Transpirationsleistung und der stomatären Leitfähigkeit pflanzlichen Gewebes, sowie des Wasserhaushalts von Einzelpflanzen oder Beständen herangezogen (HASHIMOTO, 1990, JONES, 2004). So wird ihre Eignung beispielsweise zur Darstellung des physiologischen Zustands bewässerter Kulturen wie Wein oder Baumwolle geprüft (GRANT et al., 2006, FULTON et al., 2008). Studien haben außerdem gezeigt, dass sich der Thermographiesensor für den Nachweis von biotisch bedingtem Stress an Pflanzen anwenden lässt (NILSSON, 1991, CHAERLE und VAN DER STRAETEN, 2001, WEST et al., 2003). Die Verbindung zum präzisen Pflanzenschutz erfolgt hier aufgrund der Annahme, dass sich die Heterogenität kleinräumiger klimatischer Verhältnisse innerhalb eines Feldes in der zeitlichen und räumlichen Verteilung von Pathogenen widerspiegelt (AGRIOS, 1997, EHLERT und ADAMEK, 2005, VEREIJSEN, 2006).

Aus phytopathologischer Sicht ist einer der Kernpunkte einer Wirt-Pathogen-Beziehung deren Abhängigkeit von klimatischen Bedingungen. Auf diesen bauen sowohl die Wachstumsdynamik der Pflanze als auch die Entwicklungsdynamik des

Pathogens auf. Letzteres wurde als Epidemiologie von VAN DER PLANK (1963) in die Phytopathologie eingeführt. Die klimatischen Verhältnisse während der Vegetationsperiode beziehungsweise die mikroklimatischen Gegebenheiten im Bestand sind grundlegende Einflussfaktoren für die Infektion und Verbreitung von Pathogenen (FRIESLAND und SCHRÖDTER, 1988). Die Wachstumsdynamik der Pflanze führt also in Kombination mit der Entwicklungsdynamik des Pathogens zwangsläufig zu einer räumlichen und zeitlichen Ausbreitungsdynamik. Aus diesem Grund erfolgt die thermographische Detektion von Krankheiten indirekt über die Bestandesfaktoren wie das Mikroklima (LENTHE et al., 2007). Hier wiederum besteht die Problematik darin, dass Pflanzen wechselwarme Organismen sind. Das heißt, ihre Temperatur wird von externen Faktoren beeinflusst (GATES, 1980, TAIZ und ZEIGER, 2000, HÄCKEL, 2005). Während beispielsweise beim Menschen eine über den normalen Wert erhöhte Temperatur einen Hinweis auf eine Erkrankung darstellt, gibt es keinen bestimmten Temperaturwert, welcher eine Pflanze repräsentiert, und als Sollwert für wissenschaftliche Fragestellungen herangezogen werden kann (TANNER, 1963). Dies verkompliziert die Anwendung der Infrarotthermographie im präzisen Pflanzenschutz, macht sie aber nicht unmöglich.

Mit dieser Arbeit sollte geklärt werden, inwieweit die Grundlagen vorhanden sind, die Thermographie im präzisen Pflanzenschutz für die Feldfrucht Zuckerrübe und ihre Blattkrankheiten *Cercospora*-Blattfleckenkrankheit, Echter Mehltau und Rübenrost einzusetzen. Die Arbeit gliedert sich in drei Teile. Erstes Ziel war, die Wärmestrahlung von gesunden und durch abiotische Stressfaktoren beeinflusste Zuckerrüben zu bestimmen. Zweitens sollte herausgefunden werden, ob unter Laborbedingungen die Symptome der Krankheiten - im Idealfall vor ihrem visuellen Sichtbarwerden - direkt mittels Thermographie detektiert werden konnten. Hierbei wurden ihre Auswirkungen auf die Temperatur und zusätzlich auf die Chlorophyllfluoreszenz von Blattgewebe gemessen. Drittens wurde die Ausbreitungsdynamik der Krankheiten im Feld untersucht und geprüft, ob sich ihre Symptome thermisch erfassen ließen. Auf Basis der Ergebnisse sollte geklärt werden, ob sich über die Temperatur des Bodens oder des Bestandes diejenigen Feldbereiche, innerhalb welcher die Verbreitung der Pathogene begünstigt stattfand, bestimmen lassen.

2 MATERIAL UND METHODEN

2.1 Pflanzen

Alle Untersuchungen wurden an Zuckerrüben, *Beta vulgaris* L. var. *altissima* Döll, durchgeführt. Entsprechend der Versuchsfrage sollte eine Sorte gewählt werden, welche eine hohe Anfälligkeit sowohl gegenüber der *Cercospora*-Blattfleckenkrankheit als auch dem Echten Mehltau besaß.

Nematop (Syngenta Seeds GmbH, Bad Salzuflen, Deutschland) erwies sich als geeignet (Tab. 2-1). Die Sorte ist zudem resistent gegenüber Nematoden, was von Vorteil für die Versuche im Freiland war. Des Weiteren wurde mit den Sorten Philippa und Syncro gearbeitet (KWS Saat AG, Einbeck, beziehungsweise Syngenta Seeds GmbH). Das Saatgut wurde von den jeweiligen Saatzuchtfirmen zur Verfügung gestellt.

Tab. 2-1 Verwendete Zuckerrübensorten mit Bewertung ihrer Anfälligkeit gegenüber der *Cercospora*-Blattfleckenkrankheit und dem Echten Mehltau, und der Angabe ihrer Züchter (Beschreibende Sortenliste, Bundessortenamt, 2003, Einstufung mit Stand vom 1.07.2004).

Sortenname	<i>Cercospora beticola</i> *	<i>Erysiphe betae</i> *	Züchter
Nematop	7	6	Syngenta Seeds GmbH, Bad Salzuflen, D
Philippa	5	2	KWS Saat AG, Einbeck, D
Syncro	3	5	Syngenta Seeds GmbH, Bad Salzuflen, D

*Bewertung der Anfälligkeit mit Noten von 1 bis 9 (1 = fehlend oder sehr gering, 9 = sehr stark).

2.2 Pflanzenanzucht


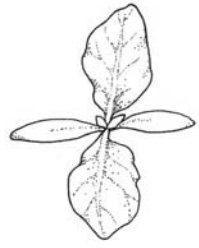
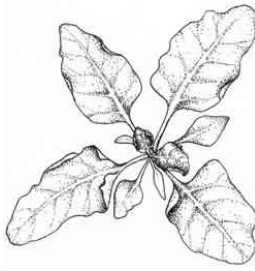
Das Rübensaatgut der Sorte Nematop war mit Imprimo, von Philippa mit Imidacloprid, Tefluthrin und Hymexazol, und von Syncro mit Imprimo und Tachigaren gebeizt. Für die Versuche unter kontrollierten Bedingungen wurden die Zuckerrüben in ein Gemisch aus Sand und Anzucherde (Typ 1, Klasmann-Deilmann, Geeste, Deutschland; Typ VM, Balster Einheitserdewerk GmbH, Uetersen, Deutschland) im Verhältnis von 1:1 in Pikierschalen ausgesät. Zu BBCH 10 wurden die Keimlinge in Pflanz Erde (Spezialmischung, Klasmann-Deilmann) in Plastiktöpfe mit einer Höhe von 10 cm und einem Durchmesser von 13 cm überführt. Dem Pflanzsubstrat waren 20 g/l NPK-Langzeitdünger (Plantosan Compact[®], Spiess-Urania Chemicals GmbH, Hamburg, Deutschland) und 18 g/l kohlensaurer Kalk (95 % CaCO₃) beigemischt. Bei Verwendung eines anderen Substrats (Typ ED 73, Balster Einheitserdewerk GmbH) anstelle der Spezialmischung, konnte auf die Anreicherung mit Dünger und Kalk verzichtet werden, da der Anteil an Nährstoffen und der pH-Wert den Anforderungen der Pflanzen entsprach. Sie wurden im Gewächshaus unter Tageslicht und bei einer Regeltemperatur von 24 °C kultiviert. Der Hell-Dunkel-Rhythmus betrug 16:8 h und es wurde nach Bedarf bewässert.

Zwischen BBCH 10 und BBCH 12 erfolgte eine Behandlung mit dem Akarizid und Insektizid Vertimec[®] (18 g/l Abamectin, Syngenta Agro GmbH, Maintal, Deutschland) in einer Konzentration von 0,5 ml auf 1 l demineralisiertes Wasser (A. demin.), um Befall durch Thrips und Rote Spinne vorzubeugen.

2.3 Bewertung der Pflanzenentwicklung

Das phänologische Entwicklungsstadium der Zuckerrüben wurde nach der BBCH-Codierung von MEIER (1997) bestimmt (Tab. 2-2). Demnach wird das Wachstum in neun Makrostadien unterteilt. Die ersten vier beziehen sich auf das erste Jahr des Rübenwachstums von der Keimung, über die Blattentwicklung, und dem Rosettenwachstum bis hin zur Entwicklung der vegetativen Pflanzenteile. Die Makrostadien fünf bis neun beginnen mit der Entwicklung der Blütenanlagen im zweiten Vegetationsjahr und reichen von der Blüte, Fruchtentwicklung und Samenreife bis zum Absterben der Pflanze.

Tab. 2-2 Auszug aus der BBCH-Codierung der phänologischen Entwicklungsstadien der Zuckerrübe (nach MEIER, 1997).

Code	Beschreibung	
Makrostadium 0: Keimung		
00 - 09	Trockener Same bis Auflaufen	
Makrostadium 1: Blattentwicklung (Jugendentwicklung)		
10	Keimblattstadium: Keimblätter waagrecht entfaltet; 1. Laubblatt stecknadelkopfgroß	 BBCH 10
11	1. Laubblatt deutlich sichtbar, erbsengroß	
12	2 Laubblätter (1. Blattpaar) entfaltet	
14	4 Laubblätter (2. Blattpaar) entfaltet	
15	5 Laubblätter entfaltet	
1...	Stadien fortlaufend bis...	
19	9 und mehr Laubblätter entfaltet	 BBCH 12
Makrostadium 3: Rosettenwachstum		
31	Beginn Bestandesschluss: 10 % der Pflanzen benachbarter Reihen berühren sich	
32	20 % der Pflanzen benachbarter Reihen berühren sich	
33...	30 % der Pflanzen benachbarter Reihen berühren sich	
38	80 % der Pflanzen benachbarter Reihen berühren sich	
39	Bestandesschluss: über 90 % der Pflanzen benachbarter Reihen berühren sich	 BBCH 16
Makrostadium 4: Entwicklung vegetativer Pflanzenteile - Rübenkörper		
49	Rübenkörper hat erntefähige Größe erreicht	

2.4 Pathogene

Cercospora beticola (Saccardo)

Als Inokulationsmaterial für die Versuche unter kontrollierten Bedingungen dienten Zuckerrübenblätter, die durch einen natürlichen Befall mit *C. beticola* abgestorben waren. Die Blätter stammten von den Versuchsfeldern in Poppelsdorf in den Jahren 2005 und 2006.

Erysiphe betae (Vanha) Weltzien

Im Jahr 2005 trat auf den Zuckerrüben im Versuchsfeld Poppelsdorf ein natürlicher

Befall mit *E. betae* auf. Das Pathogen wurde auf Zuckerrüben im Gewächshaus in Kultur genommen.

Uromyces betae (Persoon) Lévillé

U. betae stammte aus der Erhaltung des Instituts für Nutzpflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz, Bereich Phytomedizin.

2.5 Erhaltung und Vermehrung der Pathogene

Cercospora beticola

In den Jahren 2005 und 2006 wurden durch *C. beticola* abgestorbene Blätter von Zuckerrübenpflanzen gesammelt, für etwa eine Woche auf Papiertüchern an der Luft getrocknet, und bis zur Verwendung bei Raumtemperatur aufbewahrt.

Erysiphe betae

Mit Echem Mehltau befallene Blätter aus dem Versuchsfeld in Poppelsdorf im Jahr 2005 wurden zur Inokulation über befallsfreien Zuckerrübenpflanzen abgeschüttelt. Zur Erhaltung und Vermehrung des Pilzes wurde dieser Vorgang regelmäßig mit infizierten Pflanzen aus dem Gewächshaus an befallsfreien Pflanzen zwischen BBCH 14 bis 16 wiederholt. Die Zuckerrüben wurden in einer für die Erhaltung von Echem Mehltau bestimmten Gewächshauskammer mit einer Regeltemperatur von 22 °C, einem Hell-Dunkel-Rhythmus von 13:11 h, und regelmäßiger Bewässerung gezogen. Zusätzlich erhielten sie in etwa vierwöchigem Abstand eine Gabe von 50 ml NPK-Flüssigdünger Flory[®] 2 - MEGA pro Pflanze (2 g/1 l A. demin., EUFLOR GmbH, München, Deutschland).

Uromyces betae

Zur Gewinnung von Rostsporen wurden die Blattober- und -unterseite von Zuckerrüben, auf welchen sich Rostpusteln befanden, mit einem Pinsel über einer Aluminiumfolie abgepinselt. Die Sporen wurden in ein Eppendorf Reaktionsgefäß (1,5 ml) überführt und bei einer Temperatur von 4 °C gelagert, oder direkt für die Inokulation weiterverwendet. Dazu wurde Wasser mit Agar (0,2 g/100 ml A. demin.) versetzt und bei 50 °C gerührt bis es sich gelöst hatte. Nach Abkühlung wurde Tween 20 (1 Tropfen/100 ml A. demin.) und 0,05 bis 0,1 g Rostsporen zugegeben und verrührt.

Zuckerrübenpflanzen wurden blattober- und -unterseits mit einer Sprühflasche mit dem Inokulum tropfnass besprüht und bei 19/18 °C Tag-Nachttemperatur, 100 % relativer Luftfeuchtigkeit (rel. LF) und einem 16:8 h Hell-Dunkel-Rhythmus inkubiert. Nach 24 h wurde die Temperatur auf 21/20 °C Tag/Nacht erhöht und die Luftfeuchtigkeit auf 50 % \pm 10 % verringert. Die Inokulation wurde stets mit dem zuletzt erhaltenen Sporenmaterial an neuen befallsfreien Pflanzen wiederholt.

2.6 Inokulation der Pflanzen

Cercospora beticola

Zur Vorbereitung des Inokulums wurden die getrockneten, mit *C. beticola* infizierten Blätter zwei bis drei Stunden bei 100 % rel. LF eingeweicht. Danach wurden sie auf zwei Lagen mit A. demin. befeuchtetem Filterpapier in verschlossenen Petrischalen über Nacht bei Raumtemperatur inkubiert. Nach 24 h wurden die Blätter mit A. demin. und Tween 20 (1 Tropfen/100 ml A. demin.) für 2 Minuten gerührt. Das Gemisch wurde durch vier Lagen Mullbinde gefiltert, um ein applizierbares Inokulum zu erhalten. Die Sporendichte wurde mit Hilfe einer Fuchs-Rosenthalkammer auf 80000 ± 5000 Sporen/ml eingestellt. Mit einer Sprühflasche wurde das Inokulum auf die Blattober- und -unterseite von Zuckerrüben zu BBCH 14 bis 15 appliziert (ca. 100 ml/4 Pflanzen), so dass diese vollkommen benetzt waren. Nach 24 h bei 100 % rel. LF, 25 °C und einem Hell-Dunkel-Rhythmus von 16:8 wurde die rel. LF auf 50 % \pm 10 % verringert.

Erysiphe betae

Zuckerrüben zwischen BBCH 14 und 15 wurden wie bei der Erhaltung von *E. betae* beschrieben inokuliert und inkubiert. Eine Düngung fand bei den Pflanzen, die für Versuche bestimmt waren, nicht statt.

Uromyces betae

Das Inokulum für die Applikation von Rostsporen wurde wie für die Erhaltung und Vermehrung des Pilzes hergestellt. Allerdings wurde für die Versuche die hinzugefügte Sporenmenge so variiert, dass die Sporendichte bei 25000 ± 1500 Sporen/ml lag. Zum Zeitpunkt der Inokulation waren die Pflanzen in einem Entwicklungsstadium von BBCH 14 bis 15.

2.7 Bonitur des Befalls

Cercospora beticola

Der Befallsgrad von *C. beticola* im Feld wurde nach einem Schätzschema von WOLF (2002) beurteilt. Der Befall einer Pflanze setzt sich dabei aus einer Kombination aus Befallsstärke und -häufigkeit befallener Blätter zusammen (Tab. 2-3).

Tab. 2-3 Boniturschema zur Beurteilung des Befallsgrades von *Cercospora beticola* an Einzelpflanzen (verändert nach WOLF, 2002).

0	gesund
1	1-5 Blattflecken
2	≈ 25 % befallene Blätter
3	≈ 50 % befallene Blätter
4	Blattflecken fließen zusammen auf ≤ 4 Blättern
5	Blattflecken fließen zusammen auf > 4 Blättern
6	Befallshäufigkeit > 25 % auf ≤ 4 Blättern
7	Blattverlust, 100 % Befallshäufigkeit auf ≤ 4 Blättern
8	Blattverlust, 100 % Befallshäufigkeit auf 5-10 Blättern
9	Blattverlust, 100 % Befallshäufigkeit auf > 10 Blättern

Die Befallsstärke von *E. betae* und von *U. betae* wurde durch die visuelle Schätzung der prozentual mit Mehлтаupusteln beziehungsweise mit Chlorosen oder Sporenlagern bedeckten Blattfläche einer Pflanze bestimmt. Dabei wurden die Pflanzen in sieben Boniturstufen unterteilt: 0 %, 1 %, 5 %, 10 %, 25 %, 50 % und 100 % befallene Blattfläche einer Pflanze. Als Vorlage für diese Unterteilung diente das Boniturschema zur Schätzung des Mehлтаubefalls auf einzelnen Blättern nach WOLF (2002).

In Poppelsdorf erfolgte die Bonitur innerhalb einer Parzelle an jeder zweiten bis dritten Zuckerrübe. An den Standorten Klein-Altendorf, Frankenforst und Dikopshof wurden je fünf Pflanzen pro Boniturstelle auf den Befall durch die drei Blattkrankheiten hin beurteilt. Der stärkste Befall einer der fünf Pflanzen wurde für diese Stelle notiert. Der Befallsgrad an einer Stelle wurde am nächsten Termin übernommen, wenn kein höherer Grad festgestellt werden konnte. Da es sich um eine rein visuelle Bonitur

handelte, wurde davon ausgegangen, dass in einem frühen Krankheitsstadium vereinzelte Symptome unter Umständen bei einem späteren Termin nicht wieder gefunden wurden. War ein Doppelfall von *C. beticola* und *E. betae* vorhanden, wurden die Befallswerte von *E. betae* vom vorangegangenen Termin nicht mehr übernommen, wenn am aktuellen Termin ein *Cercospora*-Befallsgrad von ≥ 7 vorhanden war, und Symptome von *E. betae* nicht eindeutig sichtbar waren. Dieses Vorgehen wurde mit dem Antagonismus beider Krankheiten und dem vorherrschenden Auftreten von *C. beticola* begründet. Sämtliche Bonituren wurden immer von derselben Person durchgeführt.

2.8 Mikroskopische Untersuchungen

Morphologische Blattmerkmale und die Erregerentwicklung wurden anhand von Auflicht- und Fluoreszenzmikroskopie mit einem Leitz DMRB Mikroskop (Leica Microsystems GmbH, Wetzlar, Deutschland), mit einer 3CCD-HV-C20A Videokamera (Hitachi Ltd, Tokio, Japan) untersucht. Die mikroskopischen Aufnahmen wurden in das Computerprogramm Diskus (Vers. 4.3, Carl H. Hilgers - Technisches Büro, Königswinter, Deutschland) übertragen, mit welchem Größenmessungen am Objekt durchgeführt werden konnten. Einzelbilder konnten mit dem Programm Helicon Focus (Vers. 3.20.3, Helicon Soft Ltd., Kharkov, Ukraine) übereinander gelegt werden, um mehrere Objektebenen in einem Bild wiedergeben zu können. Stereomikroskopische Aufnahmen wurden an einem Leica MZ16 F Mikroskop durchgeführt (Leica Microsystems GmbH, Wetzlar, Deutschland). Dieses war mit einer 3 CCD Digitalkamera KY-F75U (Victor Company of Japan Ltd., Yokohama, Japan) versehen.

Zur Bestimmung der morphologischen Charakteristika eines Blattes wurde die Anzahl der Stomata (pro cm^2 Blattfläche), die Größe der Poren von Stomata (in μm^2) und die Anzahl an Blatthaaren (pro cm^2) auf der Blattoberseite bei einer 400-fachen Vergrößerung mit Durchlichtmikroskopie (Interferenz-Kontrast) ermittelt.

2.8.1 Probenahme und -aufbereitung

Zur Feststellung der morphologischen Charakteristika wurden alle Blätter einer Zuckerrübenpflanze zu BBCH 10, 12, 14, 16 und 18 untersucht. Jeweils vier circa

1 cm² große Blattstücke wurden dazu mit einer Schere aus den sich gegenüberliegenden Blättern eines physiologischen Alters geschnitten oder mit einem Korkbohrer gestanzt. Dies wurde an jeweils vier Zuckerrübenpflanzen eines Wachstumsstadiums wiederholt. Die Blattproben wurden sofort in ein Rollrandgläschen mit einer Chloralhydratlösung (250 g Chloralhydrat/100 ml A. demin.) überführt, wo sie zur Entfärbung verweilten. Je eines der vier Blattstücke entstammte dabei dem Gewebe aus der Stielregion, dem Mittelteil in der Nähe des Stiels, dem Mittelteil in der Nähe der Spitze, und der Spitze selbst. Alle Proben wurden am späten Vormittag entnommen. Die entsprechenden Parameter wurden viermal pro Blattstück auf einer Fläche von 0,047 mm² ausgezählt. Der Versuch wurde an den Sorten Nematop, Philippa und Syncro durchgeführt.

Proben infizierter Pflanzen wurde ebenso gewonnen, allerdings richtete sich der Zeitpunkt der Probennahme nicht nach dem Wachstumsstadium der Pflanze, sondern nach dem Zeitpunkt der Inokulation. Proben wurden für alle Pathogene ab dem Tag der Inokulation über das Erscheinen von sichtbaren Symptomen hinaus entnommen. Es wurden jeweils alle Blätter einer Pflanze beprobt. Hierbei wurde ausschließlich mit der Sorte Nematop gearbeitet.

2.8.2 Färbung der Pilzstrukturen

Nachdem die Blattproben durch Chloralhydrat entfärbt worden waren, wurden sie mit verschiedenen Farbstoffen versetzt, um die Pilzstrukturen sichtbar zu machen. Blattproben für die fluoreszenzmikroskopischen Untersuchungen wurden für etwa 1 min mit 1 bis 3 Tropfen 0,09 % Diethanol benetzt und dann mit A. demin. gewaschen. Die Färbelösung nach BRUZZESE und HASAN (1983) und die Färbelösungen Coomassie Brilliantblau (0,06 %; in 15 % Trichloressigsäure und A. demin.) kamen bei der Auflichtmikroskopie zur Verwendung. Die Einwirkzeit betrug 0,5 bis 2 h, danach wurden die Blattproben mit A. demin. gewaschen. Die Blattproben wurden sofort nach der Einfärbung mikroskopisch untersucht.

2.9 Messung des Wassergehalts

Die Bestimmung des Wassergehalts wurde an allen Blättern von Zuckerrübenpflanzen der Sorten Nematop, Philippa und Syncro zu den BBCH-Stadien 10, 12, 14, 16 und 18

vorgenommen. Nach der Entfernung der Blätter von der Pflanze wurde je ein Blattpaar sofort in einer Tüte aus Aluminiumfolie gewogen. Dies ergab das Frischgewicht (FG). Nach 24 h Trocknung bei 106 bis 108 °C im Trockenschrank wurden die Blätter erneut gewogen, um das Trockengewicht (TG) zu ermitteln. Der prozentuale Wassergehalt wurde nach folgender Formel errechnet:

$$\text{Wassergehalt [\%]} = \frac{(FG - TG) \times 100}{FG}$$

2.10 Induktion von abiotisch bedingtem Stress

2.10.1 Wassermangel

Sowohl Trockenstress als auch Staunässe wurde an Tag Null nach der ersten Temperaturmessung induziert und die Stresssituation nach der Messung an Tag fünf aufgehoben. Um Trockenstress bei den Zuckerrübenpflanzen hervorzurufen, wurden sie nicht mehr gegossen und jegliches Wasser aus den Topfuntersetzern entfernt. Die Stresssituation wurde beendet, indem die Töpfe bis einen Zentimeter unter den Topfrand (entspricht etwa zwei Zentimeter unterhalb des Vegetationskegels der Pflanze) in einen mit Wasser gefüllten Behälter gestellt wurden, bis die Erde so mit Wasser durchtränkt war, dass sie das Topfvolumen wieder voll ausfüllte. Im Anschluss daran wurden die Töpfe wieder auf Topfuntersetzer gestellt und die Pflanzen bis zum Ende des Versuchs nach Bedarf bewässert.

2.10.2 Staunässe

Um die Pflanzen Staunässe auszusetzen, wurde so verfahren wie beim Beenden des Trockenstress. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Erde immer nass war. Diese Überversorgung mit Wasser wurde bis zur Messung an Tag fünf aufrechterhalten. Dann wurden die Töpfe aus dem Wasser entfernt, und solange nicht mehr bewässert, bis das Substrat eine normale Feuchte besaß. Es erfolgte eine Bewässerung nach Bedarf bis zum Versuchsende.

2.11 Digitale Infrarotthermographie

2.11.1 Kameras

Die thermographischen Aufnahmen wurden mit zwei Kameramodellen durchgeführt. Für die Messung der Temperatur von gesunden und unter abiotischem Stress stehenden Pflanzen sowie für die Aufnahmen von den Versuchsflächen wurde eine VARIOSCAN *high resolution*, Modell 3021-ST verwendet (Jenoptik AG, Jena, Deutschland). Diese Wärmebildkamera erfasst die Strahlungsintensitäten von Objekten in einem Wellenlängenbereich von 8 bis 12 μm . Die Größe des Objektfeldes beträgt $20^\circ \times 30^\circ$. Mit einem Spiegelscanner werden die Objekte horizontal und vertikal abgetastet, und in Wärmebilder mit einer Auflösung von 360×240 Pixel übertragen. Die Optik erlaubt Objektentfernungen zwischen 0,2 m und unendlich. Die Strahlungsintensität des Objektes wird nach jeder Bildaufnahme mit der eines zwischen Optik und Detektor befindlichen Referenzstrahlers verglichen. Dadurch erhält das Detektorsignal einen absoluten Temperaturbezug und macht online-Temperaturmessungen möglich. Das Detektorsignal wird verstärkt, digitalisiert und über ein PC/104-Modul mit einer Auflösung von 8 bit visualisiert. Die 256 Farben eines Bildes repräsentieren dabei je eine bestimmte Temperatur. Die thermische Auflösung beträgt $\pm 0,03$ $^\circ\text{C}$, die geometrische 1,5 mrad. Für die Emissionskonstante wurde der Wert 1 verwendet, da für Pflanzenoberflächen von einer Strahlungsemission zwischen 0,94 und 0,98 ausgegangen wird (HÄCKEL, 2005).

Die Entwicklung von Symptomen der *Cercospora*-Blattfleckenkrankheit, von Echem Mehltau, und Rübenrost wurde mit einer Agema/FLIR Thermovision[®] THV900 SW/TE aufgenommen (FLIR Systems, West Malling, Kent, Großbritannien). Diese misst den Wellenlängenbereich von 2 bis 5,4 μm . Der serielle Scanner liefert die Bildinformation an den über ein Peltier-Element gekühlten Detektor. Die Thermogramme haben eine Auflösung von 204×128 Pixel (14 bit). Bei 30 $^\circ\text{C}$ beträgt die thermische Auflösung $\pm 0,1$ $^\circ\text{C}$, die geometrische liegt bei 1,7 mrad.

2.11.2 Durchführung der Temperaturmessung

Laborversuche

Thermographische Messungen von Zuckerrübenpflanzen wurden unter kontrollierten Bedingungen - Temperatur, Tageszeit, Abschirmung der Pflanzen vor Luftströmungen

- im Labor durchgeführt.

Alle Pflanzen wurden eine Stunde vor der Aufnahmesequenz in die Messkammer transferiert, damit sich ihre Temperatur an die des Raumes anpassen konnte. Die Pflanzen wurden an drei Seiten von einem Karton überragt, eine Beschattung der Pflanzen durch die Pappe wurde vermieden. An der offenen Seite war die Thermographiekamera positioniert und so ausgerichtet, dass das Messobjekt im Thermogramm möglichst bildausfüllend abgebildet war. Der Abstand zwischen Objektiv und Objekt betrug in der Regel nicht mehr als 1,50 m.

Bei jeder Messung war eine Referenz vorhanden. Diese bestand aus 10 x 5 cm großem weißen Papier, welches mit der schmalen Seite an einem Holzstäbchen befestigt war und bei jeder Aufnahme horizontal auf Höhe des zu messenden Objektes ausgerichtet wurde. Über die Temperatur dieser nicht transpirierenden Messfläche konnte die Lufttemperatur ermittelt werden. Bei allen Versuchen wurde die Differenz zwischen der Temperatur der Pflanze und der Temperatur der Referenz für die Auswertungen herangezogen. Die Messungen wurden so zügig wie möglich durchgeführt, um Schwankungen der Raumtemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit durch den Bediener zu vermeiden.

Das Substrat in den Töpfen wurde durch festes Papier abgedeckt, welches auf der Oberseite schwarz und auf der Unterseite mit einer wasserabweisenden Folie beklebt war. Die Pflanze wurde durch einen keilförmigen Ausschnitt ausgespart. Dadurch wurden zum einen Berührungen von herabhängenden Blättern mit dem feuchten Substrat verhindert, zum anderen hob sich die Pflanze in den Thermogrammen besser vom Untergrund ab.

Bei der Temperaturmessung der gesamten Pflanzen war die Regeltemperatur auf 24 bzw. 19 °C (Tag/Nacht), und der Hell-Dunkel-Rhythmus auf 14:10 h eingestellt. Die relative Luftfeuchtigkeit betrug 66 bis 85 % beziehungsweise 40 bis 42 % (Tag/Nacht). Bei den thermographischen Messungen von Pflanzen unter abiotischem Stress betrug die Raumtemperatur 21 °C (Tag und Nacht) und der Hell-Dunkel-Rhythmus 15:9 h. Die relative Luftfeuchtigkeit lag bei 65 bis 70 %.

Die Versuche zum Krankheitsverlauf nach Infektionen der drei Erreger wurden in einer begehbaren Klimakammer „ISO-6“ (Isocab[®], Harelbeke, Belgien) durchgeführt. An den Innenwänden, einschließlich Decke und Tür, waren EPDM-Dichtungsbahnen eines Sonnenkollektors (Solel Solar Systems Ltd., Beit Shemesh, Israel) befestigt.

Diese waren mit destilliertem Wasser gefüllt, welches über eine mit einem Kompressor betriebene Pumpe in Zirkulation gebracht wurde. Das Wasser wurde über einen Thermostat (EWPC902T, Eliwell, Beluno, Italien) auf die gewünschte Raumtemperatur eingestellt.

Die Zuckerrübenpflanzen waren in zwei Reihen so aufgestellt, dass jeweils ein Blatt (3. bzw. 4. oder 5. bzw. 6.) oder zwei Blätter (3. und 4. bzw. 5. und 6.) pro Pflanze waagrecht fixiert werden konnten (Abb. 2-1). Die Pflanzen standen in Bewässerungsrinnen, die automatisch mit Wasser versorgt wurden. Parallel zu jeder Reihe wurde ein 12 cm breiter Streifen eines mit Gummi überzogenen Drahtgitters fixiert. Auf diesen wurden die entsprechenden Blätter und an beide Seiten des Blattes jeweils ein 12 cm langes und 0,3 bis 0,5 cm dickes Holzstäbchen gelegt. Ein weiteres rechteckiges Stück des Drahtgitters in der Größe der Zuckerrübenblätter wurde mit wattierten Drahtstücken an diese Holzstäbchen befestigt, um die Blätter zu fixieren. Durch die Dicke der Holzstäbchen vorgegeben, hatten die Blätter zwischen beiden Drahtgitterflächen genug Raum um ihr Wachstum ungehindert fortsetzen zu können. Die Maschenweite des Gitters betrug 2 x 2 cm und wurde als Anhaltspunkt für den Messbereich verwendet.

Die Thermographiekamera war an einer automatisierten Vorrichtung angebracht, über welche der gesamte Messvorgang gesteuert wurde. Der Abstand zwischen dem Kameraobjektiv und den Zuckerrübenblättern war immer konstant und wurde lediglich im Millimeterbereich variiert um die Bildschärfe zu korrigieren.



Abb. 2-1 Fixierung von jeweils zwei Blättern einer Zuckerrübenpflanze der Sorte Nematop zur Erfassung des Krankheitsverlaufes bei einer Infektion durch *Uromyces betae* mit einer Thermo-, einer Chlorophyllfluoreszenz- und einer Videokamera.

Freilandversuche

Für die Parzellen im Versuchsfeld Poppelsdorf (2005) wurde eine Vorrichtung¹ verwendet, die orthogonale Aufnahmen aus 10 m Höhe ermöglichte. Eine Halterung, an welche die Thermographiekamera und eine Digitalkamera montiert werden konnten, wurde in eine Sprosse einer Leiter eingeschoben (Abb. 2-2, A), welche am Dreipunktbock eines Frontladers fixiert wurde (Abb. 2-2, B). Die Kamerahalterung war derart konstruiert, dass sie sich stets senkrecht zum Boden einpendelte. Mit dem Frontlader wurde die Kamerahalterung auf 10 m Höhe über die entsprechende Parzelle gehoben. Die Thermogramme wurden auf einem Laptop gespeichert, welcher über ein Kabel an die Thermographiekamera angeschlossen war.



Abb. 2-2 Halterung für eine VARIOSCAN Thermographiekamera, Modell 3021-ST, und eine Digitalkamera am Ende einer Leiter (A), und die Anbringung dieser Kamerahalterung über den Dreipunktbock eines Frontladers an einen Traktor (B) zur orthogonalen Aufnahme von Zuckerrübenparzellen auf dem Versuchsfeld Poppelsdorf im Jahr 2005.

2005 wurden die Flächen in Poppelsdorf und Klein-Altendorf, 2006 in Frankenforst und Dikopshof, aus einem 3-Personen Hubschrauber (Typ R44, AIR LLOYD Deutsche Helicopter Flugservice GmbH, Sankt Augustin) mit der Thermographie- und einer Digitalkamera aufgenommen. Um das gesamte Feld aufnehmen zu können, variierte die Flughöhe je nach Standort zwischen 300 und 500 m. Um möglichst orthogonale Aufnahmen von den Feldern zu erhalten, konnte der Hubschrauber bis zu einem gewissen Grad mit der Seite, von welcher die Aufnahme erfolgte, in Richtung des Feldes geneigt werden. Die Hubschrauberflüge wurden am Vormittag und an Tagen ohne Regen durchgeführt.

¹ Entwickelt und hergestellt durch das Institut für Landtechnik der Universität Bonn

2.11.3 Software und Auswertung der Messergebnisse

Thermogramme, die mit der VARIOSCAN 3021-ST aufgenommen worden waren, wurden mit dem Programm IRBIS Plus V2.2 (InfraTec GmbH, Dresden, Deutschland) ausgewertet. IRBIS Plus gibt die Temperatur eines Bildausschnittes an, welches manuell eingegrenzt werden kann.

Die Temperatur der Gesamtpflanze in gesundem Zustand wurde errechnet, indem über je ein Blatt eines Alters ein Polygon gesetzt wurde. Die Werte beider Blätter ergaben gemittelt den Temperaturwert für ein gleiches physiologisches Alter, die Temperaturwerte aller Blätter zusammen wiederum die Temperatur einer Pflanze. Mit dieser Methode konnte ein Effekt durch die unterschiedlichen Größen von Blättern verschiedenen physiologischen Alters vermieden werden. Die Temperatur der Pflanzen unter abiotischem Stress wurde hingegen durch ein Polygon über den Umriss der gesamten Pflanze ermittelt, so dass die gesamte Blattfläche einen Temperaturwert ergab.

Die mit der Agema/FLIR Thermovision[®] THV900 erstellten Thermogramme wurden über das Softwareprogramm AGEMA[™] Research Version 2.1 (FLIR Systems, West Malling, Kent, Großbritannien) ausgewertet. Wie bei IRBIS Plus V2.2 kann der gewünschte Objektbereich innerhalb eines Thermogramms manuell eingegrenzt werden. Mit einer Kreis- oder Polygonfunktion erhielt man die durchschnittliche Temperatur aller Pixel, die darüber erfasst wurden. So konnte die Temperatur des Zentrums sowie des marginalen Bereiches der jeweiligen Symptome bestimmt werden. Mittels eines Rechtecks oder eines Polygons wurde die durchschnittliche Temperatur eines Blattstückes mit einer Größe von 4 cm² erfasst.

Die Größe der Symptome von *C. beticola* und *U. betae*, wie sie in Thermogrammen dargestellt waren, wurde in Form des Durchmessers angegeben. Dieser wurde ermittelt, indem eine Linie über das entsprechende Symptom geführt wurde, deren Länge in Pixel angegeben wurde. Der Durchmesser des Randes des Blattflecks beziehungsweise des Hofes der Pustel errechnete sich wie in Abb. 2-3 beschrieben. Die Pixelwerte wurden dann in Millimeter umgerechnet.

Maximale Temperaturdifferenz

Beide Programme geben für jeden Messbereich die Maximal-, Minimal- und Durchschnittstemperatur an. Aus dem Maximal- und dem Minimalwert innerhalb eines Blattbereiches wurde die maximale Temperaturdifferenz (MTD) errechnet, um die

Temperaturheterogenität der Objekte darzustellen (LINDENTHAL, 2005). Die MTD ist bezüglich ihrer absoluten Werte im Gegensatz zur Durchschnittstemperatur unabhängig von externen abiotischen Einflussfaktoren, wie zum Beispiel unterschiedliche Lichtverhältnisse der Versuchskammer.

Temperaturdifferenz

Neben den absoluten Temperaturwerten wurde auch die Temperaturdifferenz ermittelt. Diese errechnete sich aus der Temperatur der inokulierten Variante minus der Temperatur der nicht inokulierten Variante und wurde als t_d bezeichnet.

Zur Darstellung der Oberflächentemperatur eines Bestandes wurde das Thermogramm entsprechend der Anzahl an Boniturstellen in ebenso viele Teilbereiche eingeteilt. Von diesen wurde mittels der Polygonfunktion die Durchschnittstemperatur gewonnen. Von der Temperatur eines jeden Polygons wurde der Wert des Polygons mit der geringsten Temperatur subtrahiert. Das Ergebnis aus drei thermischen Aufnahmen ergab schließlich die t_d . Also wurden nicht die absoluten Temperaturen, sondern immer nur die relativen Temperaturen dargestellt, welche einen besseren Vergleich der Versuchsflächen zwischen den Aufnahmetermen ermöglichen.

Für die statistische Auswertung des Parzellenversuches in Poppelsdorf wurde eine andere Form der Temperaturdifferenz herangezogen. Aus der durchschnittlichen Oberflächentemperatur aller gesunden Teilbereiche (Befallsstufe 0, beziehungsweise Anteil der befallenen Blattfläche 0 %) wurde zuerst eine Referenztemperatur errechnet. Die Differenz aus der Oberflächentemperatur eines jeden Teilbereiches und dieser Referenztemperatur ergab dann die Temperaturdifferenz, t_d . Daraufhin wurde der Durchschnitt aus allen Teilbereichen mit einer Befallsintensität von 0 (t_{dn} , nicht befallen) mit dem Durchschnitt aller Teilbereiche mit einer Befallsstufe von 1 bis 9 für *C. beticola* und/oder 1 bis 100 % mit *E. betae* befallener Blattfläche (t_{db} , befallen) innerhalb einer Parzelle verglichen.

Temperaturstabilität

Um zu beurteilen, in welchen Bereichen ein Bestand während der Vegetationsperiode die geringste beziehungsweise die höchste Oberflächentemperatur aufwies, wurden die Temperaturdifferenzen nach Rängen geordnet, beginnend mit der geringsten Temperaturdifferenz aufsteigend ab dem Rang 1. Aus den Rängen der Temperaturdifferenzen

von den Bestandesoberflächen zu den verschiedenen Terminen wurde der durchschnittliche Rang für jeden Feldbereich errechnet, der durch eine Boniturstelle und ihre nähere Umgebung abgedeckt war.

Die Stabilität eines Temperaturbereiches wurde ermittelt, indem die Werte aus der Differenz zwischen den Temperaturdifferenzen an einer Boniturstelle von einem Termin zum darauffolgenden aufsummiert wurden (verändert nach LENTHE, 2005). Je kleiner die Differenzsumme, desto stabiler war die Temperatur während der berücksichtigten Zeit, unabhängig davon, ob es sich um eine niedrige oder eine hohe Temperatur innerhalb des Feldes handelte.

2.12 Chlorophyllfluoreszenz

2.12.1 Sensor

Als Sensor für die Chlorophyllfluoreszenz-Aufnahmen wurde eine CCD Kamera (Pragmatic, Santa Clara, USA) mit einer Sensibilität von $< 0,1$ lux verwendet. Diese war mit einem Rotfilter für Wellenlängen über 650 nm versehen. Je drei Halogenlampen mit 20 beziehungsweise 50 W waren abwechselnd um die Kamera montiert. Ein Blaufilter ermöglichte ein Anregungslicht zwischen 500 und 650 nm. Die erste Aufnahme erfolgte nach einer Sekunde aktinischer Beleuchtung durch die drei 20 W Lampen bei $250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ PAR, entsprechend FL (low, geringe Intensität). Dann wurden die drei 50 W Lampen hinzugeschaltet und nach einer weiteren Sekunde bei $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ PAR die Chlorophyllfluoreszenz bei hoher Intensität, FH (high) gemessen. Im Anschluss wurden alle Lampen ausgeschaltet. Die Chlorophyllfluoreszenzbilder hatten ein Format von 300 x 300 Pixel.

2.12.2 Software und Auswertung der Messergebnisse

Die Chlorophyllfluoreszenz FH der Zuckerrübenblätter wurde über das Programm ImageJ 1.32j (National Institute of Health, USA, <http://rsb.info.nih.gov/ij/index.html>) als Schwarzweiß-Bild dargestellt. Gesundes Blattgewebe erschien darin hellgrau bis weiß mit einem maximalen Grauwert von 256. Infektionsstellen mit zerstörtem Blattgewebe und daher verringerter Chlorophyllfluoreszenz waren dunkler als gesundes, oder schwarz mit Grauwerten bis Null.

Krankheitssymptome wurden anhand des Chlorophyllfluoreszenzbildes visuell be-

stimmt und ihre FH über die Programmfunktionen ermittelt. Über *Cercospora*-Blattflecken und Rostpusteln wurden Linien gezogen und aus dem dargestellten Liniendiagramm die Grauwerte und die Größe der entsprechenden Symptom-Parameter berechnet (Abb. 2-3). Über die Kreisfunktion wurden die Grauwerte (Median) von visuell gesundem Gewebe angrenzend zum Symptom erhoben. Die Größe des Kreises entsprach der Größe des Symptoms. Der Grauwert nicht inokulierter Blätter ergab sich aus dem durchschnittlichen Median von vier Kreisen in Größe des Symptoms. Aus den Grauwerten wurden durch Division der Werte nicht inokulierter beziehungsweise inokulierter, aber symptomfreier Blätter durch die entsprechende Variante Verhältniswerte gebildet, um den Einfluss unterschiedlicher Belichtungsverhältnisse innerhalb der Klimakammer auszuschließen. Beim Quotient 1 bestand kein Unterschied in der Chlorophyllfluoreszenz zwischen gesundem Gewebe und dem jeweiligen Symptom. Je höher der Quotient war, desto geringer war der absolute Grauwert der entsprechenden Bildauswahl und umgekehrt. Hohe Verhältniswerte wiesen auf eine geringe FH. Die Größe der Symptome von *C. beticola* und *U. betae*, wie sie in den Schwarzweiß-Bildern dargestellt waren, wurden als Pixelwerte ermittelt wie in 2.11.3 und Abb. 2-3 beschrieben und dann in Millimeter umgerechnet.

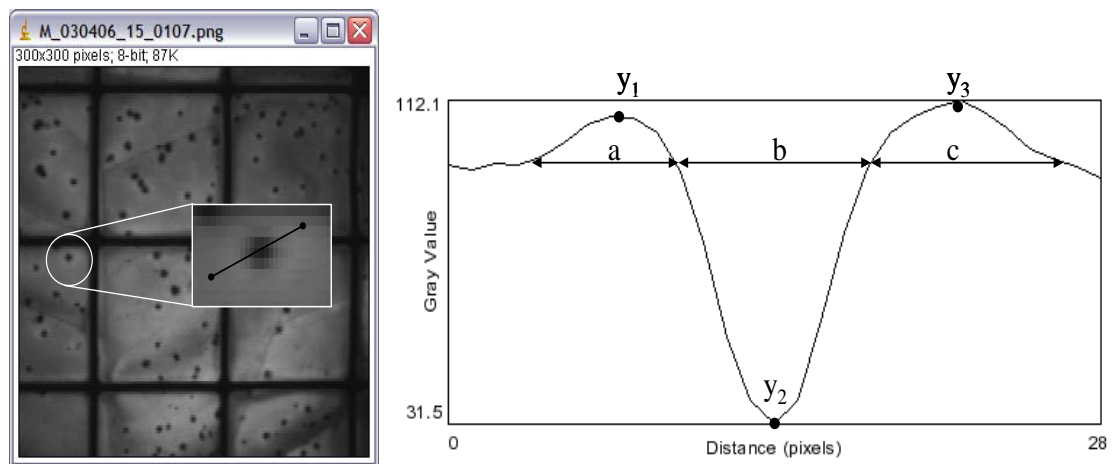


Abb. 2-3 Beispiel für die Auswertung der Grauwerte (Chlorophyllfluoreszenz) und der Größe einer Rostpustel: Aufnahme eines mit *Uromyces betae* infizierten Blattes mit einer CCD-Kamera 1 s nach $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ PAR hoher Beleuchtung. Vergrößerung einer Pustel mit Linien-Funktion und entsprechendes Liniendiagramm (y_2 = Grauwert des Uredosporenlagers, Durchschnitt aus y_1 und y_3 = Grauwert des Hofes, b = Durchmesser des Uredosporenlagers, Durchschnitt aus a und c = Durchmesser des Hofes).

Der Grauwert von Blattgewebe, welches mit *E. betae* inokuliert worden war, wurde ermittelt, indem ein Polygon über einen Blattbereich in der Größe der vorgegebenen

Maschenweite gezogen wurde. Der Median der Grauwerte aller darin enthaltenen Pixel lieferte den Grauwert. Bei der nicht inokulierten Variante wurde ebenso verfahren. Blattbereiche, die im Schatten des Gitters lagen wurden aus der Analyse ausgeschlossen, daher betrug die Größe des Messfeldes teilweise weniger als 4 cm^2 .

2.13 Digitale Photographie und Videoaufnahmen

Aufnahmen von Zuckerrübenpflanzen unter Trockenstress beziehungsweise Staunässe, von Symptomen, und von Versuchsfeldern aus dem Hubschrauber wurden mit einer einfachen Digitalkamera durchgeführt.

Bilder von den Krankheitssymptomen, die mit Thermographie- und Chlorophyllfluoreszenzbildern verglichen werden sollten, wurden mit einer digitalen LCL-217HS Videokamera (Watec Inc., New York, USA) im Format 300×300 Pixel erstellt.

Orthophotos von den Parzellen in Poppelsdorf in 2005 wurden mit einer Digitalkamera gemacht, welche über eine automatische Aufnahmefunktion verfügte (PowerShot Pro1 Digitalkamera, Canon Inc. Tokio, Japan). Mittels einer Intervallfunktion wurde die Aufnahme von mehreren Digitalbildern in einem Auslöseabstand von einer Minute programmiert. Die Auflösung betrug 2272×1704 Pixel.

2.14 Automatisierte Messvorrichtung zur Sensorsteuerung

Von den Symptomen der drei Blattkrankheiten, einem Blattfleck, einer Mehltaupustel, und einer Rostpustel, sollten zu bestimmten Zeitpunkten im Krankheitsverlauf Thermographie-, Chlorophyllfluoreszenz- und Digitalbilder erstellt werden. Die Bilder wurden mit Hilfe einer automatisierten Messvorrichtung aus drei, in jeweils zwei Richtungen über Bänder beweglichen Achsen (x , y , z), an deren z -Achse die drei Sensoren nebeneinander befestigt waren (Schneider Electric Motion Deutschland GmbH & Co. KG, Lahr, Deutschland) erstellt (Abb. 2-4). Über die x - und y -Achse war eine Beobachtungsfläche von 1×2 m vorgegeben. Über die z -Achse konnte über eine Spannweite von $0,5$ m die Bildschärfe durch die Einstellung des Abstands zwischen Sensoren und Objekt adjustiert werden. Mittels einer Fernbedienung wurde zuerst die genaue x -, y -, z -Position eines Symptoms oder einer Blattregion in die Systemsoftware eingegeben. Die am Computerbildschirm sichtbaren Thermogramme dienten als Orientierungshilfe. Für die beiden anderen Sensoren wurden die x -Werte der einzelnen Positionen angepasst. Ein Bewegungsregler steuerte dann automatisch die Kameras zu

jeder einzelnen Position. Die Bildaufnahme erfolgte immer zuerst über die Thermographie-, dann über die Video- und schließlich über die Chlorophyllfluoreszenz-kamera.

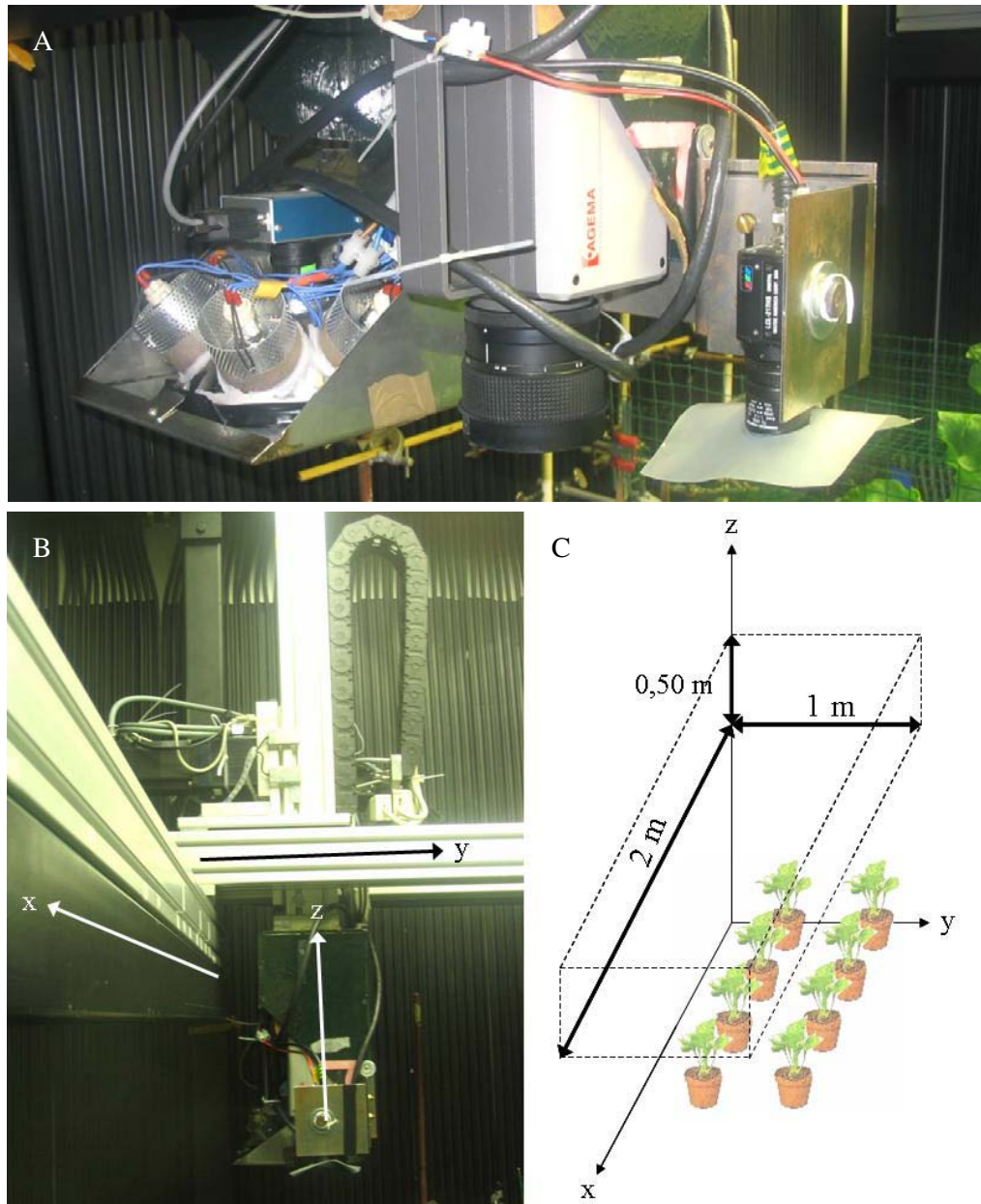


Abb. 2-4 Anordnung der drei Sensoren: Chlorophyllfluoreszenz-, Thermographie-, und Videokamera (von links nach rechts) (A), automatisierte Messvorrichtung (B) und schematische Übersicht der Spannweiten und des Raumes aller möglichen Positionen (C).

Sämtliche Versuche, die mit der automatisierten Messvorrichtung zur Sensorsteuerung durchgeführt wurden, entstanden in den Labors und in Zusammenarbeit mit der Abteilung Plant Hormone Signalling and Bio-Imaging (HSB) des Departments of Molecular Genetics, Gruppe Bio-Imaging der Universität Gent, Belgien.

2.15 Multispektrale Fernerkundung

Bei den Hubschrauberflügen über die Versuchsfelder wurden zusätzlich Aufnahmen mit einer Multispektralkamera vom Institut für Allgemeinen Pflanzenbau der Universität Bonn gemacht und zur Verfügung gestellt. Das verwendete Model TETRACAM (TETRACAM Inc., Chatsworth, USA) nimmt Bildinformationen in den spektralen Kanälen des grünen, roten und nahinfraroten (NIR) Lichtes auf. Die Bilddaten werden als Falschfarbenbild im bmp-Format gespeichert. Die spektralen Informationen des grünen Bereiches wurden im blauen, die des roten im grünen und die des nahinfraroten im roten Kanal gespeichert. Da gesunde Blätter mindestens fünfmal mehr Licht im infraroten als im sichtbaren Bereich reflektieren, erscheinen die vitalen Bereiche einer Vegetationsdecke im Falschfarbenbild intensiv rot (AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY, 1978). Diese Reflektion wird durch geschädigte oder kranke Pflanzen stark reduziert.

2.16 Freilandversuche

Alle Untersuchungen wurden auf den Flächen der Versuchsgüter der Landwirtschaftlichen Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn durchgeführt. Es wurden Flächen ausgesucht, die zum einen einheitliche Böden und ein geringes Relief, zum anderen Böden verschiedener Qualität und ein starkes Relief aufwiesen.

2.16.1 Poppelsdorf

2.16.1.1 Versuchsanlage

Der durchschnittliche jährliche Niederschlag am Standort Poppelsdorf, Höhe 60 m ü. NN, betrug 600 mm. Der Boden besteht vorwiegend aus Lehm mit einer guten bis sehr guten Bodenqualität von 77 (PFEIFFER et al., 2005).

Im Jahr 2005 wurde ein Versuchsfeld mit den Maßen 17 x 66 m angelegt. Die Zuckerrüben wurden am 6.04.2005 mit einem Reihenabstand von 0,45 m und einem Pflanzenabstand in der Reihe von 0,20 m gedreht. Am 13.07.2005 wurden acht rechteckige Parzellen in unterschiedlich gut entwickelten Feldbereichen ausgewiesen. Die Breite betrug $2,95 \pm 0,15$ m, die Länge $4,40 \pm 0,30$ m (7 Reihen). An den Ecken wurden sie mit Markierungen versehen. Diese bestanden aus einer schwarz lackierten Holzplatte (0,20 x 0,20 m), die auf einen 0,70 m langen Pfahl geschraubt war. Da sich die Holz-

platten durch die schwarze Lackierung stärker erwärmt als der Bestand, konnten die Parzellen auch im Thermogramm erkannt werden.

Am 10.06.2005 wurde das ganze Feld mit den Herbiziden Goltix 700SC[®] (350 g/l Metamitron, 1,5 l/ha) und Betanal expert[®] (157 g/l Phenmedipham, 1 l/ha; beide Bayer CropScience AG, Monheim, Deutschland) behandelt. Die Zuckerrüben in den Parzellen Nr. 4 und Nr. 7, welche als nicht befallene Referenzen bestimmt waren, wurden am 25.07. und 17.08.2005 mit dem gegen *E. betae* und *C. beticola* wirksamen Fungizid Bardos[®] (100 g/l Difenoconazol, 1 l/ha; Syngenta Agro GmbH, Maintal, Deutschland) mit einer Handspritze behandelt. Die Rodung der Rüben erfolgte am 10. und 11.10.2005.

2.16.1.2 Versuchsdurchführung

Von den Parzellen wurden zwischen dem 14.07. und 6.09.2005 in zweiwöchigem Abstand und am 28.09.2005 mit dem Kamerahubgerüst Thermogramme und Lichtbilder erstellt. Zeitnah zu den Aufnahmetermi-
nen wurde zwischen dem 15.07. und 28.09.2005 auf Symptome von *C. beticola*, *E. betae* und *U. betae* bonitiert. Räumlich war die Bonitur so genau, dass die Befallsstärke für 56 Teilbereiche (acht Teilbereiche pro Reihe) mit einer Größe von 0,5 x 0,5 m bestimmt werden konnte.

Das Feld wurde am 12.05. und am 28.06.2005 mit dem Hubschrauber überflogen, um die Oberflächentemperatur des Bodens beziehungsweise des Bestandes zu messen, und multispektrale Aufnahmen zu machen. Eine Karte der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit wurde aus den Daten der Messung vom 25.01.2006 erstellt.

2.16.2 Klein-Altendorf

2.16.2.1 Versuchsanlage

Der Standort Klein-Altendorf liegt auf 180 bis 182 m ü. NN. Die durchschnittlichen Niederschläge betragen 600 mm. Die Bodenart ist vorwiegend ein aus Löß entstandener Lehm mit der Bodenzahl 86 (PFEIFFER et al., 2005).

Am 2.05.2005 wurde auf der Fläche Oberhoicht ein Zuckerrübenfeld von etwa 32 x 216 m angelegt. Das Feld war von einem 3 m breiten Streifen Hafer begrenzt, der nach der Abreife und vor dem Versuchsbeginn geerntet wurde. Die verbliebenen Strohhäufel grenzten sich im Thermogramm durch ihre höhere Temperatur von den

Zuckerrüben ab, und begrenzten somit das Versuchsfeld.

Mit einem Abstand von 20 m innerhalb und 10 m zwischen den Reihen wurden 65 Boniturstellen ausgewiesen. Die Stellen waren zwischen den Reihen so versetzt, dass ein gleichmäßiges Raster entstand.

An der südlichen Längsseite des Feldes wurde eine meteorologische Messstation aufgebaut. Neben den standardmäßig vorhandenen Sensoren besaß sie zusätzlich drei Sensoren zur Bestimmung der relativen Luftfeuchtigkeit, die mit einem maximalen Abstand von etwa 50 m zwischen den Rübenpflanzen aufgestellt wurden.

Die Rüben wurden am 25.05.2005 mit den Herbiziden Goltix 700SC[®] (350 g/l Metamitron, 1,2 l/ha), Betanal expert[®] (157 g/l Phenmedipham, 0,8 l/ha; beide Bayer CropScience AG, Monheim, Deutschland), und am 14.06. und 28.06.2005 mit 1,2 l/ha Goltix[®] und mit 1 l/ha Betanal[®] gespritzt. Die Rüben wurden am 28.10.2005 gerodet.

2.16.2.2 Versuchsdurchführung

Der Krankheitsbefall wurde ab dem 5.07.2005 bonitiert. Zwischen dem 18.07. und dem 19.07. erfolgten die Bonituren in einwöchigem, danach bis zum 14.10.2005 in zweiwöchigem Abstand.

Am 12.05., vor dem Auflaufen der Rüben, und am 18.08.2005, nach Bestandesschluss, wurden von einem Hubschrauber aus Thermogramme, Multispektral- und Lichtbilder von der Versuchsfläche erstellt.

Die scheinbare elektrische Leitfähigkeit des Bodens wurde am 16.04.2007 gemessen.

2.16.3 Frankenforst

2.16.3.1 Versuchsanlage

Mit 180 bis 185 m ü. NN war Frankenforst der am höchsten gelegene Standort. Die oberen Bodenschichten bestanden ursprünglich aus Löss, die unteren aus Trachyttuff. Die Bodenart ist überwiegend Lehm an den Stellen, an welchen die obere Bodenschicht sehr dick war. Lehmiger Ton ist dort vorzufinden, wo der Trachyttuff an die Bodenoberfläche getreten und bereits stark verwittert ist. Bei keiner oder geringer Verwitterung des Trachyttuffs ist der Boden mit Kieseinlagerungen versetzt (MERTENS et al., 2008). Die Bodenzahlen variieren zwischen 34 und 60 (PFEIFFER et al., 2005). Jährlich fielen durchschnittlich 600 bis 850 mm Regen, die durchschnittliche

Jahrestemperatur war 9 °C.

Am 5.05.2006 wurden auf der Versuchsfläche Zuckerrüben gesät. Die Begrenzung des Feldes im Thermogramm war auf der westlichen Längsseite durch freie Bodenfläche, auf den anderen Seiten dadurch gegeben, dass die umgebende Wintergerste während der Versuchszeit bereits geerntet worden war.

30 Boniturstellen wurden zu je 15 Stellen mit einem Abstand von 10 m innerhalb der Reihe und gegeneinander versetzt längs des Feldes in zwei Reihen ausgewiesen.

Ende Mai und Anfang Juni erfolgten zwei Herbizidbehandlungen mit 1 l/ha Goltix 700SC[®] (350 g/l Metamitron) und 1,25 l/ha Betanal expert[®] (157 g/l Phenmedipham) (beide Bayer CropScience AG, Monheim, Deutschland). Am 16.10.2006 wurden die Zuckerrüben gerodet.

2.16.3.2 Versuchsdurchführung

Zwischen dem 21.07. und dem 20.09.2006 wurden die Pflanzen in etwa einwöchigem Abstand auf Blattkrankheiten hin untersucht. Zwei weitere Bonituren fanden am 6.10. und 16.10.2006 statt. Zusätzlich wurde von jeder Boniturstelle ein Lichtbild gemacht, um die Entwicklung der Pflanzen aufgrund der verschiedenen Bedingungen innerhalb des Feldes festzuhalten.

Das Versuchsfeld wurde im Jahr 2006 fünfmal mit einem Hubschrauber überflogen, um thermographische, multispektrale und Lichtbild-Aufnahmen zu machen. Der Boden wurde am 5.05., der gesunde beziehungsweise schwach erkrankte Bestand am 4.07., 18.07., und 17.08., und der stark erkrankte Bestand am 21.09.2006 aufgenommen.

Die Daten für die Karte der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit stammten von einer Messung am 14.12.2004.

2.16.4 Dikopshof

2.16.4.1 Versuchsanlage

Der Standort Dikopshof ist etwa 58 bis 62 m ü. NN südlich der Köln-Aachener Bucht auf der Mittelterrasse des Rheines gelegen. Aus umlagertem Löß und dem Bodentyp Parabraunerde ist ein humoser feinsandiger Lehm entstanden. Auf dem Versuchsfeld variieren die Bodenzahlen zwischen 40 und 81 (ANONYM, 1952). Die Niederschlags-

mengen lagen bei durchschnittlich 630 mm, die Jahrestemperatur bei 9,7 °C.

Im Frühjahr 2006 wurden auf einer Fläche von 134 x 142 m des Schlages VIII f Zuckerrüben gesät. Während der Vegetationsperiode wurde etwa ein halber Meter der umgebenden Zuckerrüben der Sorten Miranda und Tatjana weggefräst, so dass sich die Versuchsfläche im Thermogramm hervorhob.

64 Boniturstellen, jeweils acht innerhalb acht paralleler Reihen wurden in einem regelmäßigen Raster auf dem Feld markiert.

Zur Erhebung der relativen Luftfeuchtigkeit im Bestand wurden im Feld drei Wetterstationen, eine in der Senke, eine am Hang und eine auf der Kuppe, aufgestellt.

Mit Ausnahme von Fungizidbehandlungen wurde der Bestand betriebsüblich geführt. Am 6.10.2006 wurden die Zuckerrüben gerodet.

2.16.4.2 Versuchsdurchführung

Die Zuckerrüben wurden erstmals am 21.07.2006 auf Krankheitsbefall bonitiert. Vom 1.08. bis 12.09.2006 wurden die Bonituren etwa alle zwei Wochen wiederholt. Die letzten zwei Untersuchungen fanden am 20.09. und am 6.10.2006 statt. Auch hier wurden die Zuckerrüben an jeder Boniturstelle photographiert.

Die Hubschrauberflüge über das Versuchsfeld Dikopshof fanden an den gleichen Tagen statt wie beim Frankenforst.

Die Daten aus der Messung der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit am 4.01.2005 bildeten die Grundlage für die Erstellung einer georeferenzierten Karte.

Bei allen Versuchen im Freiland wurden außerdem noch andere Krankheiten, Schädlinge, beziehungsweise deren Schäden, und sonstige Auffälligkeiten, welche die Gesundheit der Pflanzen betrafen, sowie deren Verbreitungsgebiete vermerkt, insofern sie von Bedeutung für die Fragestellung waren.

2.16.5 Messung der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit

Die scheinbare elektrische Leitfähigkeit (ECa) des Bodens wurde mit einem EM38-Gerät (Geonics Ltd., Ontario, Kanada) in der vertikalen Einstellung gemessen. Zusammen mit einem GPS (Haicom HI-204 III) war es auf einen Schlitten montiert, der über die Versuchsflächen gezogen wurde, um kontinuierlich Daten zu erheben.

Durch elektromagnetische Induktion über einen Bodenbereich von 0 bis 1,50 m Tiefe

wird die scheinbare elektrische Leitfähigkeit in Millisiemens pro Meter [mS/m] ermittelt. Diese wird vom Salz- und Tongehalt des Bodens sowie der Bodenfeuchte zum Zeitpunkt der Messung beeinflusst (FRIEDMAN, 2005). Bei vernachlässigbarem Salzgehalt und bei vergleichbarer Bodenfeuchte der Standorte kann über den ECa-Wert eine Aussage über den Tongehalt des Bodens gemacht werden (MERTENS et al., 2008). Alle Messungen wurden von der Abteilung für Bodenwissenschaften des Instituts für Nutzpflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz der Universität Bonn bei wassergesättigtem Boden durchgeführt.

2.16.6 Erhebung von Witterungsdaten

Die Daten zu Temperatur und Niederschlag am Standort Frankenforst und Dikopshof stammten von den Wetterstationen der jeweiligen Versuchsgüter. Die Temperaturen wurden in 2 m Höhe gemessen.

Auf dem Versuchsfeld Klein-Altendorf und Dikopshof wurden zusätzlich meteorologische Messstationen (Thies Clima, Adolf Thies GmbH & Co. KG, Göttingen, Deutschland) aufgebaut, um die relative Luftfeuchtigkeit im Bestand zu messen. Jede Station bestand standardmäßig aus einem zentralen Datalogger (DL15) und jeweils einem Sensor für die relative Luftfeuchtigkeit, die Lufttemperatur in 2 m Höhe, die Temperatur in Bodennähe, die Bodentemperatur und einem Niederschlagsgeber. Der Sensor zur Messung der relativen Luftfeuchtigkeit bestand aus einem Baumwollstreifen, welcher in eine Metallhalterung eingefasst war. An eine Boniturstange montiert konnte er der Höhe des Bestandes angepasst werden. Die Messwerte wurden stündlich erhoben und im Datalogger gespeichert. Mittels des Programms Kom-DL konnten die Messwerte über einen PC abgefragt werden.

2.16.7 Ermittlung von Befallsrängen

Das Risiko von Bestandesbereichen, mit allen drei oder einer der Krankheiten befallen zu werden, wurde im Anschluss an die Vegetationsperiode aus den Befallswerten für die Standorte Klein-Altendorf, Frankenforst und Dikopshof ermittelt. Hierzu wurden an jedem Boniturtermin den Boniturstellen entsprechend ihrer Befallswerte Ränge zugeordnet. Boniturstellen, an welchen die Pflanzen keinen oder nur geringen Befall aufwiesen, erhielten einen niedrigen Rang. Einen hohen Rang erhielten diejenigen Boniturstellen, an welchen die Pflanzen im Verhältnis zu allen anderen stärker befallen

waren. Der Durchschnitt aus allen einer Boniturstelle zugeordneten Rängen während einer Vegetationsperiode stand stellvertretend für das Befallsrisiko an dieser Stelle. War die Spannweite der an einem Standort vorhandenen Befallsrisikogruppen für eine Krankheit groß, bedeutete dies eine hohe Befallsheterogenität innerhalb des Bestandes.

2.16.8 Georeferenzierung der Versuchsflächen

Die Geodaten der Feldumrisse und der Boniturstellen wurden in ein Handheld-GPS (HI 303 CF, Haicom Electronics Corp., Taipeh, Taiwan, Software: ESRI® ArcPad 7.0, ESRI Inc., Redlands, Kalifornien, USA) eingegeben und dann als Polygon- beziehungsweise Punkt-Shapefiles in die Software ESRI® ArcMap™ 9.1 (ESRI Inc.) übertragen. Dort wurden gegebenenfalls Ungenauigkeiten manuell korrigiert und aus den Bonitur-, Temperatur- und ECa-Daten georeferenzierte Karten erstellt. Mit der Programmfunktion Spatial Analyst ließen sich die Boniturdaten durch Inverse Distance Weighted (Power: 2, search radius type: variable, number of points: 2) interpolieren. Bei dieser Methode wird davon ausgegangen, dass der Einfluss eines Probenwertes mit zunehmendem Abstand vom Ort seiner Erhebung abnimmt.

Die Daten der Parzellen des Versuchsfeldes Poppelsdorf wurden direkt von einer Excel-Tabelle aus als .dbf Dokument gespeichert. In ArcMap™ konnten sie dann als Shapefile angezeigt, und wie oben interpoliert werden.

2.17 Statistische Auswertungen

Die Standardabweichung wurde mit der Formelfunktion im Programm Microsoft® Office Excel 2003 errechnet. Signifikante Unterschiede zwischen den Varianten wurden bei einer Wahrscheinlichkeit von $p < 0,05$ angenommen. Diese Wahrscheinlichkeiten wurden mit dem Student's t-Test in SigmaPlot 2000 Version 6.00 berechnet. Alle dargestellten Ergebnisse wurden in mindestens einem weiteren unabhängigen Experiment bestätigt.

Die Korrelationen wurden mit Hilfe des Programms SigmaPlot 2000 Version 6.00 erstellt.

3 ERGEBNISSE

3.1 Einfluss von Pflanzenentwicklung und abiotischem Stress auf die Temperatur von Zuckerrüben

Die Temperatur von Zuckerrübenpflanzen wird von pflanzenspezifischen und von externen Faktoren beeinflusst. Im Folgenden sollte die Temperatur gesunder Zuckerrübenpflanzen in Abhängigkeit von diesen Faktoren unter kontrollierten Bedingungen dargestellt werden. Zu den pflanzenspezifischen Faktoren wurden alle Veränderungen der Pflanze während des Wachstums gezählt, welche einen Einfluss auf die Temperatur haben können. Das gilt insbesondere für Veränderungen der Blätter hinsichtlich ihrer morphologischen Merkmale und ihres Wassergehalts. Die beiden abiotischen Stressfaktoren Wassermangel und Staunässe wurden als Beispiele häufig in der Umwelt vorkommender äußerer Einflüsse beschrieben. Informationen über die Art und das Ausmaß der Temperaturveränderung durch diese Faktoren bei gesunden Zuckerrübenpflanzen können helfen, verschiedene Temperaturzustände und -regionen auf Feldebene zu interpretieren.

3.1.1 Entwicklungstadium

Zunächst sollte festgestellt werden, ob sich die Temperatur von gesunden Zuckerrübenpflanzen während ihres Wachstums ändert. Aus methodischen Gründen wurden nur die Wachstumsstadien vom Keimblatt (BBCH 10) bis zum achten voll ausgebildeten Blatt (BBCH 18) untersucht.

Aus den drei Wiederholungen dieses Versuches ergab sich keine eindeutige Tendenz hinsichtlich der Veränderung der absoluten Temperatur einer Zuckerrübenpflanze während des Wachstums (Abb. 3-1). Im Mittel variierte die Temperaturdifferenz zwischen der Pflanze und der sie umgebenden Luft um 1,87 K. In allen Fällen war sie negativ, das heißt die Temperatur der Pflanzen lag immer unter der Lufttemperatur. Die Temperatur der Pflanze näherte sich im Laufe der Entwicklung der Lufttemperatur an; jüngere Pflanzen waren somit im Bezug zur Lufttemperatur tendenziell kühler als ältere.

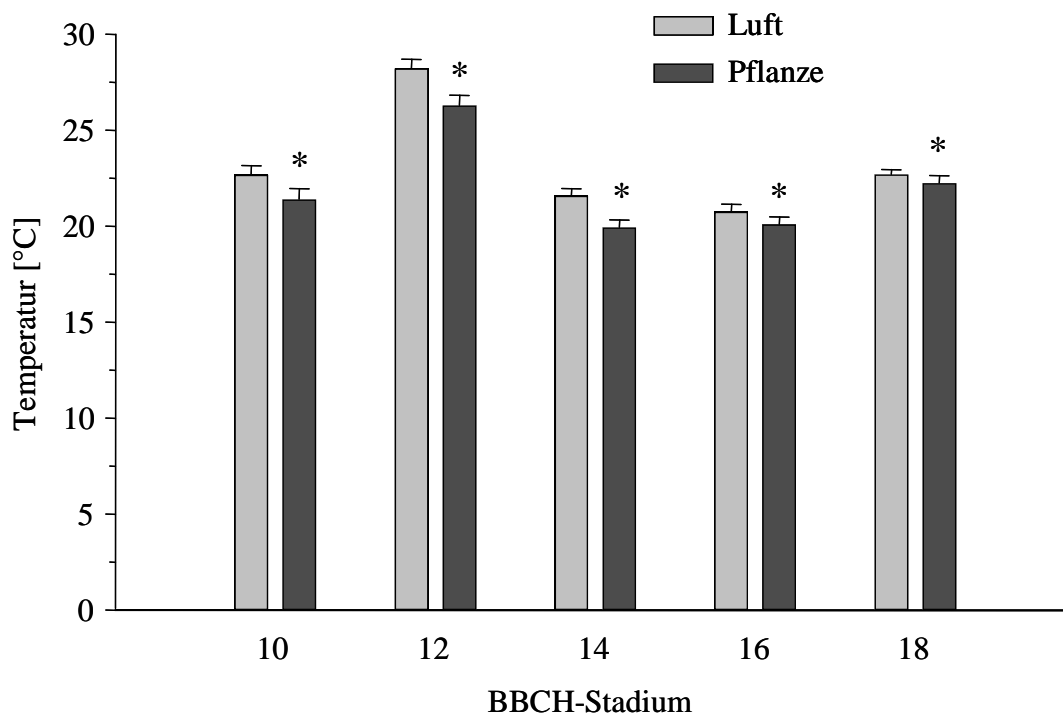


Abb. 3-1 Temperatur von Zuckerrübenpflanzen der Sorte Nematop und der Referenz für die Lufttemperatur zum jeweiligen Wachstumsstadium (* = Pflanzentemperatur unterscheidet sich signifikant von der Lufttemperatur nach t-Test; $p < 0,05$; T = Standardabweichung; $n = 6$).

3.1.2 Blattalter

Um zu untersuchen, warum die Temperatur von Zuckerrübenpflanzen während des Wachstums tendenziell zunahm, wurde zu jedem Wachstumsstadium die Temperatur der Blätter unterschiedlichen Alters erfasst.

Der Temperaturverlauf während des Wachstums, welcher für die ganze Zuckerrübenpflanze festgestellt wurde - größte Differenz zur Umgebungstemperatur zu BBCH 12, geringste zu BBCH 16 - spiegelte sich im Wachstum der einzelnen Blattpaare wider (Abb. 3-2). Die absolute Abkühlung der Blätter eines Alters gegenüber der Lufttemperatur fiel bei jeder Versuchswiederholung unterschiedlich aus. So waren die Keimblätter zu BBCH 12 mit einer Temperaturdifferenz von 2,01 K bei der ersten um 0,16 K kühler als das erste Blattpaar, beim zweiten Durchlauf waren sie dagegen mit einer Temperaturdifferenz von 0,94 K um 0,32 K signifikant wärmer. Bei allen Wiederholungen nahm die Abkühlung der neu entwickelten Blätter im Laufe des Wachstums im Verhältnis zur Umgebungstemperatur ab. Die Temperaturdifferenz des ersten Blattpaares betrug beispielsweise 1,85 K zu BBCH 12, zu BBCH 14 nur noch 1,39 K und zu BBCH 16 schließlich 0,68 K (Abb. 3-2).

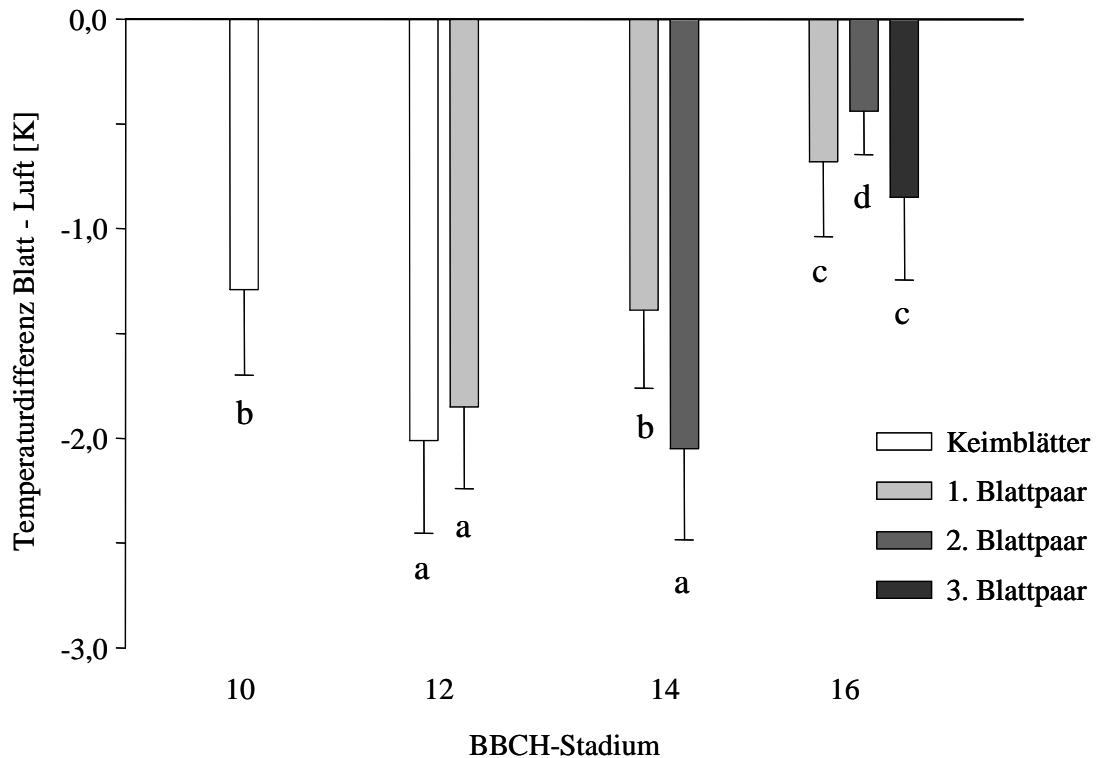


Abb. 3-2 Temperatur der Blätter von Zuckerrübenpflanzen der Sorte Nematop zum jeweiligen Wachstumsstadium dargestellt als Abweichung der Pflanzen- von der Referenztemperatur (verschiedene Buchstaben kennzeichnen einen signifikanten Unterschied zwischen den Temperaturdifferenzen eines Blattpaars zu den einzelnen BBCH-Stadien nach t-Test; $p < 0,05$; T = Standardabweichung; $n = 6$).

Um diese Temperaturzunahme zu erklären, wurde unter anderem die Anatomie der Pflanze untersucht. Durch die Höhe des Blattes relativ zu den anderen Blättern einer Pflanze konnte dessen Nähe zur Licht- beziehungsweise Wärmequelle beschrieben werden. Die Exposition zur Lichtquelle war durch die Blattstellung charakterisiert. Die relative Größe des Blattes im Verhältnis zu der anderer Blätter wirkte sich über die Fläche auf das Messergebnis der Temperatur der ganzen Pflanze aus. Auch die Helligkeit des Blattes und dessen Oberflächenstruktur, bestimmt durch die Blattkräuselung, veränderten sich während des Wachstums und hatten somit möglicherweise einen Einfluss auf die Temperatur.

Neu gebildete Blätter befanden sich unterhalb der Pflanzenmitte und ihre Fläche war minimal (Abb. 3-3, 14, A und B; Abb. 3-4, BBCH 16, C, 4. BP). Sie entwickelten sich stets senkrecht aus der Pflanzenbasis (Abb. 3-4, BBCH 16, A, 4. BP). Diese Blätter waren immer am intensivsten grün gefärbt, also die dunkelsten Blätter einer Pflanze. Ihre Kräuselung war am stärksten und nahm von da an stetig ab. Im weiteren Verlauf des Wachstums vergrößerte sich ihre Fläche und der Winkel der Blattachsen zur Mitte

der Pflanze, und somit die sichtbare Fläche des Messobjektes. Die Höhe der Blätter im Verhältnis zu den anderen Blättern war maximal, die Färbung etwas heller, aber immer noch sattgrün. Bevor die Blätter waagrecht standen, erreichte ihre Fläche das Maximum, sie waren voll entfaltet (Abb. 3-3, BBCH 16, A und B). Bei waagrechter Stellung befanden sich die Blätter etwa auf mittlerer Pflanzhöhe (Abb. 3-3, BBCH 18, A; Abb. 3-4, BBCH 16, A, 3. BP). Gegen Ende der Lebensdauer bogen sich die Blattspitzen zunehmend nach unten, die Fläche war in Relation zu den anderen Blättern wieder reduziert (Abb. 3-3, BBCH 22, A und B; Abb. 3-4, BBCH 16, C, 1. BP). Ihre Höhe war nun die geringste während ihres Wachstums und innerhalb der Pflanze. Mit der Seneszenz wich die grüne Farbe einer Gelbfärbung und eine Kräuselung war kaum mehr sichtbar. Je älter die Zuckerrübenpflanze wurde, desto langsamer vollzogen sich diese Veränderungen des Blattwachstums.

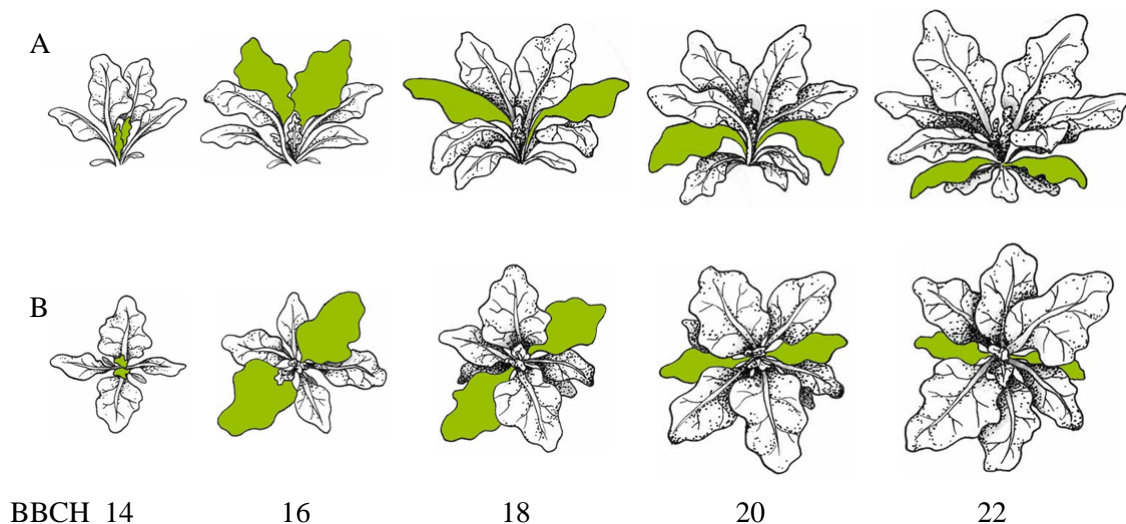


Abb. 3-3 Schematische Darstellung der Veränderung eines neu erscheinenden Zuckerrübenblattpaares während seines Wachstums zu den BBCH-Stadien 14 bis 22 bezüglich seiner Höhe innerhalb der Pflanze in der Seitenansicht (A) und bezüglich seiner Größe in der Aufsicht (B).

Der Einfluss der Blatthöhe auf die Temperatur wurde durch die Seitenansicht deutlich, bei deren Aufnahmen die Erde nicht abgedeckt worden war (Abb. 3-4, B). Bei allen Blättern, mit Ausnahme der jeweils jüngsten, nahm die Temperatur von unten nach oben zu. Dies war zum einen auf die Wärme durch die Beleuchtung von oben, zum anderen durch die Kühlung der Erde von unten zurückzuführen. Am Beispiel des Thermogramms der Zuckerrübenpflanze zu BBCH 16 wird deutlich, dass sowohl die zwei jüngsten als auch die zwei ältesten Blätter kühler waren als die mittleren Blattpaare (Abb. 3-4, BBCH 16, D).

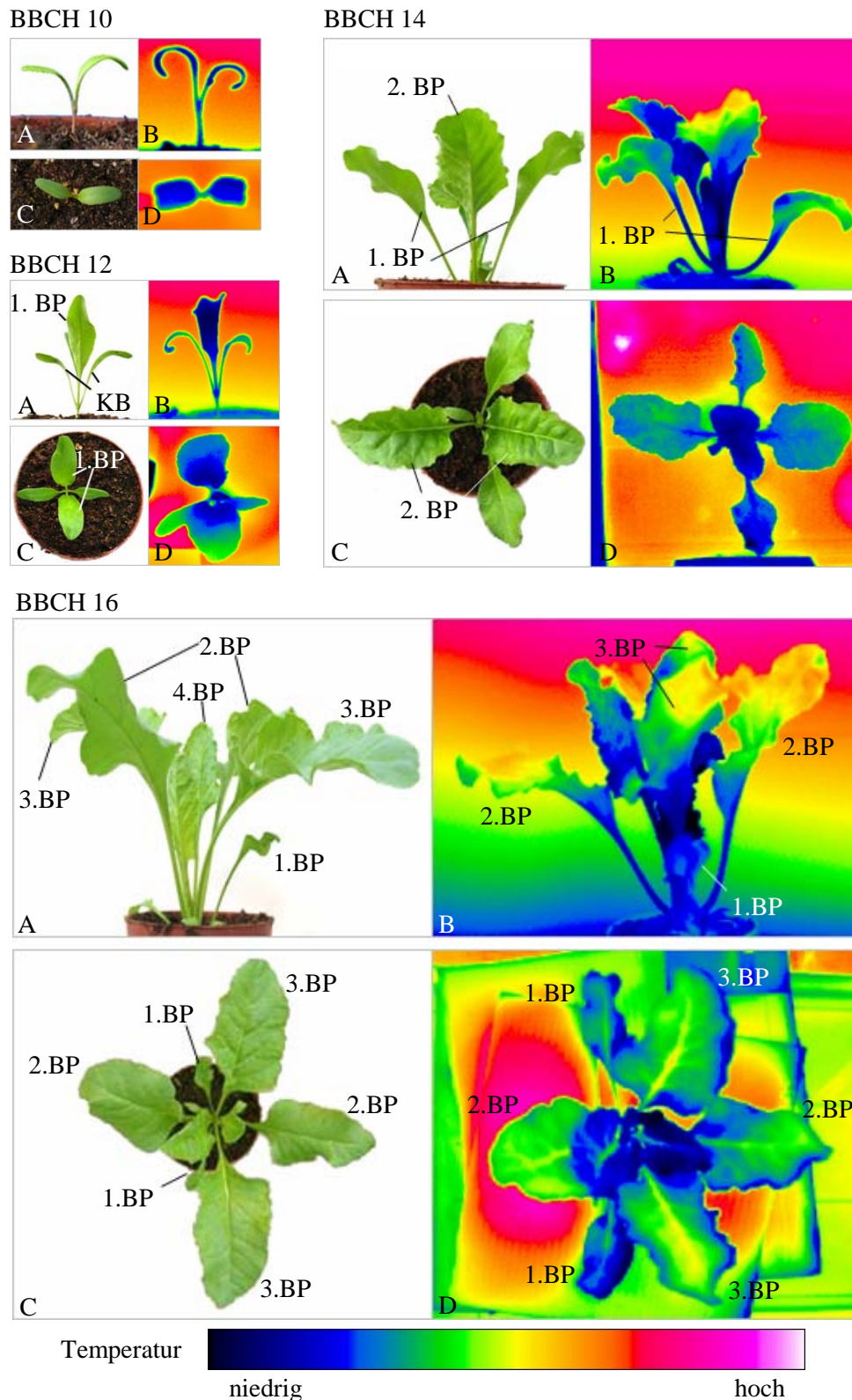


Abb. 3-4 Zuckerrübenpflanze im Wachstumsverlauf. Jedes BBCH-Stadium exemplarisch dargestellt als Lichtbild, Seitenansicht (A), Thermogramm, Seitenansicht (B), Lichtbild, Aufsicht (C), Thermogramm, Aufsicht (D).

(KB = Keimblatt, 1. BP = erstes Blattpaar/dem ersten Blattpaar zugehörig, 2. BP = zweites Blattpaar/dem zweiten Blattpaar zugehörig, 3. BP = drittes Blattpaar/dem dritten Blattpaar zugehörig). Die Thermogramme stehen in keinem direkten Verhältnis zueinander, die Farben können nicht aufeinander bezogen werden. Die Größenverhältnisse sind nicht maßstabsgetreu.

3.1.3 Morphologische Blattmerkmale

Um zu klären, ob die Blattemperatur von Zuckerrüben in einem Zusammenhang mit morphologischen Blattmerkmalen steht oder davon abhängig ist, wurden diese im Einzelnen untersucht. Da die Blattemperatur der Pflanzen über Thermogramme von deren Aufsicht ermittelt wurde, wurde mit den Blattoberseiten der Zuckerrüben gearbeitet. Untersuchte Sorten waren Nematop, Syncro und Philippa.

Anzahl Blatthaare

Auf den untersuchten Blattoberflächen waren keine Haare vorhanden.

Anzahl Stomata

Die Zuckerrüben besaßen die für Dikotyle typischen Stomata, bestehend aus der Pore und zwei sie umgebenden nierenförmigen Schließzellen. Die Stomata waren regelmäßig über die Blattoberfläche verteilt. Ihre durchschnittliche Anzahl auf den Oberseiten aller Blätter einer Zuckerrübenpflanze unterschied sich statistisch nicht zwischen den Wachstumsstadien, unabhängig von der Sorte. Bei Philippa betrug sie zwischen 8032/cm² Blattfläche zu BBCH 12 bis 10505/cm² Blattfläche zu BBCH 18 (Abb. 3-5).

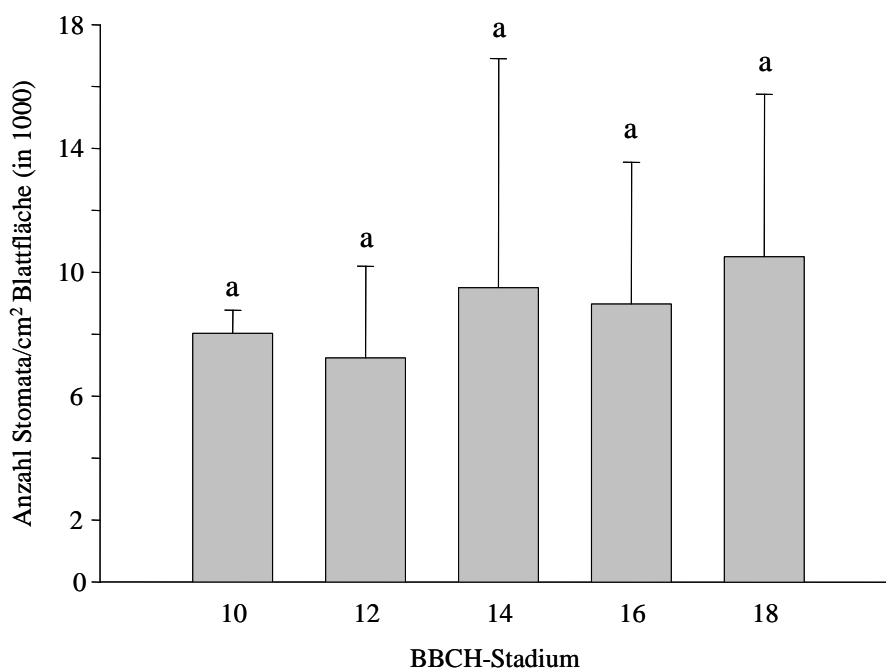


Abb. 3-5 Durchschnittliche Anzahl der Stomata pro cm² Blattfläche auf den Oberseiten aller Blätter von Zuckerrübenpflanzen der Sorte Philippa zu den Wachstumsstadien BBCH 10 bis BBCH 18 (verschiedene Buchstaben kennzeichnen einen signifikanten Unterschied nach t-Test; $p < 0,05$; T = Standardabweichung; $n = 16$).

Bei Erscheinen eines neuen Blattes waren in der Regel deutlich mehr, zum Teil doppelt so viele Stomata pro cm² Blattfläche vorhanden, als im weiteren Wachstumsverlauf (Tab. 3-1; Abb. 3-6; Abb. 3-7, A bis C).

Tab. 3-1 Anzahl der Stomata pro cm² Blattfläche auf der Oberseite von Zuckerrübenblättern der Sorte Philippa während des Wachstums (verschiedene Buchstaben für ein Blattalter kennzeichnen einen signifikanten Unterschied zwischen den Wachstumsstadien nach t-Test; $p < 0,05$; $n = 16$).

	BBCH-Stadium				
	10	12	14	16	18
Keimblätter	8032 a	4575 b	3564 c		
1. Blattpaar		9894 a	5585 b	3846 c	5266 bc
2. Blattpaar			19362 a	8883 b	8404 b
3. Blattpaar				14202 a	10160 b

Derselbe Effekt bestand auch zwischen den Blättern einer Pflanze zu einem Wachstumsstadium. Das älteste Blattpaar hatte stets die geringste Anzahl an Stomata pro cm² Blattfläche, das jüngste Blattpaar die höchste (Abb. 3-6; Abb. 3-7, D - F). Die Unterschiede zwischen den Blättern verschiedenen Alters waren statistisch signifikant.

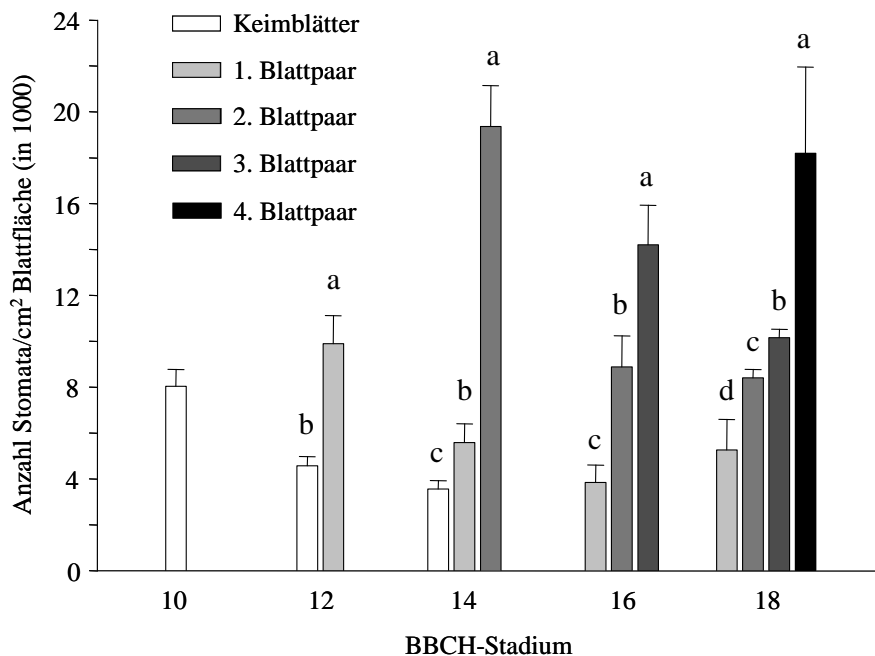


Abb. 3-6 Durchschnittliche Anzahl der Stomata pro cm² auf der Oberseite von Zuckerrübenblättern der Sorte Philippa zu den Wachstumsstadien BBCH 10 bis BBCH 18 (verschiedene Buchstaben kennzeichnen einen signifikanten Unterschied innerhalb eines BBCH-Stadiums nach t-Test; $p < 0,05$; T = Standardabweichung; $n = 16$).

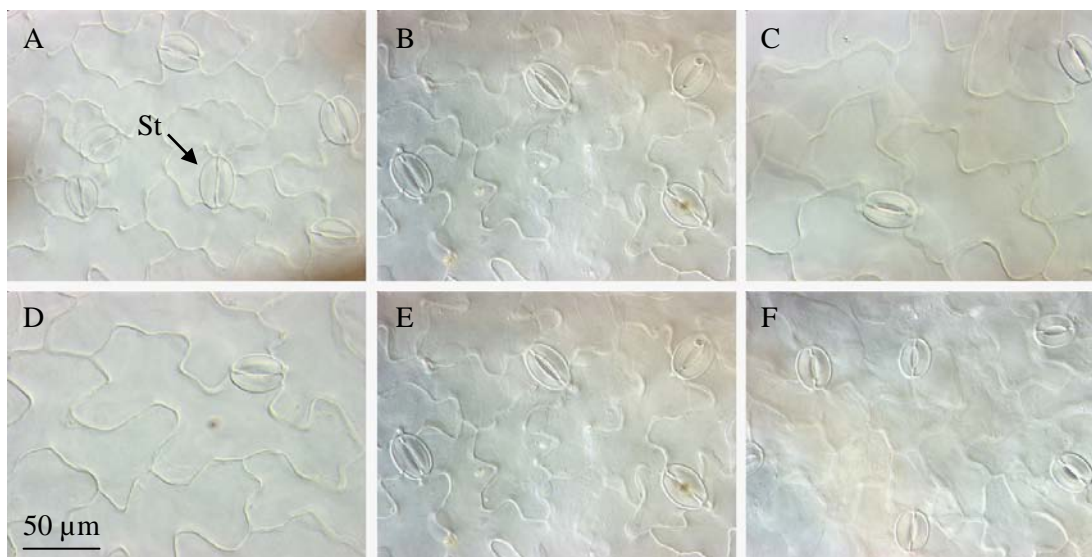


Abb. 3-7 Stomata (St) auf der Blattoberseite des zweiten Blattpaares zu den Wachstumsstadien BBCH 14 (A), BBCH 16 (B) und BBCH 18 (C) sowie zu BBCH 16 auf dem ersten (D), zweiten (E) und dritten (F) Blattpaar von Zuckerrüben der Sorte Nematop. Auflichtmikroskopie (Interferenz-Kontrast), 400x Vergrößerung.

Größe der Poren von Stomata

Auch die durchschnittliche Größe der Poren von Stomata auf den Oberseiten aller Blätter einer Pflanze war zwischen den Wachstumsstadien nicht signifikant unterschiedlich. Dies war bei den Sorten Nematop und Philippa der Fall. Durchschnittlich betrug die Fläche einer Pore bei der Sorte Philippa zwischen $84,3 \mu\text{m}^2$ zu BBCH 10 und $110,8 \mu\text{m}^2$ zu BBCH 14 (Abb. 3-8).

Betrachtete man die einzelnen Blätter einer Zuckerrübenpflanze, so nahm die Größe der Poren im Laufe des Alters um etwa das Doppelte zu (Tab. 3-2; Abb. 3-9, Abb. 3-10, A - C). Die Zunahme war zwischen dem Wachstumsstadium, an welchem das Blatt erschien, bis zum darauffolgenden Wachstumsstadium am größten und wurde mit weiteren Stadien geringer oder stagnierte (Tab. 3-2).

Zu jedem Wachstumsstadium hatten die Stomata des ältesten Blattpaares einer Pflanze die größten Poren (Abb. 3-10, D - F). Je älter die Pflanze wurde, desto geringer wurden die Größenunterschiede zwischen den Blattaltern. Es ließ sich weiterhin feststellen, dass auf den gleichaltrigen Blättern der jeweiligen Wachstumsstadien die Poren eine ähnliche Größe aufwiesen. Zum Beispiel betrug die Fläche der Poren auf dem jeweils jüngsten Blatt zu BBCH 14 (= 2. Blattpaar), zu BBCH 16 (= 3. Blattpaar) und zu BBCH 18 (= 4. Blattpaar) etwa $60 \mu\text{m}^2$.

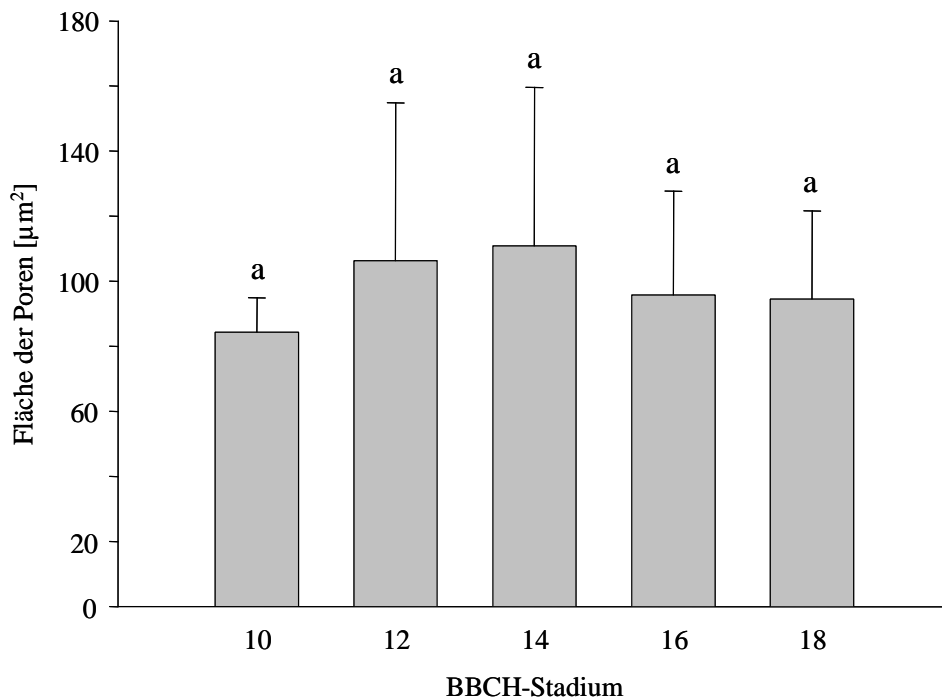


Abb. 3-8 Durchschnittliche Größe der Poren von Stomata auf den Oberseiten aller Blätter von Zuckerrübenpflanzen der Sorte Philippa zu den Wachstumsstadien BBCH 10 bis BBCH 18 (verschiedene Buchstaben kennzeichnen einen signifikanten Unterschied nach t-Test; $p < 0,05$; T = Standardabweichung; $n = 16$).

Tab. 3-2 Größe der Poren von Stomata in μm^2 auf der Oberseite von Zuckerrübenblättern der Sorte Philippa während des Wachstums (verschiedene Buchstaben für ein Blattalter kennzeichnen einen signifikanten Unterschied zwischen den Wachstumsstadien nach t-Test; $p < 0,05$; $n = 16$).

	BBCH-Stadium				
	10	12	14	16	18
Keimblätter	84,3 a	151,6 b	167,0 c		
1. Blattpaar		61,0 a	111,6 b	132,0 c	119,2 bc
2. Blattpaar			54,0 a	93,4 b	110,0 b
3. Blattpaar				61,8 a	93,2 b

Je älter diese Blätter einer Pflanze waren, desto größer waren dabei die Unterschiede zu gleichaltrigen Blättern in einem anderen Wachstumsstadium. Während also die Größe der Poren von Stomata des jüngsten Blattpaares eines jeden Stadiums nur um maximal $4,0 \mu\text{m}$ vom Durchschnittswert abwich, so waren es beim ältesten Blattpaar $24,5 \mu\text{m}$.

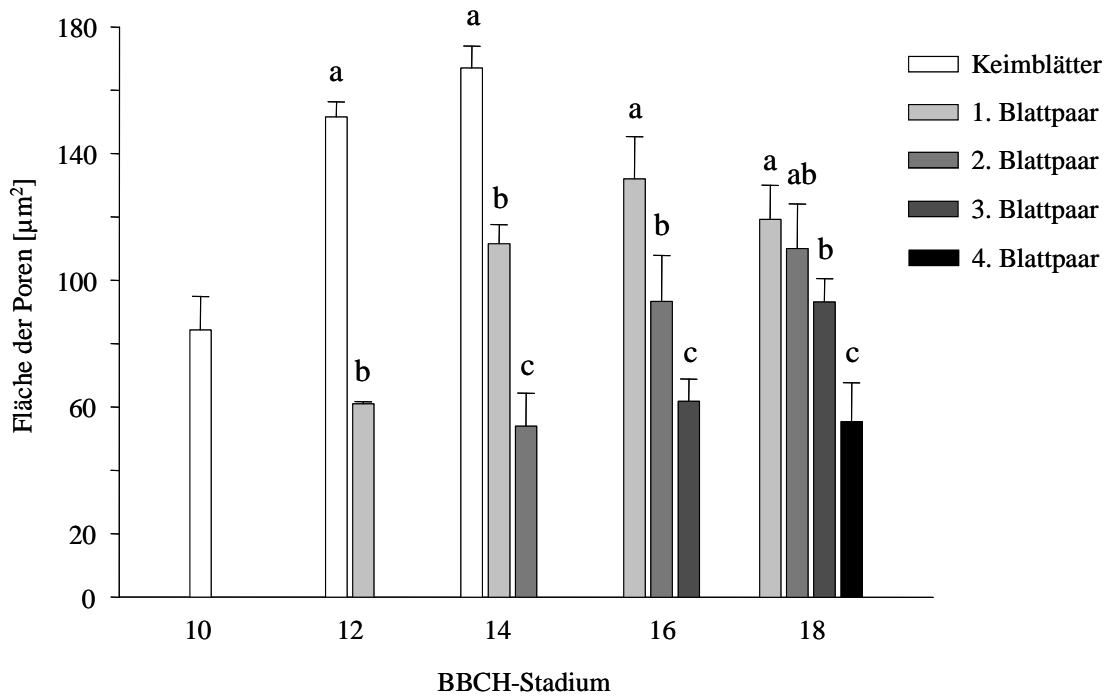


Abb. 3-9 Durchschnittliche Größe der Poren von Stomata auf der Oberseite von Zuckerrübenblättern der Sorte Philippa zu den Wachstumsstadien BBCH 10 bis BBCH 18 (verschiedene Buchstaben kennzeichnen einen signifikanten Unterschied innerhalb eines BBCH-Stadiums nach t-Test; $p < 0,05$; T = Standardabweichung; $n = 16$).

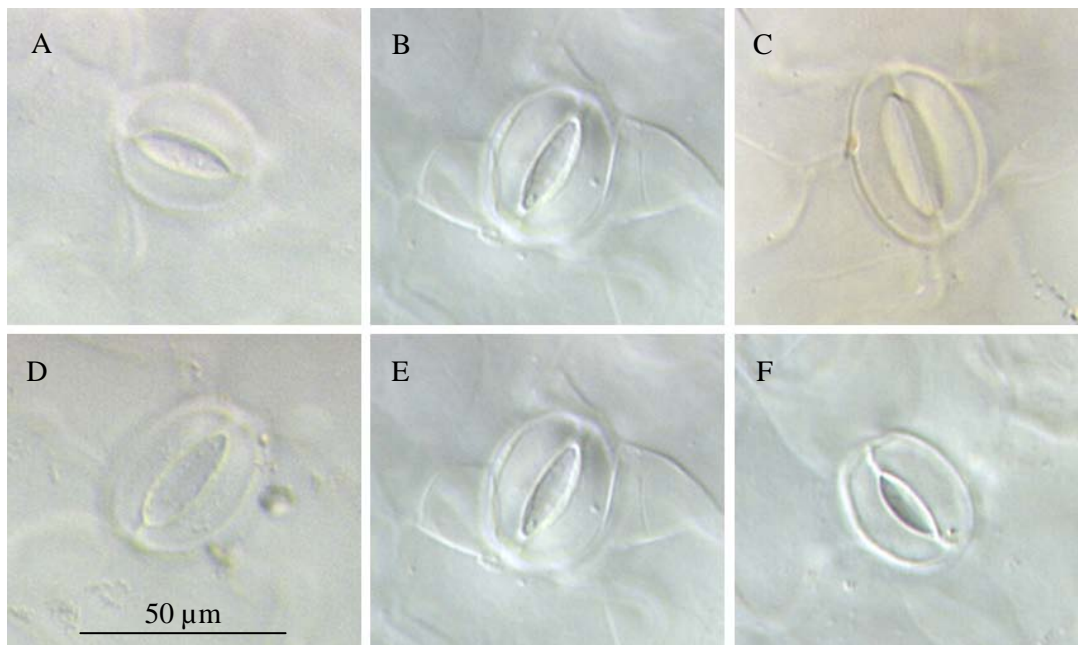


Abb. 3-10 Stoma auf der Oberseite des zweiten Blattpaares zu den Wachstumsstadien BBCH 14 (A), BBCH 16 (B) und BBCH 18 (C) sowie zu BBCH 16 auf dem ersten (D), zweiten (E) und dritten (F) Blattpaar der Sorte Nematop; Auflichtmikroskopie (Interferenz-Kontrast), 400x Vergrößerung.

3.1.4 Wassergehalt der Blätter

Bei den Sorten Nematop, Syncro und Philippa betrug der durchschnittliche Wassergehalt der Blätter im Keimblattstadium 95 %. Dieser nahm im Laufe des Wachstums bis zum Erreichen von BBCH 18 kontinuierlich auf etwa 90 % ab (Abb. 3-11). Bei allen Sorten unterschied sich dabei zumindest der Wassergehalt der ersten beiden gemessenen BBCH-Stadien signifikant von dem der letzten beiden.

Zu jedem Wachstumsstadium nahm der Wassergehalt der Blätter einer Pflanze mit dem Blattalter zu (Abb. 3-12). Das jüngste Blatt hatte zu allen Wachstumsstadien den geringsten Wassergehalt und unterschied sich zum ältesten um etwa 1%. Dies konnte bei fast allen Wachstumsstadien gezeigt werden. Der Unterschied zum nächst älteren Blatt war dabei nicht immer statistisch signifikant.

Vor allem bei den Keimblättern, dem ersten und dritten Blattpaar war der Wassergehalt zu Beginn des Wachstums stets höher als gegen Ende ihres Wachstums. Durchschnittlich war er um etwa 1 % reduziert. Bei Nematop war der Wassergehalt nur beim Keimblatt zwischen BBCH 10 und BBCH 14 signifikant unterschiedlich. Nur bei der Sorte Philippa stieg der Wassergehalt der Keimblätter und des ersten Blattpaares bis zu BBCH 14 an. Beim zweiten Blattpaar war dagegen kein Trend erkennbar.

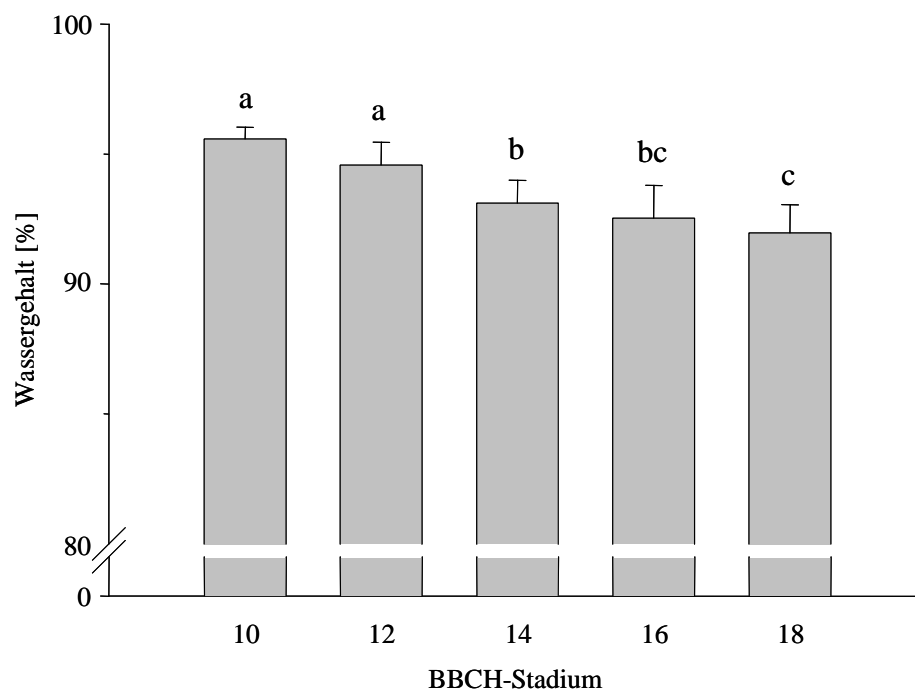


Abb. 3-11 Durchschnittlicher Wassergehalt der Blätter von Zuckerrübenpflanzen der Sorte Nematop während des Wachstums (verschiedene Buchstaben kennzeichnen einen signifikanten Unterschied nach t-Test; $p < 0,05$; T = Standardabweichung; $n = 4$).

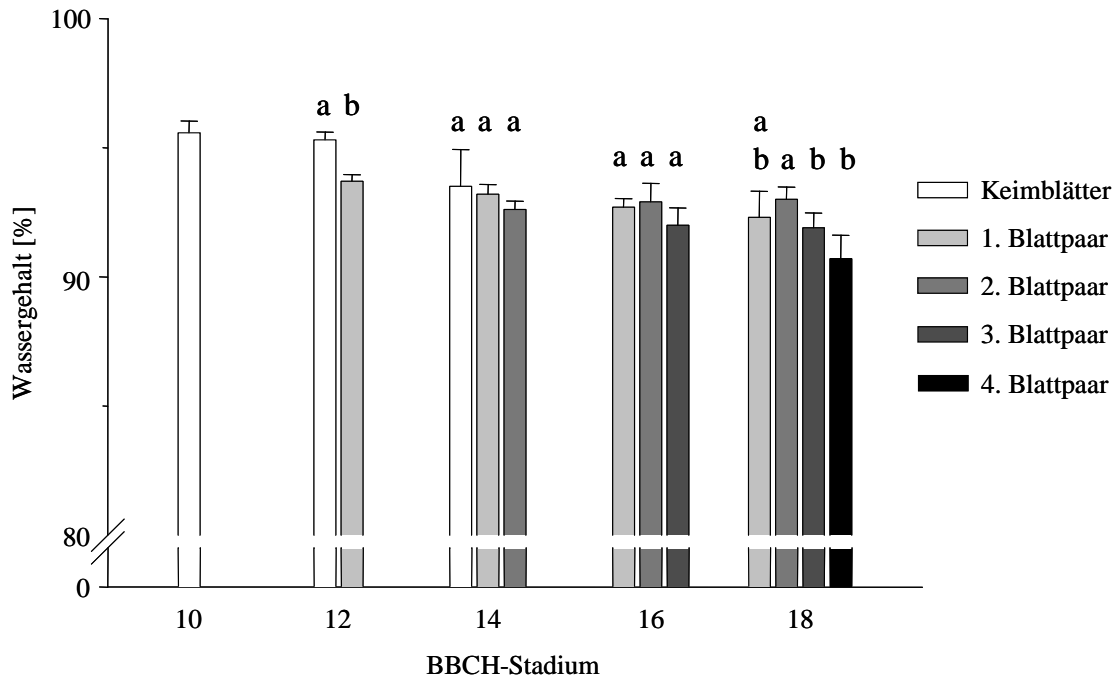


Abb. 3-12 Durchschnittlicher Wassergehalt der Blätter von Zuckerrübenpflanzen der Sorte Nematop zu den Wachstumsstadien BBCH 10 bis BBCH 18 (verschiedene Buchstaben kennzeichnen einen signifikanten Unterschied innerhalb eines BBCH-Stadiums nach t-Test; $p < 0,05$; T = Standardfehler; $n = 4$).

3.1.5 Abiotische Stressfaktoren

Pflanzen sind in ihrer natürlichen Umgebung verschiedenen Stressfaktoren ausgesetzt. Diese verändern den physiologischen und den physischen Zustand der Pflanzen. Zwei in der Landwirtschaft regelmäßig auftretende Stressfaktoren sind Wassermangel und Staunässe. Der Effekt beider Faktoren auf die Temperatur von Zuckerrübenpflanzen sollte im Folgenden untersucht werden.

3.1.5.1 Wassermangel

Ausgangsmaterial für die Versuche zum Wassermangel waren Zuckerrübenpflanzen im BBCH-Stadium 14. Die Pflanzen der Stressvariante wurden bis zum Erreichen einer starken Blattwelke am fünften Tag nach Versuchsbeginn nicht bewässert und ab diesem Zeitpunkt solange mit Wasser versorgt, bis die Blätter wieder turgeszent waren.

In der Regel konnten die ersten Symptome erst ab dem vierten beziehungsweise fünften Tag nach Versuchsbeginn an einigen Pflanzen der Stressvariante beobachtet

werden. Vor allem das erste und zweite Blatt verloren an Turgeszenz (Abb. 3-13, Tag 5, Seitenansicht) und waren von weniger kräftiger Grünfärbung. Während die stressfreien Pflanzen am fünften Tag ihr drittes Blattpaar schon fast vollständig entfaltet hatten, waren die Pflanzen unter Trockenstress nicht über BBCH 14 hinaus gewachsen. Knapp die Hälfte der stressfreien Pflanzen befand sich am Ende des Versuches in BBCH 16, die Pflanzen, welche unter Wassermangel gelitten hatten, dagegen nur in BBCH 15. Die Pflanzen unterschieden sich zudem darin, dass die Blätter der stressfreien Pflanzen größer waren (Abb. 3-13, Tag 11, Aufsicht).

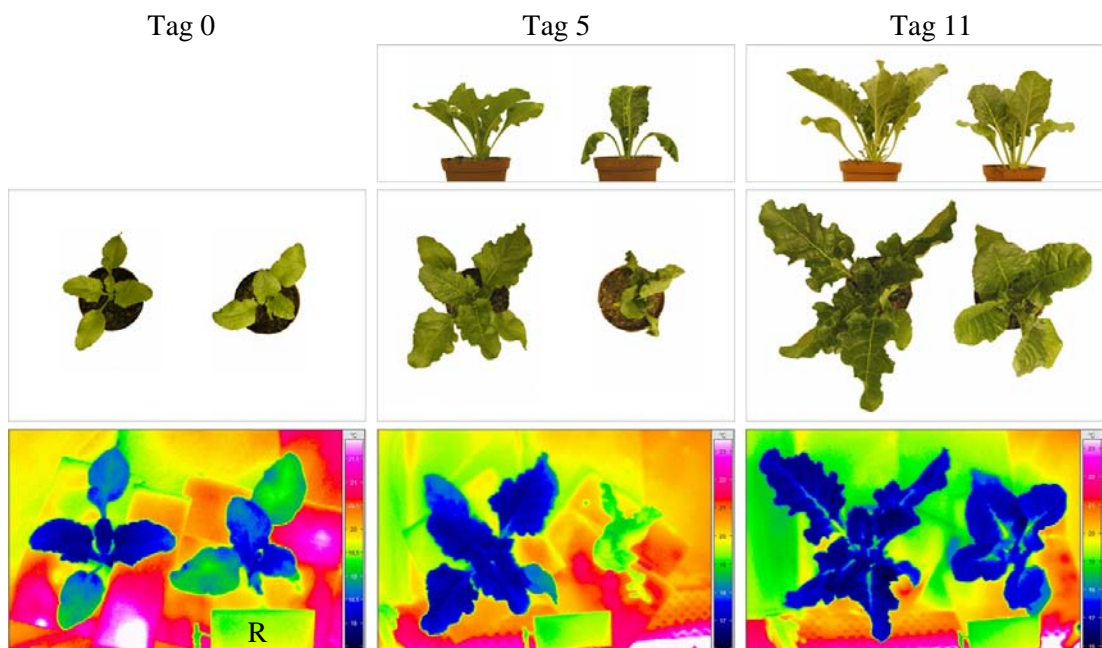


Abb. 3-13 Einfluss von Wassermangel auf Zuckerrübenpflanzen der Sorte Nematop: Stressfreie Variante (links) und Wassermangelvariante (rechts) vor Versuchsbeginn (Tag 0), zum Zeitpunkt des maximalen Stresses (Tag 5) und nach Erreichen des Ausgangszustandes am Ende des Versuches (Tag 11). 1. und 2. Reihe: Lichtbilder, 3. Reihe: Thermogramme Aufsicht (R: Referenz für die Lufttemperatur).

Direkt nach Induktion des Wassermangels stieg die Temperatur im Verhältnis zur Temperatur der stressfreien Pflanzen allmählich an und näherte sich dabei der Lufttemperatur an (Abb. 3-14). Zum Zeitpunkt des maximalen Stresses betrug die Temperaturdifferenz zwischen den Pflanzen ohne und mit Wassermangel 1,47 K, der Unterschied der Stressvariante zur Luft war dagegen mit 0,06 K nahezu Null. Im Thermogramm wird dies anhand der gleichen Farbe von Stressvariante und Referenztemperatur deutlich (Abb. 3-13, Tag 5). Nur zu diesem Zeitpunkt war der Unterschied zwischen den Temperaturen der Behandlungen signifikant. Bereits sechs Stunden nach

der ersten Bewässerung nahm die Temperatur der Stressvariante wieder ab. Die Pflanzen erholten sich noch am selben Tag und waren nicht mehr welk. Die Temperaturabnahme setzte sich kontinuierlich fort. Am neunten Tag nach Versuchsbeginn beziehungsweise dem dritten Tag nach Aufheben des Stressfaktors war der Temperaturunterschied zwischen der stressfreien Variante und derjenigen unter Stress mit 0,15 K minimal und wieder etwa so groß wie zu Beginn des Experiments. Bei allen drei Wiederholungen lag die Temperatur der Pflanzen, die unter Wassermangel gelitten hatten, am letzten Tag zwischen 0,1 und 0,65 K unter der Temperatur der Pflanzen mit bedarfsgerechter Wasserversorgung.

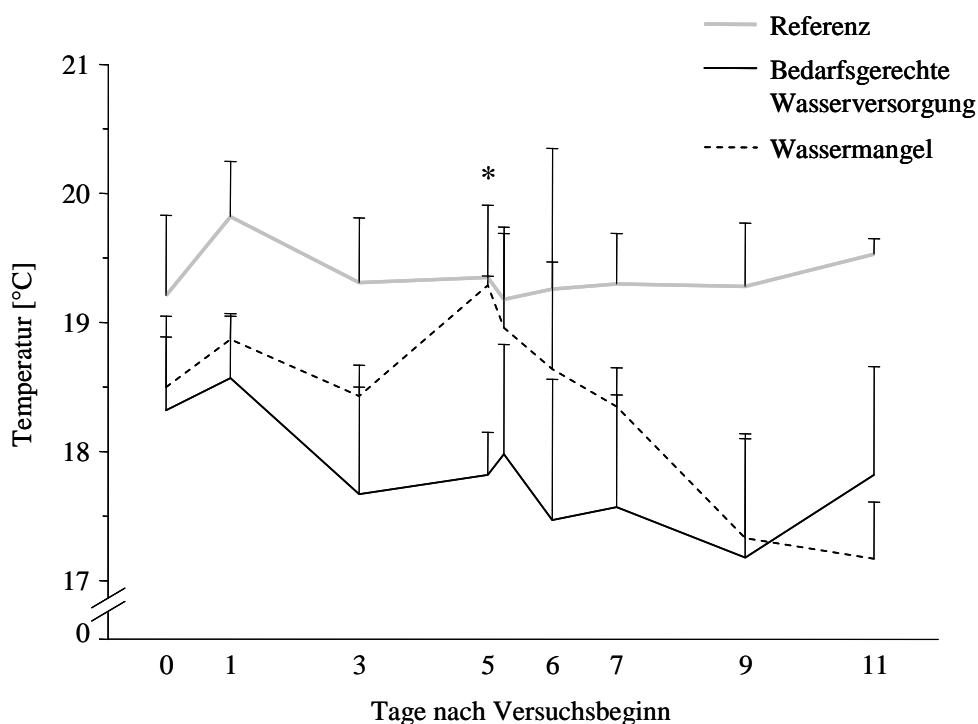


Abb. 3-14 Temperatur von Zuckerrübenpflanzen der Sorte Nematop unter Wassermangel, Bewässerung nach Bedarf und einer Referenz für die Lufttemperatur. Induktion von Wassermangel nach der Messung an Tag 0, bedarfsgerechte Bewässerung nach der Messung an Tag 5 (* = signifikanter Unterschied zwischen der stressfreien Variante und der Variante Wassermangel nach t-Test; $p < 0,05$; T = Standardabweichung; $n = 5$).

3.1.5.2 Staunässe

Um die Auswirkungen von Staunässe auf die Temperatur von Zuckerrübenpflanzen festzustellen, wurden die Messungen mit Pflanzenmaterial zu BBCH 14 begonnen. Nach der Messung am ersten Tag nach Versuchsbeginn wurden die Pflanzen der Stressvariante stark bewässert und zusätzlich der gesamte Wurzelraum ab etwa 2 cm

unterhalb des Vegetationskegels unter Wasser gesetzt. Nach der Messung am fünften Tag wurden die Pflanzen aus dem Wasser genommen und erst nach Verschwinden der Stresssymptome wieder normal bewässert.

Im Gegensatz zur Reaktion auf Wassermangel begannen das erste und zweite Blatt der Pflanzen unter Staunässe bereits am dritten Tag nach Versuchsbeginn zu welken. Zum Zeitpunkt des maximalen Stresses, am Tag fünf, war mindestens das erste und zweite, in einigen Fällen auch das dritte und vierte Blatt welk und chlorotisch (Abb. 3-15, Tag 5). Während die Chlorose des ersten und zweiten Blattes zum Ende des Versuches auch bei der stressfreien Variante als Folge der normalen Blattseneszenz auftrat, beschränkte sich eine leichte Vergilbung des dritten und vierten Blattes nur auf die Pflanzen unter Staunässe. Zwischen dem siebten und neunten Tag nach Versuchsbeginn verschwand die Welke der Stressvariante. Am elften Tag hatten die Pflanzen unter bedarfsgerechter Bewässerung weitere sechs voll und zwei teilweise entfaltete Blätter, die bei den Pflanzen, welche unter zuviel Wasser gelitten hatten, noch kaum ausgebildet waren. Typisch war zudem, dass alle Blätter der Stressvariante, vor allem aber die ersten und zweiten, aufrechter standen als bei der stressfreien Variante (Abb. 3-15, Tag 11, Seitenansicht).

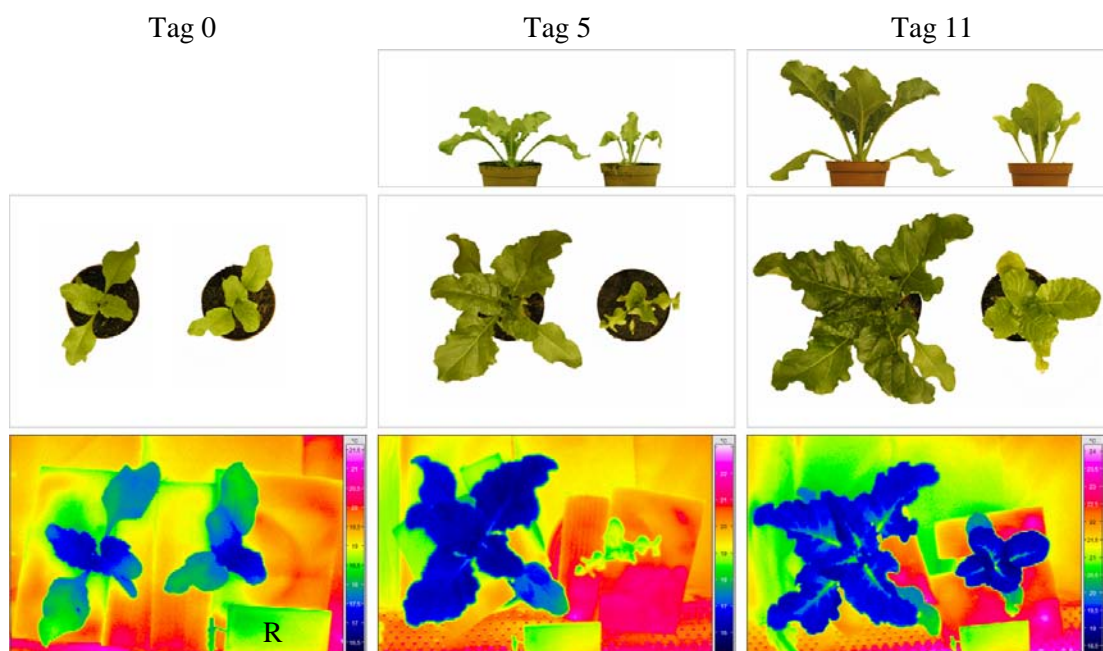


Abb. 3-15 Einfluss von Staunässe auf Zuckerrübenpflanzen der Sorte Nematop: Stressfreie Variante (links) und Staunässevariante (rechts) vor Versuchsbeginn (Tag 0), zum Zeitpunkt des maximalen Stresses (Tag 5) und nach Erreichen des Ausgangszustands am Ende des Versuches (Tag 11). 1. und 2. Reihe: Lichtbilder, 3. Reihe: Thermogramme Aufsicht (R: Referenz für die Lufttemperatur).

Bereits einen Tag nach Stressinduktion überstieg die Temperatur der Stressvariante die der stressfreien um fast ein Grad Celsius (Abb. 3-16). Diese Differenz blieb über die gesamte Dauer des Versuches erhalten und verstärkte sich sogar noch über den fünften Tag hinaus, an welchem der Stressfaktor wieder reduziert worden war. Wie beim Versuch zum Wassermangel zeigte sich die Stressreaktion dadurch, dass sich die Temperatur der Stressvariante an die der Lufttemperatur anglich. An Tag fünf war die Differenz mit -0,09 K am geringsten, im Thermogramm anhand der gleichen Farbe der Variante und der Referenz erkennbar (Abb. 3-15, Tag 5). Der größte Temperaturunterschied von 1,58 K zwischen den Varianten bestand in der Regel zwischen Tag sechs und Tag neun, auch wenn sich gleichzeitig die Temperatur der Pflanzen unter Staunässe im Verhältnis zur Referenztemperatur wieder verringerte. Am letzten Versuchstag hatte sich die Temperatur der Stressvariante zwar noch nicht vollständig an die der stressfreien Variante angepasst, aber der Unterschied zwischen beiden war nicht mehr signifikant.

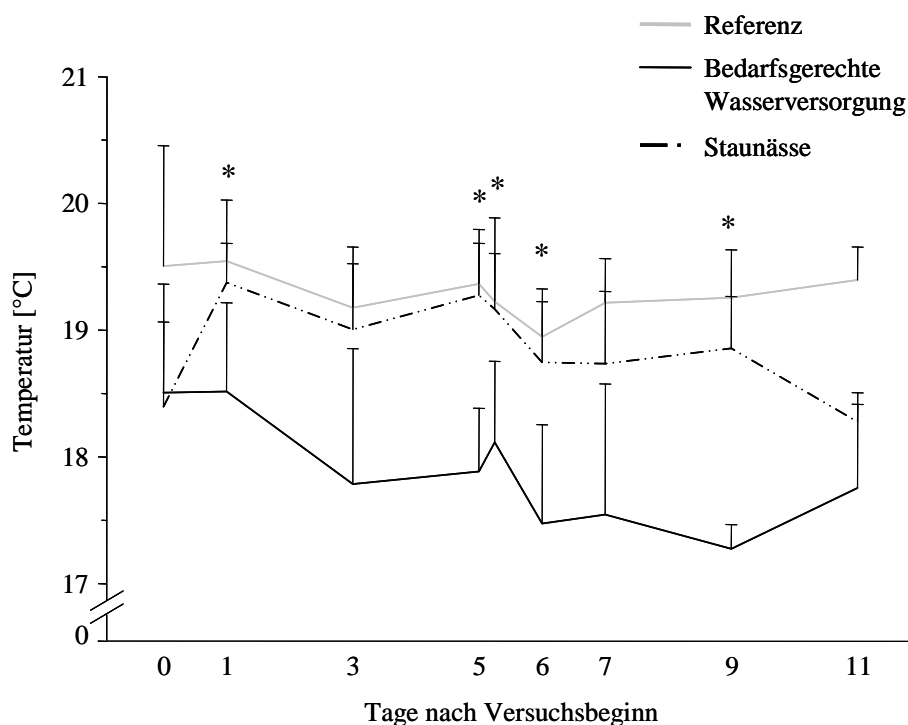


Abb. 3-16 Temperatur von Zuckerrübenpflanzen der Sorte Nematop unter Staunässe, Bewässerung nach Bedarf und einer Referenz für die Lufttemperatur. Induktion von Staunässe nach der Messung an Tag 0, bedarfsgerechte Bewässerung nach der Messung an Tag 5 (* = signifikanter Unterschied zwischen der stressfreien Variante und der Variante Staunässe nach t-Test; $p < 0,05$; T = Standardabweichung; $n = 5$).

3.2 Sensorische Erfassung des Pathogenbefalls

Nach einer erfolgreichen Infektion ist der Krankheitsverlauf zum einen durch die Erregerentwicklung innerhalb des Blattgewebes des Wirtes gekennzeichnet, zum anderen ist er mit dem Erscheinen von Symptomen verbunden. Die Pilze *Cercospora beticola*, *Erysiphe betae* und *Uromyces betae* wurden im Blattgewebe lichtmikroskopisch und auf der Wirtsoberfläche stereomikroskopisch untersucht. Die Blattregion, die durch das jeweilige Pathogen infiziert worden war und die sich dort entwickelnden Symptome wurden zudem während des Krankheitsverlaufes mit einer Video-, Thermographie- und Chlorophyllfluoreszenzkamera aufgenommen. Dies sollte Aufschluss darüber geben, welchen Einfluss das jeweilige Pathogen auf die Oberflächentemperatur und auf die photosynthetische Effektivität des Blattgewebes hat. Außerdem sollte festgestellt werden, ob durch diese Sensoren ein Befall vor dem Erscheinen von visuell sichtbaren Symptomen nachgewiesen und die drei Krankheiten unterschieden werden konnten.

3.2.1 *Cercospora*-Blattfleckenkrankheit

3.2.1.1 Befallsverlauf

C. beticola, der Erreger der *Cercospora*-Blattfleckenkrankheit, besaß 50 bis 200 µm lange, etwa 3 µm breite und mehrfach septierte Konidien (Abb. 3-17, A). An einem Ende waren sie stumpf, zum anderen Ende hin spitz zulaufend. Innerhalb der ersten drei Tage nach der Inokulation bildeten sowohl die Konidien als auch Myzelreste Keimschläuche mit einem Durchmesser von etwa 1 µm. Diese konnten einen Tag nach Inokulation eine Länge von 400 µm erreichen. Es wurden bis zu fünf Keimschläuche gleichzeitig sowohl an den Enden als auch im mittleren Teil der Sporen gebildet (Abb. 3-17, B). Die Keimschläuche waren mitunter verzweigt (Abb. 3-17, C). Der Infektionsprozess konnte nicht beobachtet werden.

Ab etwa dem fünften Tag nach Inokulation bis über das Erscheinen erster Symptome hinaus fand ein starkes interzelluläres Wachstum des Pilzes im Pallisaden- und Schwammparenchym des Wirtsgewebes statt. Die Hyphen waren deutlich dicker und stärker verzweigt als die Keimschläuche (Abb. 3-17, D). An einigen Hyphen konnten feine, kurze, häkchenförmige Verzweigungen beobachtet werden, welche in die Wirtszellen einzudringen schienen (Abb. 3-17, E). Das Pilzwachstum war so stark,

dass sich unter den stomatären Höhlen Hyphenknäuel bildeten (Abb. 3-17, F, G).

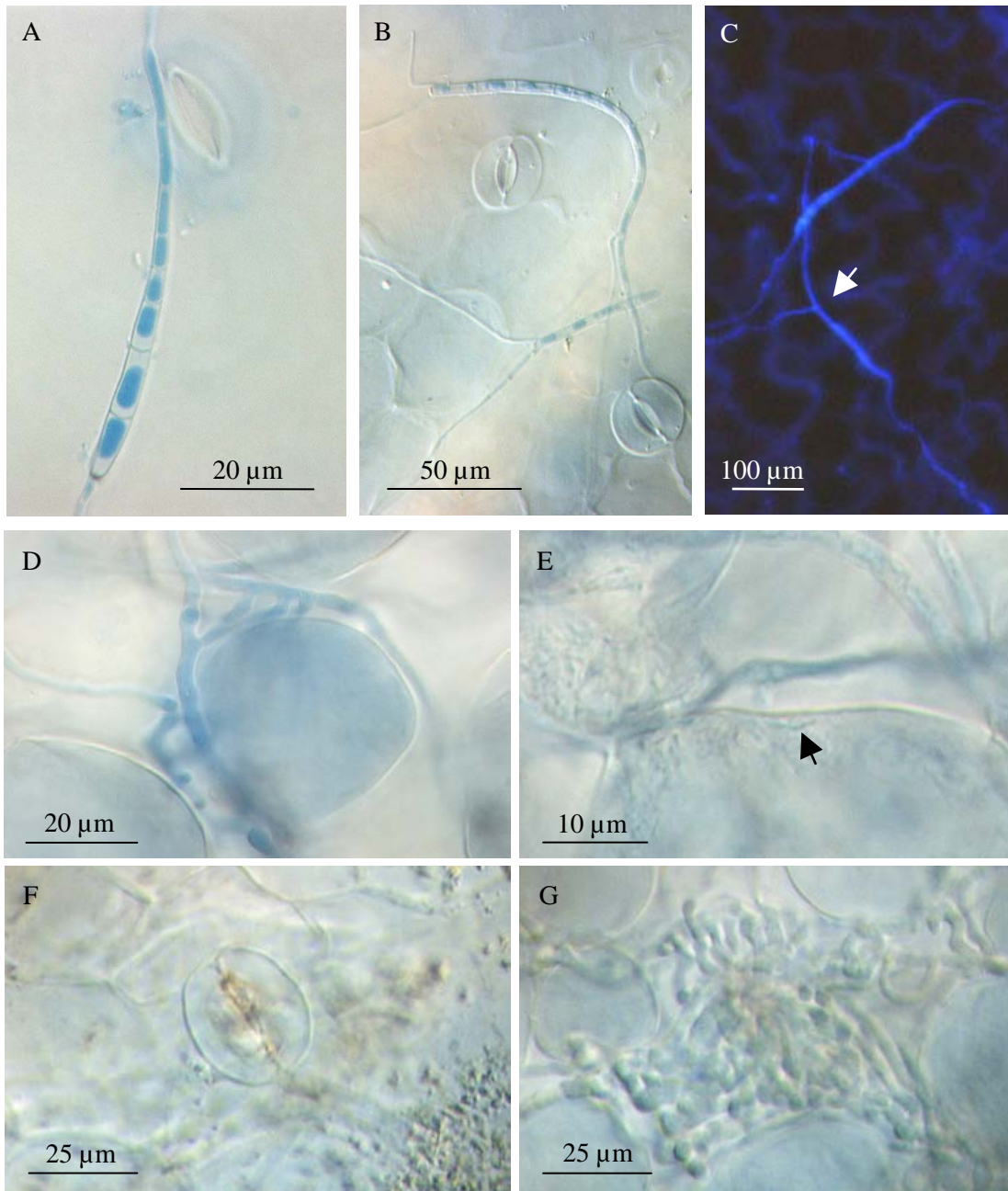


Abb. 3-17 *Cercospora beticola* auf der Blattoberseite von Zuckerrüben der Sorte Nematop: Mehrfach septierte Spore 1 dpI (A, 1000x), an den Enden und der Seite auskeimende Spore und Myzelfragment 1 dpI (B, 400x), Spore und Myzelfragment mit verzweigtem Keimschlauch 5 dpI (▷, C, 200x), Interzelluläres Wachstum (D, 1000x), häkchenförmige Verzweigung (▶, E, 1000x) und Bildung von Hyphenknäuel unter dem Stoma (F, 1000x) in der stomatären Höhle (G, 1000x) (A, B, D - G: Durchlichtmikroskopie mit Färbung nach Bruzzese, C: Fluoreszenzmikroskopie).

Zwischen dem sechsten und zehnten Tag nach der Inokulation wurden die ersten Symptome des Pathogenbefalls auf der Blattoberfläche in Form von 1 bis 2 mm

großen, kreisförmigen und dunkel verfärbten Vertiefungen sichtbar (Abb. 3-18, A). Diese vergrößerten sich, und es bildete sich um das Zentrum ein weiterer Ring (Abb. 3-18, B). Im weiteren Verlauf der Symptomentwicklung verfärbten sich das Zentrum beige und der äußere Ring dunkelbraun oder rötlich (Abb. 3-18, C). Der Blattfleck war deutlich vom gesunden Blattgewebe abgegrenzt. Bei hoher relativer Luftfeuchtigkeit bildete sich in der Mitte der Blattflecken ein weiß-grauer Belag (Abb. 3-18, D, F). Dieser bestand aus dunklen Konidienträgern, welche büschelweise hyaline Konidien trugen (Abb. 3-18, E). Bei einer hohen Inokulumdichte und fortgeschrittenem Wachstum verliefen die Blattflecken ineinander (Abb. 3-18, F) und das Blatt starb schließlich ab.

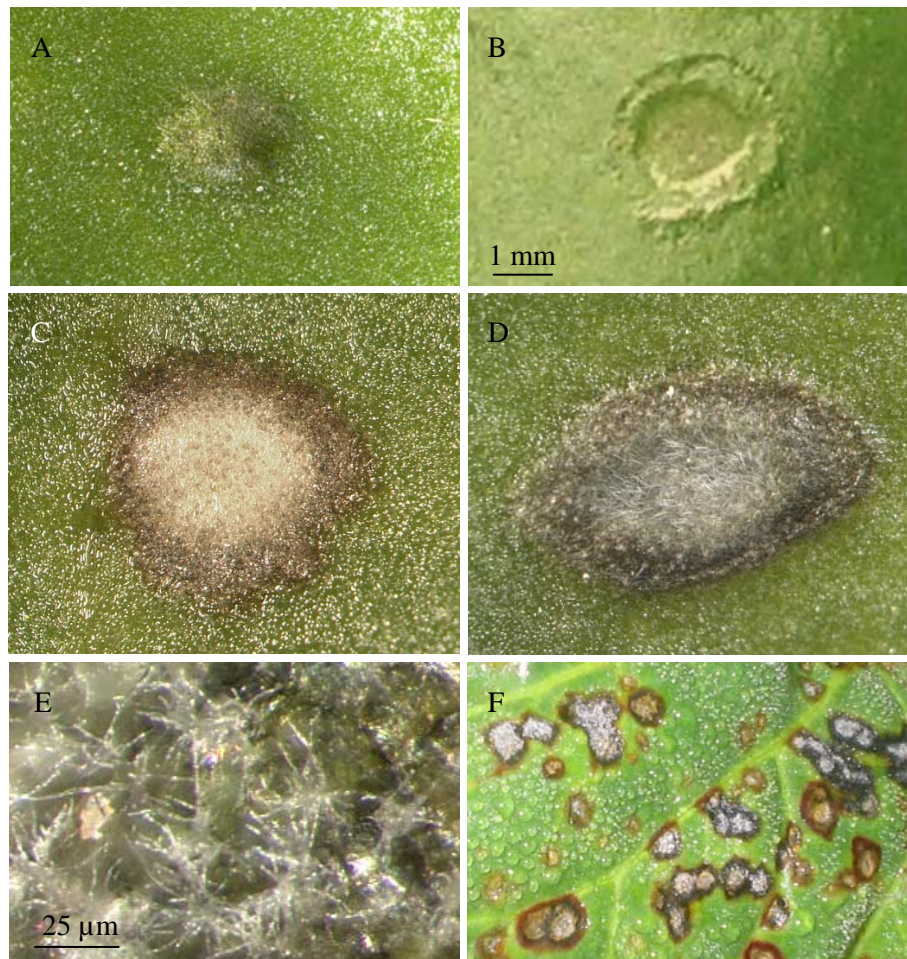


Abb. 3-18 Symptome durch *Cercospora beticola* auf Zuckerrübenblättern der Sorte Nematop: Entstehender Blattfleck (A - C), sporulierender Blattfleck (D), Konidienbüschel (E) und zusammenwachsende Blattflecken (F) (A (2,5x), C (3,2x), E (10x): Stereomikroskopie, B, F: Lichtbilder).

Bei der mikroskopischen Untersuchung des visuell gesund erscheinenden Blatt-

gewebes zeigte sich, dass die Epidermis und das Pallisadenparenchym trotz vereinzelter Pilzhyphen, die aus angrenzenden Blattflecken in diese Region eindrangen, intakt waren (Abb. 3-19, A, B). In der Randzone des Blattflecks konzentrierte sich der Pilz auf den Bereich zwischen Epidermis und Pallisadenparenchym. Auch hier waren die Epidermiszellen intakt (Abb. 3-19, C), die Wände der Pallisadenzellen waren jedoch verdickt, leicht deformiert und stärker angefärbt (Abb. 3-19, D). Im Zentrum des Blattflecks war die Hauptverbreitung des Pilzes. Im Gegensatz zum visuell gesund erscheinenden Gewebe und dem Randbereich des Blattflecks wuchs er dort bis in das Schwammparenchym. Die Epidermiszellen hatten keinen Zusammenhalt mehr, so dass Pilzmyzel an der Blattoberfläche sichtbar wurde (Abb. 3-19, E). Der Zellverband im Pallisadenparenchym war aufgelöst, die Zellen deformiert und der Zellinhalt nicht mehr gleichmäßig, sondern faserartig gefärbt (Abb. 3-19, F).

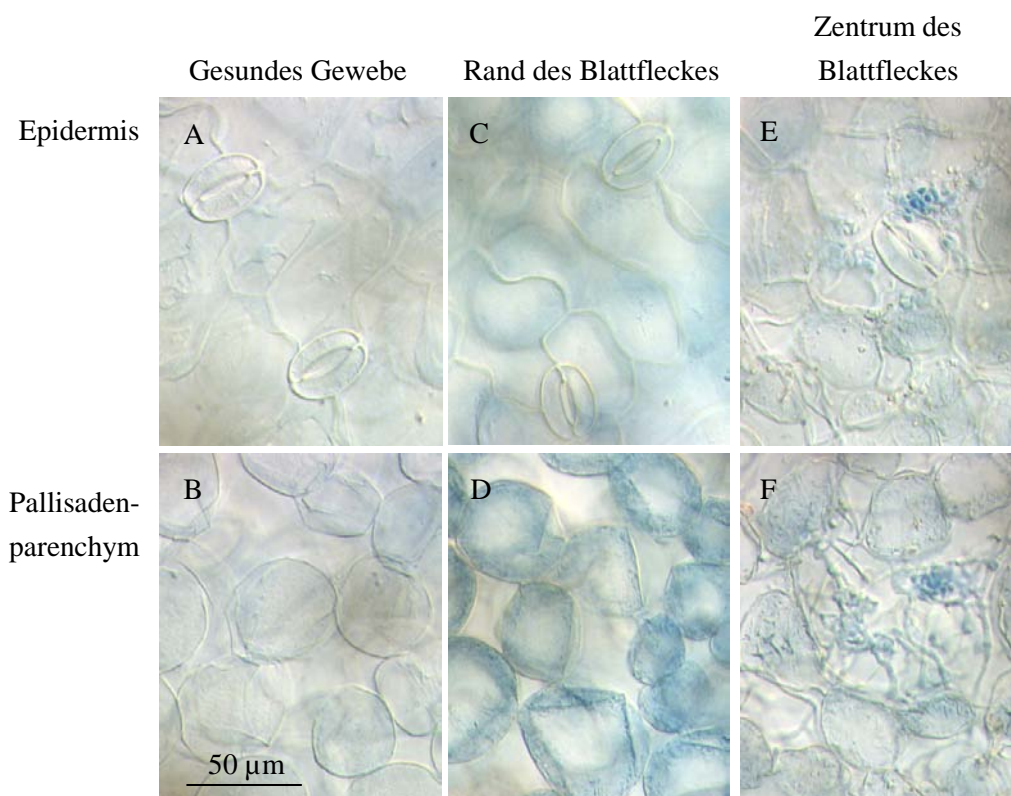


Abb. 3-19 Epidermis (A, C, E) und Pallisadenparenchym (B, D, F) in gesundem Gewebe, im Rand und im Zentrum eines Blattflecks von *Cercospora beticola* auf Zuckerrübenblättern der Sorte Nematop (Durchlichtmikroskopie mit Färbung nach Bruzzese, 400x).

3.2.1.2 Einfluss auf die Blatttemperatur

Nach der Inokulation mit *C. beticola* wiesen Blattregionen mit einer Größe von 4 cm²

und einer durchschnittlichen Anzahl von drei Blattflecken ($0,75 \text{ Blattflecken/cm}^2$) keine signifikanten Unterschiede in ihrer Oberflächentemperatur zu nicht inokulierten Blättern auf (Abb. 3-20). Die Ausbildung von Symptomen ab Tag sechs ging nicht mit einer merklichen Änderung der Temperatur einher. Über den gesamten Versuchszeitraum lag die Temperaturdifferenz zwischen $-0,33$ und $0,02 \text{ K}$.

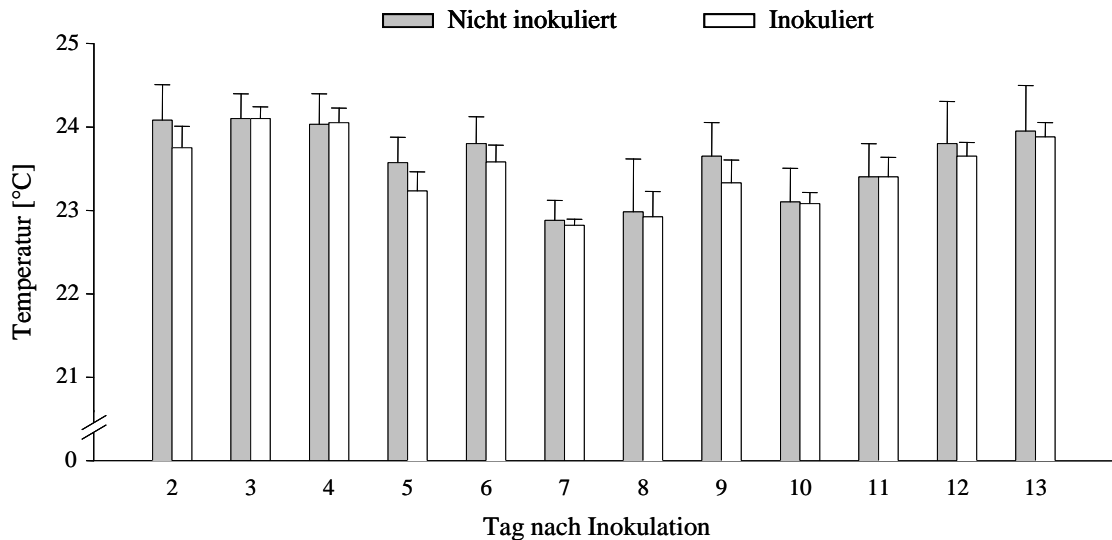


Abb. 3-20 Einfluss von *Cercospora beticola* auf die durchschnittliche Temperatur von Zuckerrübenblättern der Sorte Nematop bei einer visuell sichtbaren Anzahl von $0,75 \text{ Blattflecken/cm}^2$ Blattfläche (keine signifikanten Unterschiede zwischen inokulierter und nicht inokulierter Variante nach t-Test; $p < 0,05$; T = Standardabweichung; $n = 6$).

Im Gegensatz zur Durchschnittstemperatur einer Blattregion änderte sich die maximale Temperaturdifferenz (MTD) mit dem Erscheinen von visuell sichtbaren Symptomen. Auf Blättern, die ab dem zehnten Tag nach Inokulation durchschnittlich $0,95 \text{ Cercospora-Blattflecken/cm}^2$ aufwiesen, nahm die Differenz zwischen der wärmsten und der kältesten Temperatur im Vergleich zu der nicht inokulierten Blätter zu. Sie erreichte am 13. Tag einen Wert von $2,6 \text{ K}$ (Abb. 3-21). Damit war die MTD um $1,7 \text{ K}$ höher als die der nicht inokulierten Variante, welche über den gesamten Versuchszeitraum zwischen $0,9$ und $1,2 \text{ K}$ variierte. Der Unterschied zwischen den Varianten war zehn Tage nach der Inokulation, also einen Tag vor der Nekrotisierung des Zentrums der Blattflecken, bis zum Ende der Messungen signifikant. In einem zweiten unabhängigen Versuch, bei dem die Blätter durchschnittlich nur $0,75 \text{ Blattflecken pro cm}^2$ entwickelten, erreichte die MTD inokulierter Blätter maximal $1,92 \text{ K}$, und übertraf die der nicht inokulierten Variante am letzten Tag der Messungen um $1,1 \text{ K}$. Außerdem war eine Signifikanz zwischen den beiden Varianten erst ab dem elften Tag, etwa fünf

Tage nach dem Erscheinen visueller Symptome, festzustellen. Hier betrug die MTD der inokulierten Variante an Tag elf nach Inokulation 1,5 K.

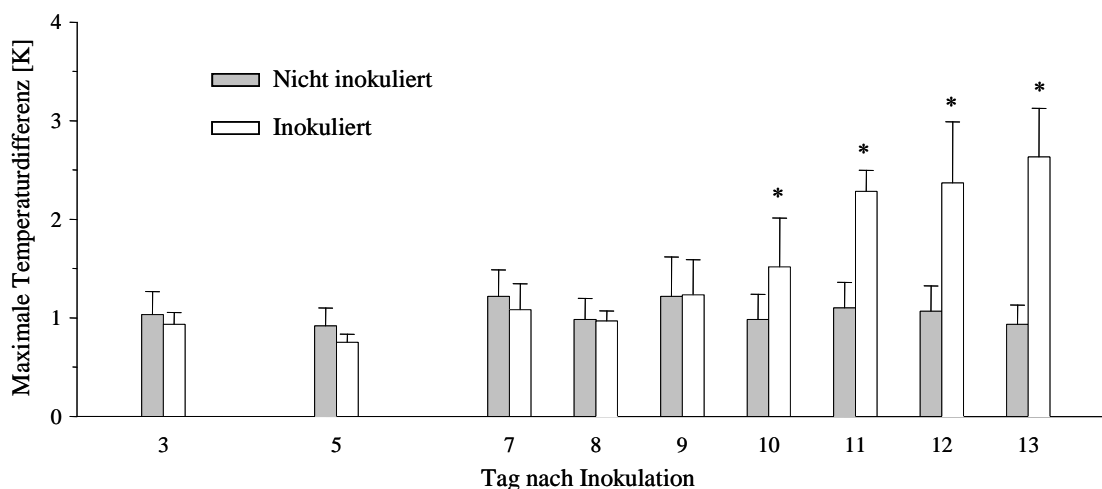


Abb. 3-21 Einfluss von *Cercospora beticola* auf die maximale Temperaturdifferenz von Zuckerrübenblättern der Sorte Nematop bei einer visuell sichtbaren Anzahl von 0,95 Blattflecken/cm² Blattfläche (* = inokulierte Variante unterscheidet sich signifikant von der nicht inokulierten nach t-Test; $p < 0,05$; T = Standardabweichung; $n = 6$).

Nicht sporulierende Blattflecken durch *C. beticola* bewirkten eine lokale Temperaturerhöhung gegenüber dem umliegenden Blattgewebe (Abb. 3-22, T). Parallel zur Ausdifferenzierung eines nekrotisierten Bereiches im Zentrum der Chlorose bildeten sich zwei Temperaturbereiche aus: Ein zentraler Bereich mit einer bis zu 1,2 K höheren Temperatur als das Gewebe nicht inokulierter Blätter und ein diesen umgebenden Randbereich, der maximal ein halbes Grad kühler war als der Erste. Im Laufe der Symptomentwicklung nahm sowohl die Temperatur des Zentrums eines Blattfleckes als auch die des umliegenden Randgewebes im Verhältnis zu nicht inokuliertem Blattgewebe zu (Abb. 2-23). Dieser Unterschied war bezüglich des Zentrums des Blattfleckes ab dem siebten Tag nach Inokulation signifikant (Abb. 3-22). Eine Signifikanz bestand immer ab dem Zeitpunkt, ab dem bei einem Blattfleck visuell ein Zentrum und ein Randbereich unterschieden werden konnten. An Tag fünf, einen Tag vor Erscheinen des Blattfleckes, kühlte sich diese Region um maximal 0,4 K gegenüber nicht inokuliertem Blattgewebe ab. Dieser Effekt war aber nicht signifikant. Die Temperaturdifferenz zwischen einem Blattfleck und nicht inokulierten Blättern war höher als zwischen einem Blattfleck und dem ihn umgebenden inokulierten, symptomfreien Gewebe (Abb. 3-23). Erstere unterlag stärkeren Schwankungen.

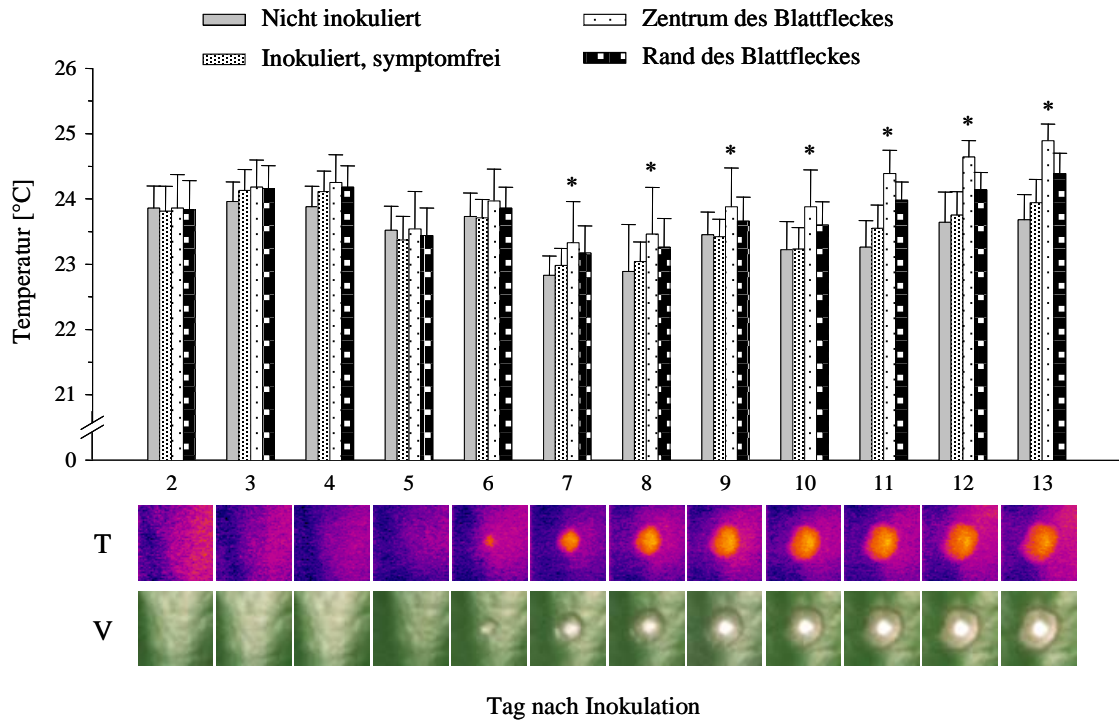


Abb. 3-22 Einfluss von *Cercospora*-Blattflecken auf die Temperatur von Zuckerrübenblättern der Sorte Nematop im Vergleich zu inokuliertem, symptomfreiem Blattgewebe und zur Temperatur nicht inokulierter Blätter. Thermogramme (T) und Videobilder (V) von der Entwicklung eines Blattfleckes (* = Temperatur des Zentrums unterscheidet sich signifikant von der Temperatur nicht inokulierter Blätter nach t-Test; $p < 0,05$; T = Standardabweichung; $n = 16$).

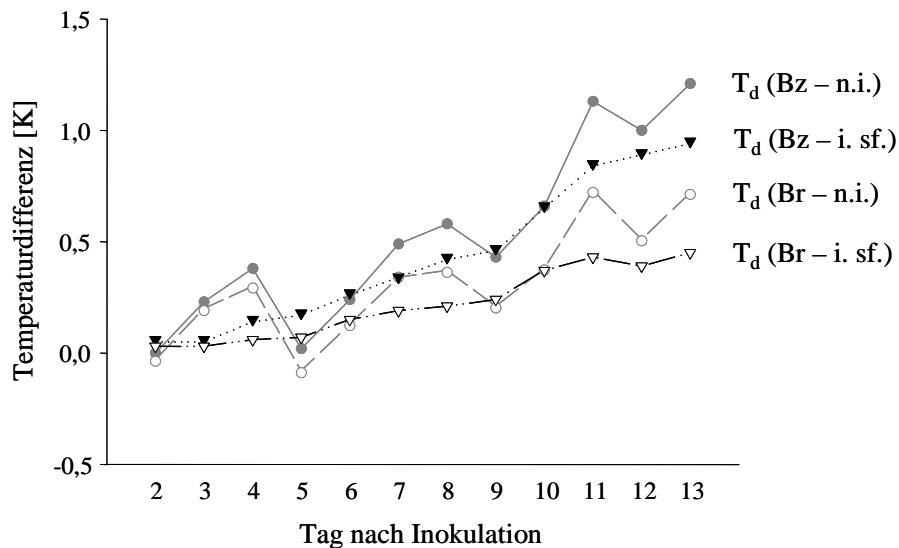


Abb. 3-23 Blattflecken von *Cercospora beticola* auf Zuckerrüben der Sorte Nematop: Temperaturdifferenzen zwischen Blattfleckenzentrum (Bz) beziehungsweise Blattfleckenrand (Br) und nicht inokuliertem Blattgewebe (n. i.) beziehungsweise inokuliertem, symptomfreiem Blattgewebe (i. sf.) ($n = 16$).

Der Unterschied zwischen der Temperatur des Blattflecken-zentrums und inokuliertem,

aber symptomfreien Gewebe angrenzend zum Blattfleck war erst einen Tag später signifikant als der zwischen Zentrum und nicht inokulierten Blättern (Tab. 3-3). Ein signifikanter Unterschied zu nicht inokuliertem Gewebe ließ sich bereits an Tag vier und sieben nach der Inokulation, also vor ersten visuell sichtbaren Symptomen feststellen. Auf einigen Thermogrammen konnte vor der Nekrotisierung des Blattflecken-zentrums eine lokale Temperaturabnahme beobachtet werden. Generell ließ sich das Zentrum eines Blattfleckes aufgrund seiner höheren Temperatur thermographisch besser von nicht inokuliertem oder nicht infiziertem Blattgewebe unterscheiden als dessen Rand.

Cercospora-Blattflecken konnten auch zu einer lokalen Verringerung der Oberflächentemperatur von Zuckerrübenblättern führen. Sowohl die Ausprägung der Krankheits-symptome als auch die Verteilung der Temperatur eines Blattes waren 21 Tage nach der Inokulation sehr heterogen (Abb. 3-24). In einem noch grünen Bereich in der Nähe des Blattstieles befanden sich vor allem Blattflecken im Anfangsstadium. Ein Großteil des Blattes war chlorotisch. In diesen waren deutlich ausgeprägte, zusammenfließende Blattflecken eingebettet. Am oberen Blattrand hatten sie bereits zur Nekrotisierung des Gewebes geführt. Im Thermogramm besaßen das vitalste und das bereits abgestorbene Gewebe die höchste Temperatur. Im Gegensatz zu den oben gezeigten Ergebnissen war ein Großteil der Blattflecken kühler als das umgebende Blattgewebe, und ihr Rand wärmer als das Zentrum.

Tab. 3-3 Übersicht der statistischen Analyse der Temperatur von *Cercospora*-Blattflecken auf Zuckerrübenblättern der Sorte Nematop (* = signifikanter Unterschied in der Temperatur beider untersuchter Bereiche nach t-Test; $p < 0,05$; $n = 16$).

Untersuchte Bereiche	Tag nach Inokulation											
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Zentrum des Blattfleckes/ inokuliertes, symptomfreies Blatt							*	*	*	*	*	*
Randgewebe des Blattfleckes/ nicht inokuliertes Blatt			*			*			*	*	*	*
Randgewebe des Blattfleckes/ inokuliertes, symptomfreies Blatt								*	*	*	*	*
Zentrum des Blattfleckes/ Randgewebe des Blattfleckes										*	*	*

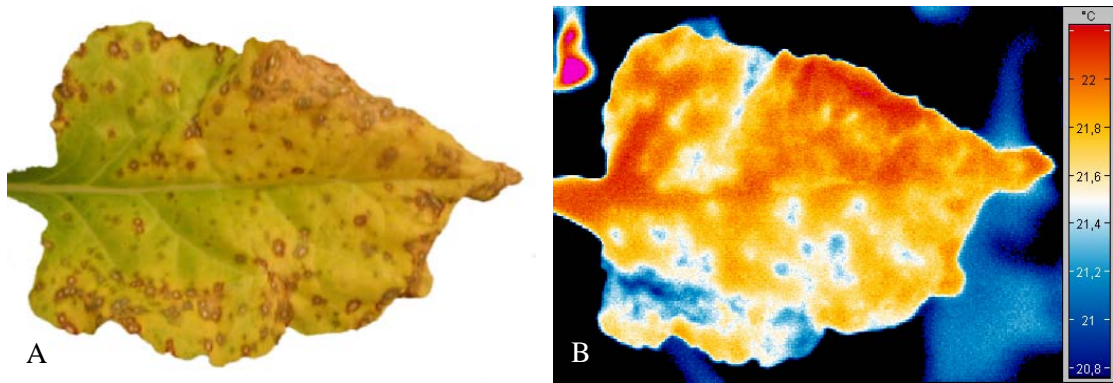


Abb. 3-24 Zuckerrübenblatt der Sorte Nematop 21 Tage nach der Inokulation mit *Cercospora beticola* dargestellt als Lichtbild (A) und als Thermogramm (B).

Die Temperaturveränderung durch *Cercospora*-Blattflecke war bezüglich der betroffenen Fläche größer, als deren visuell erfassbare Größe (Abb. 3-25). Je größer ein Blattfleck wurde, desto mehr dehnte sich der Bereich höherer Temperatur aus. Das Zentrum der Blattflecken war maximal eineinhalb Millimeter groß, der entsprechende Bereich im Thermogramm war fast einen Millimeter größer. Im Gegensatz dazu war der Rand des Blattfleckes im Thermogramm maximal etwa 0,8 mm schmaler als im Videobild. Während die warme Zone des Zentrums im Verhältnis zur visuellen Größe stetig zunahm, entwickelte sich der Größenunterschied zwischen thermisch und visuell sichtbarem Randbereich vorwiegend erst mit zunehmendem Alter des Blattfleckes.

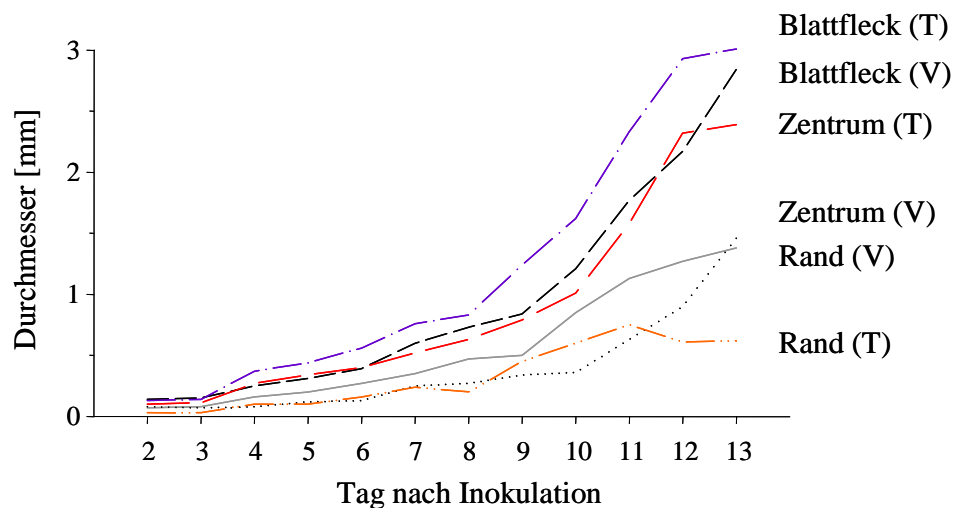


Abb. 3-25 Entwicklung eines Blattflecks von *Cercospora beticola* auf Zuckerrübenblättern der Sorte Nematop, gemessen nach ihrer Größe im Thermogramm (T) und im Videobild (V) (n = 16).

3.2.1.3 Einfluss auf die Effektivität der Photosynthese

Veränderungen der Chlorophyllfluoreszenz bei hoher Anregungsintensität, FH, durch eine Infektion mit *C. beticola* konnten in Schwarzweiß-Bildern dargestellt werden. Geringe Grauwerte wiesen auf eine Verringerung, hohe auf eine Erhöhung von FH hin. Die Grauwerte wurden als ein Maß für die Fluoreszenz herangezogen. Hierzu wurde das Verhältnis aus den Werten nicht inokulierten beziehungsweise inokulierten, aber symptomfreien Blattgewebes zu den Werten des Zentrums beziehungsweise des Rand des Blattfleckes berechnet. Intaktes Blattgewebe besaß einen Verhältniswert von Eins. Ein Wert darüber bedeutete eine Verringerung von FH.

Die Entwicklung von Blattflecken begann mit einer kreisförmig begrenzten Erhöhung von FH. Im Zentrum dieser verringerte sich die FH, der Verhältniswert stieg an. Bereits ein bis zwei Tage vor den ersten auf Video- und Chlorophyllfluoreszenzbildern sichtbaren Symptomen stiegen die Verhältniswerte über 1 (Abb. 2-26, C, V).

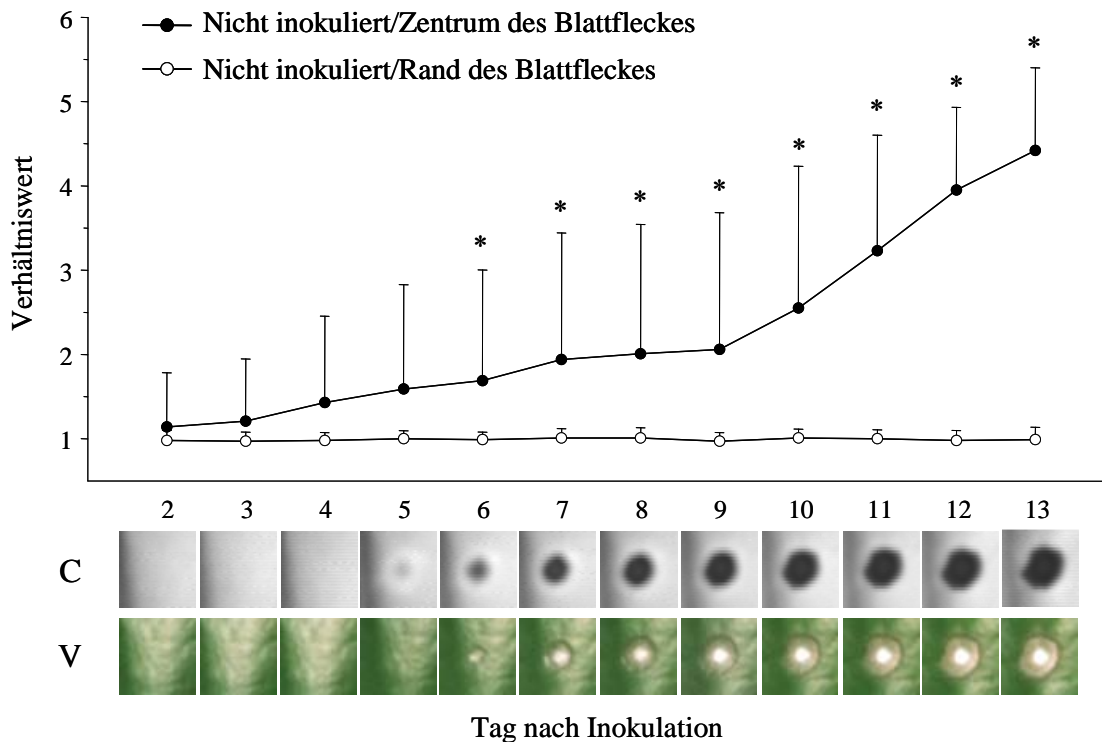


Abb. 3-26 Einfluss von *Cercospora*-Blattflecken auf die Chlorophyllfluoreszenz FH von Zuckerrüben der Sorte Nematop dargestellt als Verhältniswerte in den Relationen nicht inokuliertes Blattgewebe/Zentrum des Blattfleckes und nicht inokuliertes Blattgewebe/Rand des Blattfleckes. Hohe Verhältniswerte weisen auf eine geringe FH hin. Schwarzweiß-Bilder zur Darstellung der FH (C) und Videobilder (V) von der Entwicklung eines Blattfleckes (* = die Verhältniswerte der Relationen zwischen nicht inokuliertem Blattgewebe/Zentrum des Blattfleckes und dem Verhältniswert 1 unterscheiden sich signifikant nach t-Test; $p < 0,05$; T = Standardabweichung; $n = 16$).

Sie nahmen stetig zu bis auf einem maximalen Wert von etwa 4,4 an Tag 13 nach Inokulation. Erst am Tag des Erscheinens eines deutlichen Blattfleckes war der Unterschied zum Wert 1 signifikant, im dargestellten Versuch am sechsten Tag nach Inokulation mit einem Verhältniswert von 1,67. Auf den Chlorophyllfluoreszenzaufnahmen war jedoch schon an Tag 5 eine Aufhellung mit einem dunkleren Zentrum zu sehen. Die Verhältniswerte des Randes von Blattflecken lagen dagegen konstant bei Werten um 1 und waren in Form eines hellen Ringes um das Zentrum herum auf den Schwarzweiß-Bildern sichtbar (Abb. 3-26, C). Diese Aufhellung wies auf eine besonders starke Chlorophyllfluoreszenz gegenüber dem umliegenden Gewebe hin. Ähnliche Ergebnisse lieferte die Relation der Grauwerte des Zentrums und des Randes von Blattflecken mit inokuliertem und symptomfreiem Blattgewebe. Allerdings war der Verhältniswert inokuliertes, symptomfreies Gewebe/Zentrum des Blattfleckes erst einen Tag später signifikant verschieden vom Wert 1 als der gleiche Verhältniswert bezüglich des nicht inokulierten Gewebes.

Zwar lässt sich ein *Cercospora*-Blattfleck visuell in einen zentralen und einen Randbereich unterteilen, bei dessen Auswirkung auf die Chlorophyllfluoreszenz schien diese Differenzierung jedoch nicht vorhanden. Die Reduktion der FH erstreckte sich auf den gesamten visuell sichtbaren Blattfleck und maximal eineinhalb Millimeter darüber hinaus (Abb. 3-27).

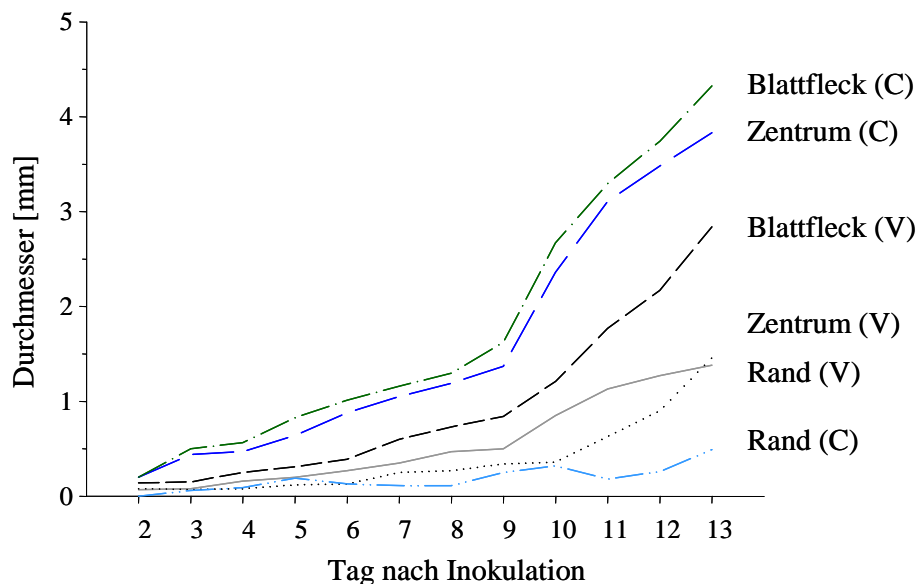


Abb. 3-27 Durchmesser eines Blattfleckes von *Cercospora beticola*, dessen Zentrum und dessen Randes, auf Zuckerrübenblättern der Sorte Nematop, gemessen nach ihrer Größe im Schwarzweiß-Bild zur Darstellung der Chlorophyllfluoreszenz FH (C) und im Videobild (V) (n = 16).

Dieser Größenunterschied war vor allem auf das Zentrum, also den schwarzen Bereich des im Schwarzweiß-Bild dargestellten Blattfleckes, zurückzuführen. Die Aufhellung um das Zentrum, bei der Chlorophyllfluoreszenz als Rand des Blattfleckes bezeichnet, war stets am kleinsten und nahm kaum an Größe zu. Zu jedem Zeitpunkt der Messungen, war ein Blattfleck im Schwarzweiß-Bild größer als im Videobild. Der Größenunterschied war durchschnittlich 0,8 mm.

3.2.2 Echter Mehltau

3.2.2.1 Befallsverlauf

Die hyalinen Sporen von *E. betae*, dem Erreger des Echten Mehltaus, waren etwa 30 bis 50 μm lang, und 14 μm breit. Sie unterschieden sich von *C. beticola* in ihrer zylindrischen Form und dadurch, dass sie nicht septiert waren (Abb. 3-28, A). Bereits einen Tag nach der Inokulation keimten die Sporen, bildeten Appressorien und penetrierten das Wirtsgewebe. Die Keimung fand mit einem circa 2 μm langen Keimschlauch statt (Abb. 3-28, A). Durch ein Septum getrennt, bildete sich an dessen Ende ein breit verzweigtes Appressorium, welches etwa halb so groß wie die Spore war (Abb. 3-28, B). Aus der Mitte der dem Wirtsgewebe zugewandten Seite des Appressoriums erfolgte über die Infektionshyphe die Penetration durch die Poren des Stoma oder durch die Wand von Epidermiszellen (Abb. 3-28, C).

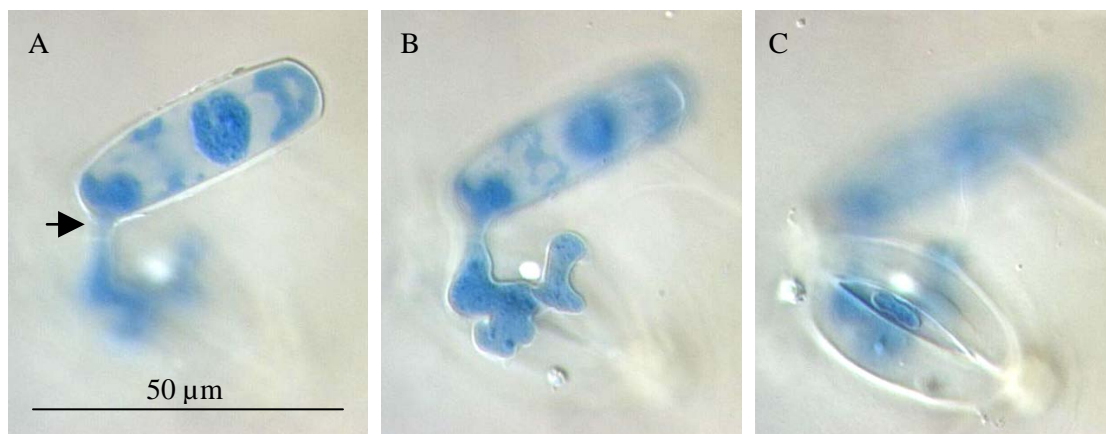


Abb. 3-28 Keimung einer Spore von *Erysiphe betae* auf der Blattoberseite einer Zuckerrübe der Sorte Nematop 1 dpI: Spore mit Keimschlauch (►, A), Appressorium (B) und Infektionshyphe über einer Spaltöffnung (Zentrum des Fokus verschiebt sich zur Blattoberfläche hin, Durchlichtmikroskopie mit Färbung nach Bruzzese, 1000 \times).

Am dritten und vierten Tag nach Inokulation hatten die Sporen zwei bis fünf, im

Durchschnitt drei septierte Keimhyphen gebildet. Mindestens eine der Hyphen bildete sich am Appressorien, eine an der dem Appressorium gegenüberliegenden Ecke der Konidie, und eine auf der anderen Schmalseite (Abb. 3-29, A). Manche Hyphen wuchsen aus der Längsseite der Konidie. Sie verzweigten sich fischgrätartig und wuchsen sternförmig von der Spore aus auf der Epidermis, so dass sich typische Pusteln bildeten (Abb. 3-29, B). Vier Tage nach der Inokulation waren die Hyphen etwa 1500 μm lang. Abwechselnd mit den Seitenästen oder gegenüber von diesen befanden sich an den Hyphen amboßförmige, 7 bis 10 μm breite, sekundäre Appressorien. Der Abstand zwischen ihnen betrug etwa 100 μm . Die sekundären Appressorien waren über der Epidermis durch zwei Fortsätze gekennzeichnet (Abb. 3-29, C). Um die Infektionshyphale des sekundären Appressoriums aggregierte das Zytoplasma der Epidermiszellen (Abb. 3-29, D), deren Turgeszenz geringer war.

Vier bis fünf Tage nach der Inokulation formten sich an den Hyphen einzeln stehende Konidienträger. Diese waren im Gegensatz zu den Seitenästen stets durch Septen von den Hyphen getrennt und standen im rechten Winkel von diesen ab. Sie bestanden aus drei Zellen, an deren Ende die Konidien heranreiften (Abb. 3-29, E). Bereits fünf Tage nach der Inokulation waren in unmittelbarer Nähe zur Spore Konidienträger vorhanden, deren ausgereifte Konidien bereits abgefallen waren.

Visuell war der Befall mit *E. betae* mit Beginn der Hyphenbildung anhand eines weißen sternförmigen Belags auf dem Blatt sichtbar. Dieser war vorerst auf Pusteln begrenzt (Abb. 3-29, F) und weitete sich dann innerhalb weniger Tage auf das ganze Blatt aus, welches daraufhin chlorotisch und welk wurde.

3.2.2.2 Einfluss auf die Blatttemperatur

Blätter, die mit *E. betae* inokuliert waren, hatten am fünften und 13. Tag nach Inokulation eine signifikant niedrigere Temperatur als nicht inokulierte Blätter (Abb. 3-30). Fünf Tage nach der Inokulation, als *E. betae* die ersten Konidienträger auf der Blattoberfläche bildete, betrug die Temperaturdifferenz 0,62 K. Nur am Tag zuvor war die Temperatur der inokulierten Blätter höher als die nicht inokulierter. Die Differenz betrug 0,5 K. Nachdem die Temperaturdifferenz von Tag vier auf Tag fünf abfiel, blieb sie bis zum Ende der Messungen relativ konstant. Insgesamt war die durchschnittliche Temperatur inokulierter Blätter mit geringen Abweichungen konstant um 23,3 °C.

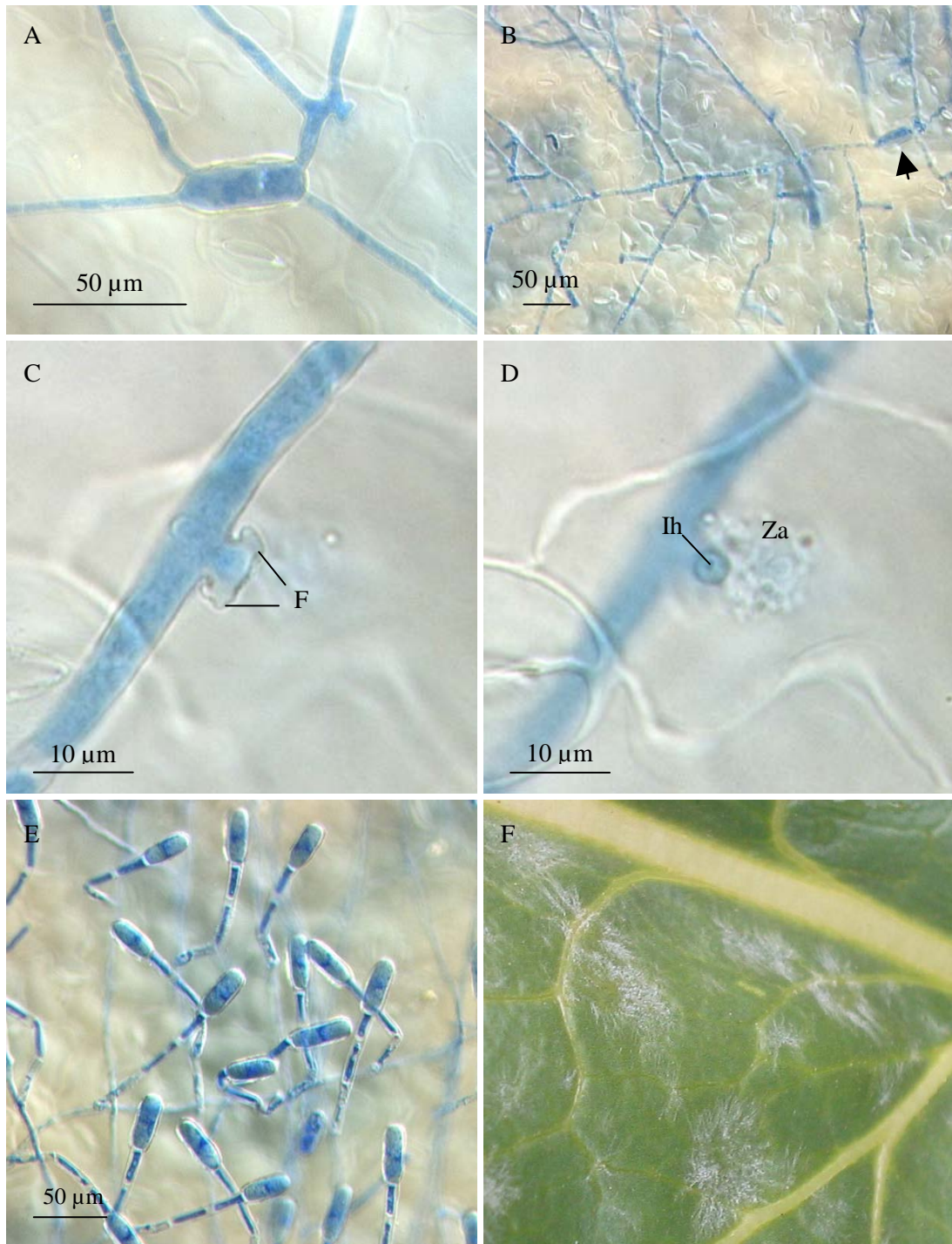


Abb. 3-29 Entwicklung von *Erysiphe betae* auf der Blattoberseite von Zuckerrüben der Sorte Nematop:

A: Hyphenbildung an einer Spore mit Appressorium (9 dpI, 400x)

B: Fischgrätartig verzweigtes Myzel von einer Spore (►) ausgehend (5 dpI, 200x)

C: Sekundäres Appressorium mit Fortsätzen (F) über einer Epidermiszelle (3 dpI, 1000x)

D: Infektionshyph (Ih) eines sekundären Appressoriums umgeben von dem Zytoplasma (Za) in der Epidermiszelle (3 dpI, 1000x)

E: Konidienträger mit ausgereiften Konidien (11 dpI, 200x)

F: Pusteln als erstes visuell sichtbares Symptom einer erfolgreichen Infektion

(A - E: Durchlichtmikroskopie mit Färbung nach Bruzzese, F: Lichtbild).

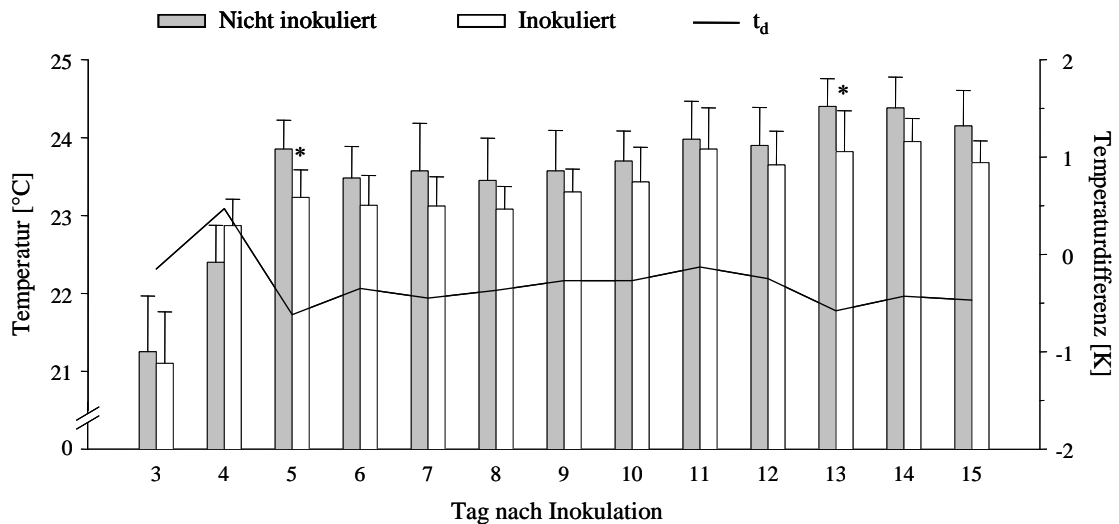


Abb. 3-30 Einfluss von *Erysiphe betae* auf die durchschnittliche Temperatur und Temperaturdifferenz (t_d) von Zuckerrübenblättern der Sorte Nematop (* = inokulierte Variante unterscheidet sich signifikant von der nicht inokulierten nach t-Test; $p < 0,05$; T = Standardabweichung; $n = 6$).

Die Differenz zwischen der maximalen und der minimalen Oberflächentemperatur inokulierter Blätter war zwischen Tag sieben und elf und an Tag 13 signifikant höher als bei nicht inokulierten Pflanzen (Abb. 3-31). Die MTD inokulierter Pflanzen lag während der gesamten Messdauer bei 0,95 K. Zwischen dem dritten und elften Tag nach der Inokulation lag deren Standardabweichung nur bei 0,12 K. Ab Tag elf nahm sie auf einen Wert von 0,82 K am letzten Tag ab. Die MTD nicht inokulierter Blätter war mit einem durchschnittlichen Wert von 0,79 K stets geringer als die der inokulierten. In dem Zeitraum, in welchem sich die MTDs signifikant unterschieden, fand in der Regel auch das visuell sichtbare Wachstum einzelner Pusteln auf der Blattoberseite statt. Diese nahmen im weiteren Verlauf stetig mehr Blattfläche ein, bis die Blätter von einem einheitlichen Belag aus Pilzmyzel bedeckt waren.

Mit der Agema/FLIR Thermovision konnten Pusteln von *E. betae* nicht erfasst werden. Mit der VARIOSCAN 3021-ST dagegen waren sie als lokal begrenzte Zonen kühlerer Temperatur gegenüber dem umliegenden Blattgewebe erkennbar (Abb. 3-32, 1a). Sie führten sie zu einer MTD, die mit 2 K um 1 °C höher war als die nicht inokulierter Blätter. Die lokalen Temperaturunterschiede nahmen wieder ab, sobald ein Blatt vollkommen mit Pilzmyzel bedeckt war (Abb. 3-32, 2a).

Ergebnisse

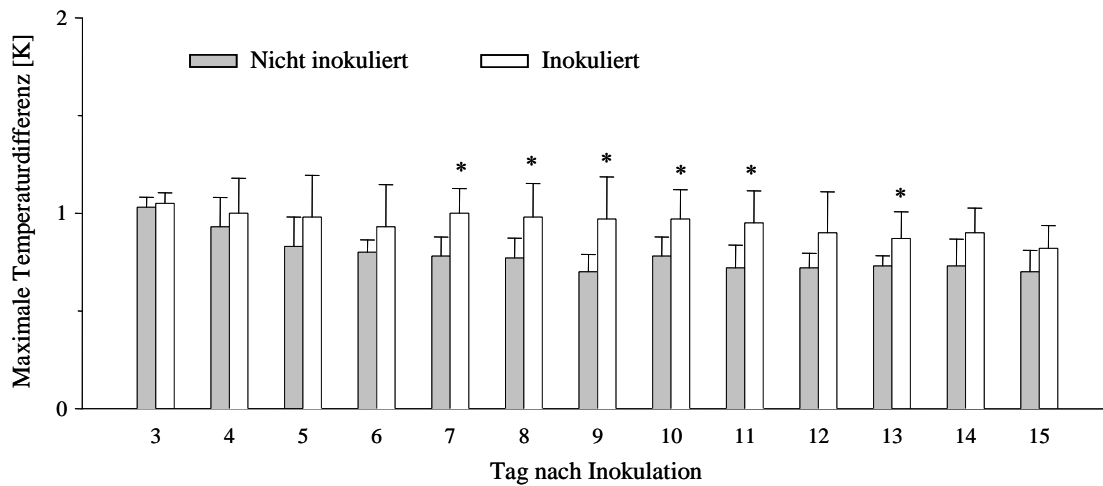


Abb. 3-31 Einfluss von *Erysiphe betae* auf die maximale Temperaturdifferenz (MTD) von Zuckerrübenblättern der Sorte Nematop (* = inokulierte Variante unterscheidet sich signifikant von der nicht inokulierten nach t-Test; $p < 0,05$; T = Standardabweichung; $n = 6$).

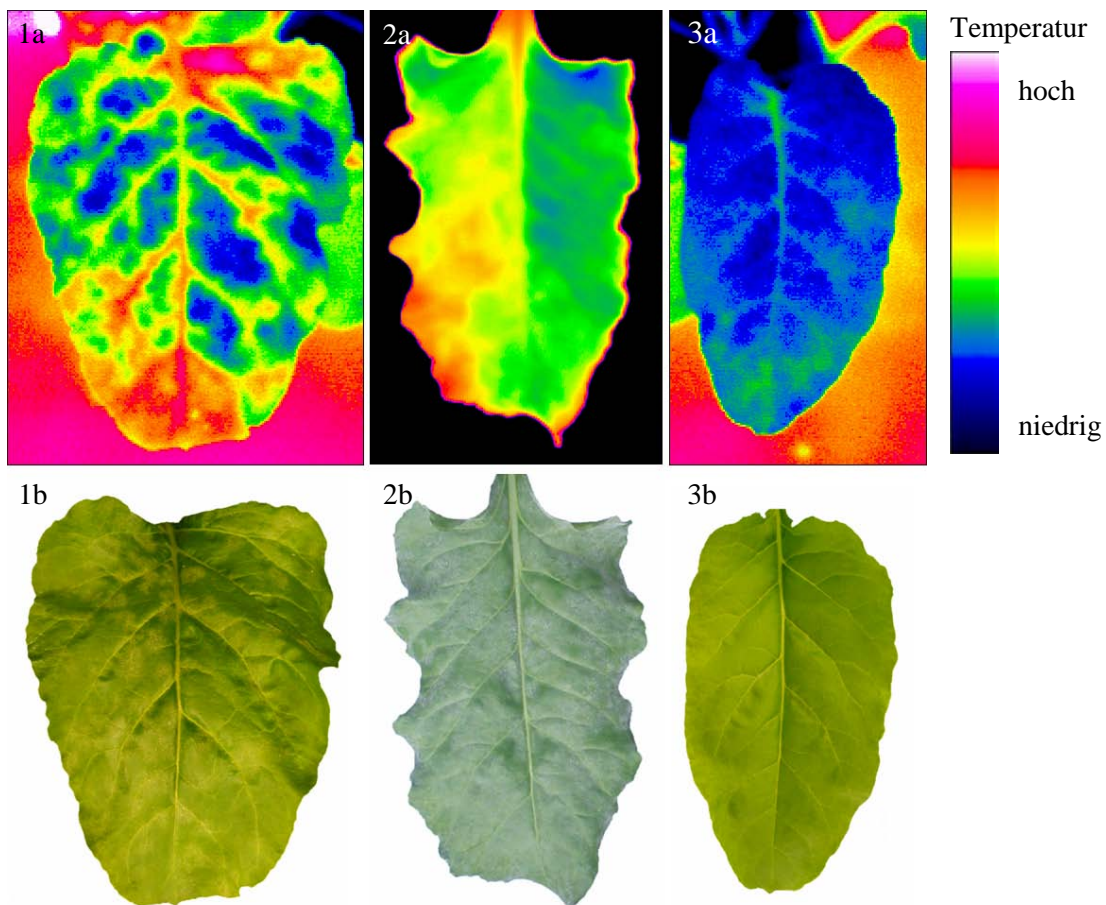


Abb. 3-32 Zuckerrübenblätter der Sorte Nematop inokuliert mit *Erysiphe betae* in einem Stadium mit einzelnen Mehltaupusteln (1) und vollkommen mit Pilzmyzel bedeckt (2) im Gegensatz zu einem nicht inokulierten Blatt (3) (a: Thermogramm, b: Lichtbild). Die Thermogramme stehen in keinem direkten Verhältnis zueinander, die Farben können nicht aufeinander bezogen werden. Es handelt sich um drei verschiedene Blätter.

3.2.2.3 Einfluss auf die Effektivität der Photosynthese

Nach Inokulation mit *E. betae* war die Chlorophyllfluoreszenz FH höher als die nicht inokulierter Blätter (Abb. 3-33). Ab dem vierten Tag nach Inokulation vergrößerte sich der Unterschied zwischen beiden Varianten, war aber den gesamten Zeitraum über nicht signifikant. Dies bedeutet, dass die FH von Zuckerrübenblättern durch einen Befall mit *E. betae* im Gegensatz zu befallsfreien Blättern zunahm.

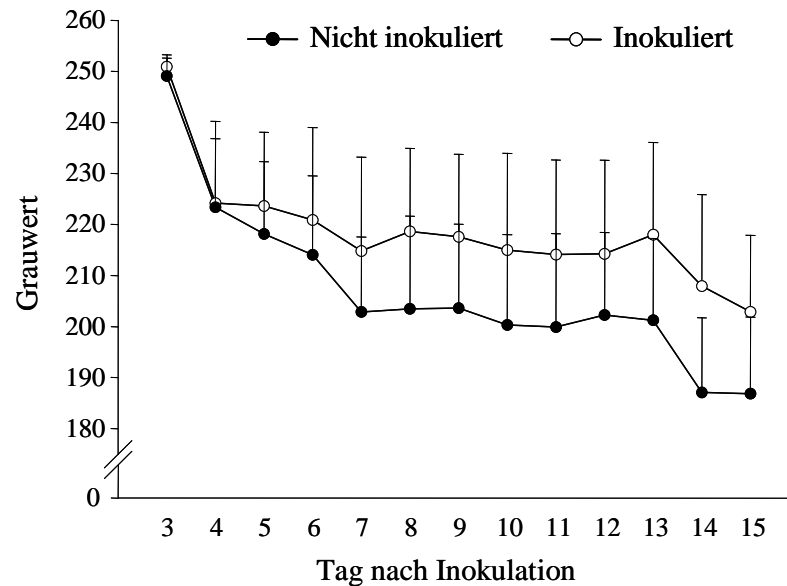


Abb. 3-33 Einfluss von *Erysiphe betae* auf die Chlorophyllfluoreszenz FH von Zuckerrübenblättern der Sorte Nematop, aufgenommen mit einer Chlorophyllfluoreszenzkamera. Hohe Grauwerte weisen auf hohe Chlorophyllfluoreszenzwerte hin. Weiße Pixel besitzen einen maximalen Grauwert von 256, schwarze einen Grauwert von 0 (Grauwerte inokulierter Blätter unterscheiden sich nicht signifikant von denen nicht inokulierter nach t-Test; $p \leq 0,05$; T = Standardabweichung; n = 16).

3.2.3 Rübengrost

3.2.3.1 Befallsverlauf

U. betae hatte eiförmige, hellbraune, nicht septierte Sporen mit einer Länge von etwa 26 μm und einer Breite von 22 μm (Abb. 3-34, A). Ihre dicke Wand war dunkler als das Sporennere und außen in regelmäßigem Abstand mit vielen kurzen Dornen besetzt. Sie besaßen meistens drei Keimporen. Am ersten und zweiten Tag nach der Inokulation fand die Keimung aus einer der Keimporen statt (Abb. 3-34, A, C). Die Keimschläuche waren gekrümmt und besaßen kurze Ausstülpungen. Erfolgte die Infektion kurz nach der Inokulation, waren sie sehr kurz (Abb. 3-34, C), bei einer

Infektion mehrere Tage nach der Inokulation konnten die Keimschläuche 150 bis 400 μm lang werden (Abb. 3-34, D). Am Ende des Keimschlauches, durch ein Septum von ihm getrennt, bildete sich ein birnenförmiges Appressorium, welches etwa so groß war wie die Sporen (Abb. 3-34, B, D). Über das Appressorium erfolgte die Penetration. Es wurden nur Penetrationen durch Spaltöffnungen beobachtet (Abb. 3-34, C).

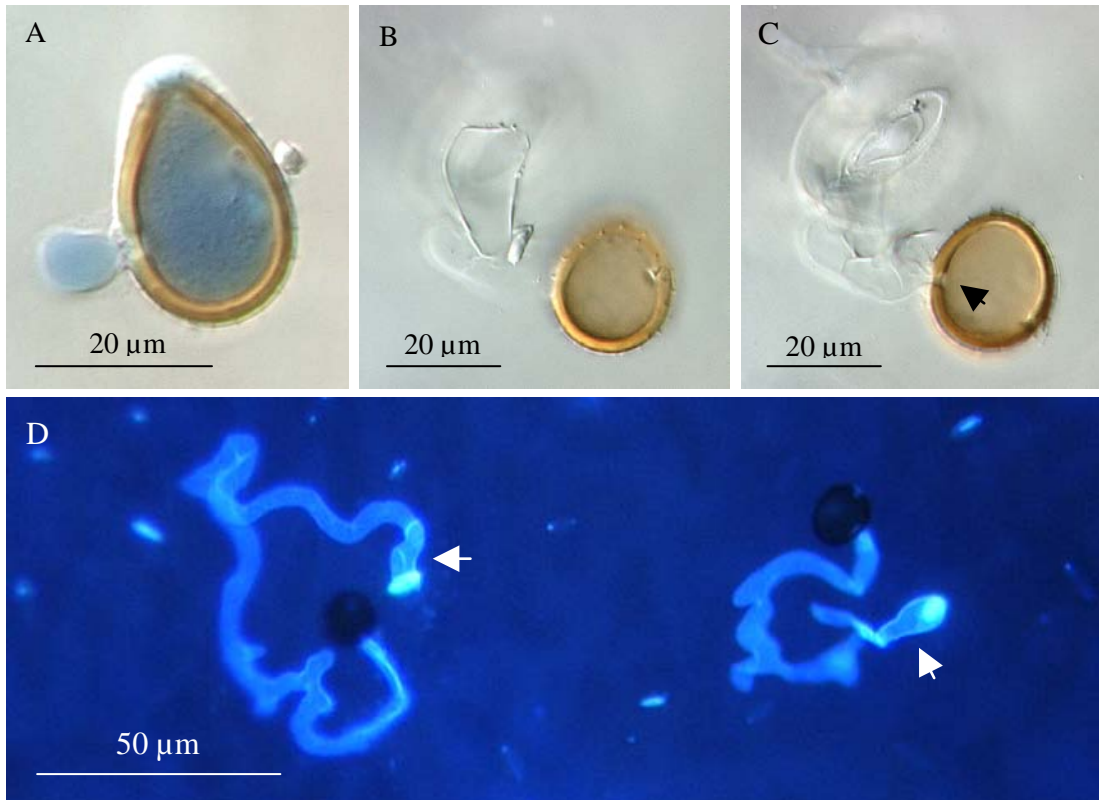


Abb. 3-34 Keimung der Sporen von *Uromyces betae* auf der Blattoberseite von Zuckerrüben der Sorte Nematop: Keimung aus einer Keimpore (\blacktriangleright , A, C, 1000 \times), Appressorienbildung (B, 1000 \times) und Penetration durch die Pore des Stoma 2 dpi (C), Keimschläuche mit Appressorien 8dpi (\blacktriangleright , D, 400 \times) (A: Durchlichtmikroskopie mit Färbung nach Bruzzese, B, C: Coomassie Brilliantblau, D: Fluoreszenzmikroskopie).

14 bis 15 Tage nach Inokulation bildeten sich Uredosporenlager. Diese enthielten anfangs überwiegend unreife Konidien, welche von der Epidermis bedeckt waren (Abb. 3-35, A). Sie waren als kleine hellgrüne oder gelbe Punkte auf dem Blatt sichtbar (Abb. 3-35, B). Sobald die Mehrzahl der Konidien ausgereift war, brach die Epidermis vollständig auf (Abb. 3-35, C, D). Das angrenzende Gewebe war unversehrt, Pilzstrukturen wurden darin nicht festgestellt. Braune, punktuelle Erhebungen auf dem Blatt, umgeben von einem hellgrünen bis gelben Hof, deuteten auf Uredosporenlager mit reifen Konidien (Abb. 3-35, E). Je größer die Pusteln waren, desto weniger deutlich war der Hof.

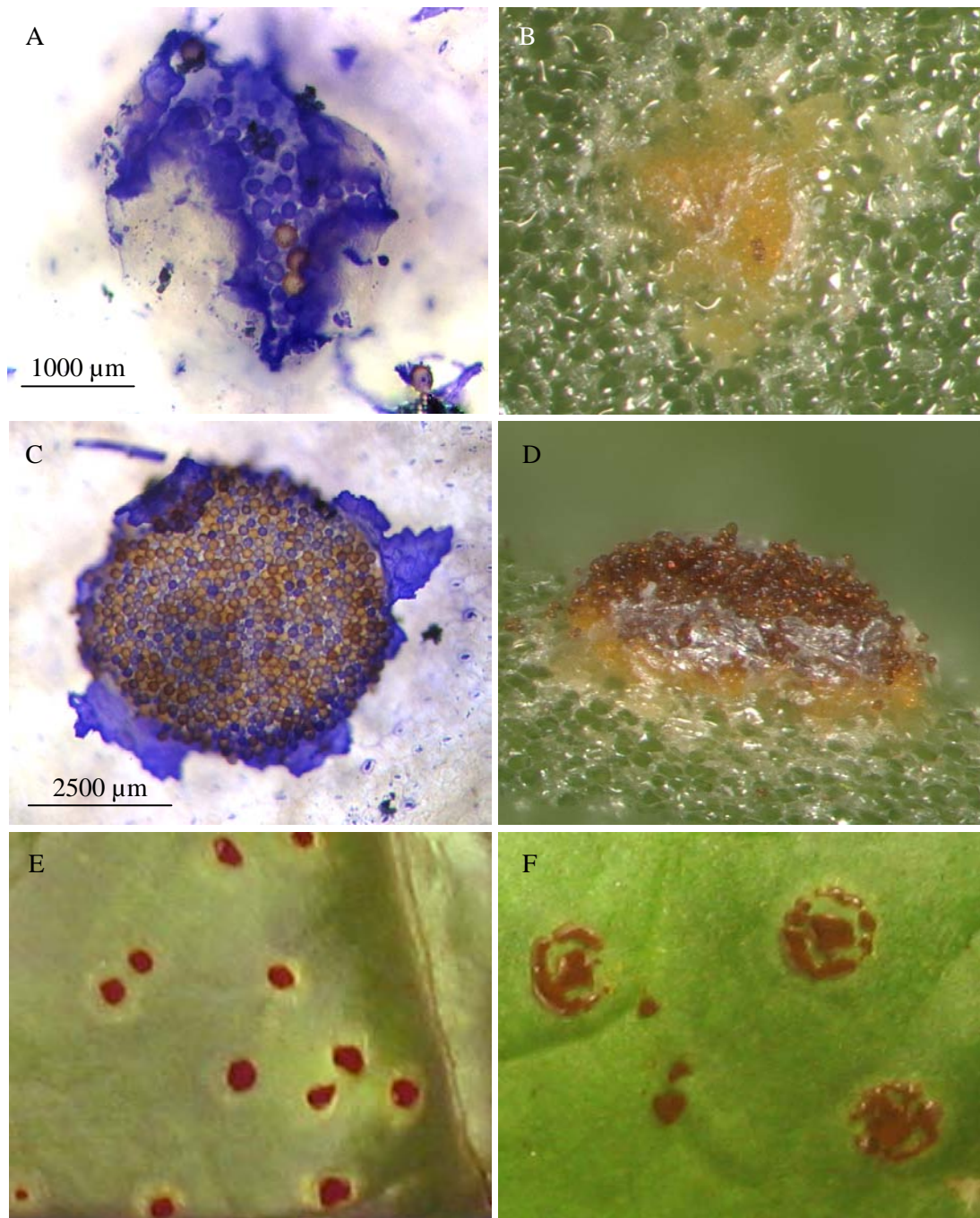


Abb. 3-35 *Uromyces betae* auf der Blattoberseite von Zuckerrüben der Sorte Nematop:

A: Aufreißen der Epidermis über einem Uredosporenlager mit größtenteils unreifen Sporen 14 dpI (200x)

B: Uredosporenlager mit unreifen Sporen unter der geschlossenen Epidermis (10x)

C: Uredosporenlager mit mehrheitlich ausgereiften Sporen und vollständig aufgerissener Epidermis (15 dpI, 100x)

D: Über das Blattgewebe herausragende Pustel mit ausgereiften Sporen (5x)

E: Junge Pusteln umgeben von einem hellgrünem Hof

F: Ältere Pusteln mit einem Ring aus Uredosporenlagern

(A, C: Durchlichtmikroskopie mit Färbung nach Bruzzese, B, D: Stereomikroskopie, E, F: Lichtbilder).

Mit zunehmendem Alter bildeten sich um das ursprüngliche ein bis drei Ringe neuer Uredosporenlager, zwischen welchen sich grünes, unbeschädigtes Blattgewebe befand (Abb. 3-35, F). Starker Befall mit *U. betae* führte im Gewächshaus zur Chlorose, zur Welke und dem Absterben der Blätter.

3.2.3.2 Einfluss auf die Blatttemperatur

Der Befall mit *U. betae* äußerte sich je nach dem physiologischen Alter der Symptome in unterschiedlichen Temperatureffekten. In einem Versuch nahm die Temperatur mit dem Erscheinen sichtbarer Symptome um 0,9 K ab (Abb. 3-36, A). Der Unterschied zu nicht inokulierten Blättern war zu jedem Zeitpunkt der Messungen, außer am letzten Tag, signifikant. In diesem Versuch waren die Pusteln noch jung und zum Ende des Versuches von einem ausgeprägten chlorotischen Hof umgeben (Abb. 3-36, a). Thermographische Aufnahmen bestätigten, dass Pusteln in einem physiologisch frühen Stadium mit einem deutlich sichtbaren Hof zu einer lokalen Temperaturverringering des Gewebes von bis zu 0,7 K führten (Abb. 3-37). Die Abkühlung erstreckte sich auf das Uredosporenlager und den Pustelhof. In einem weiteren Experiment waren befallene Blätter ein halbes Grad wärmer als nicht befallene (Abb. 3-36, B). Auch hier fand die Veränderung der Temperatur mit dem Erscheinen erster Symptome statt. Zu den Zeitpunkten der stärksten Erwärmung, am 17., 19. und 25. Tag nach Inokulation, war der Unterschied zu nicht inokuliertem Blattgewebe signifikant. Am 21. Tag nach Inokulation waren die Pusteln so alt, dass bei den meisten kein Hof mehr sichtbar war (Abb. 3-36, b). Vier Tage später hatte sich bei etwa 25 % der Pusteln ein weiterer Sporenring um das ursprüngliche Uredosporenlager gebildet. Die durchschnittliche Anzahl an Pusteln pro cm^2 betrug 4,3 beziehungsweise 4.

Beim ersten Versuch hatte der Befall mit *U. betae* keinen Einfluss auf die MTD. Beim zweiten unterschied sich die MTD inokulierter Blätter zu Beginn der ersten sichtbaren Symptome, an Tag 14 und 15 nach Inokulation und am letzten Tag der Messung, signifikant von der nicht inokulierten (Abb. 3-38). Während die Differenz zwischen dem wärmsten Bereich und dem kühlfsten bei nicht inokulierten Blättern konstant zwischen 0,8 und 1,0 K lag, nahm sie bei inokulierten allmählich von 0,85 am zweiten Tag nach Versuchsbeginn auf 1,17 K an Tag 25, 0,37 °C über die nicht inokulierten, zu. Die Rostpusteln wurden auf Thermogrammen etwa ab dem 15. Tag nach Inokulation als Punkte höherer Temperatur sichtbar (Abb. 3-39, T). An den Tagen 11, 13, 14

und 17 bis 25 nach Inokulation wiesen die Uredosporenlager eine signifikant höhere Temperatur als nicht inokuliertes Blattgewebe auf. Diese betrug maximal 1,09 K an Tag 25 nach Inokulation.

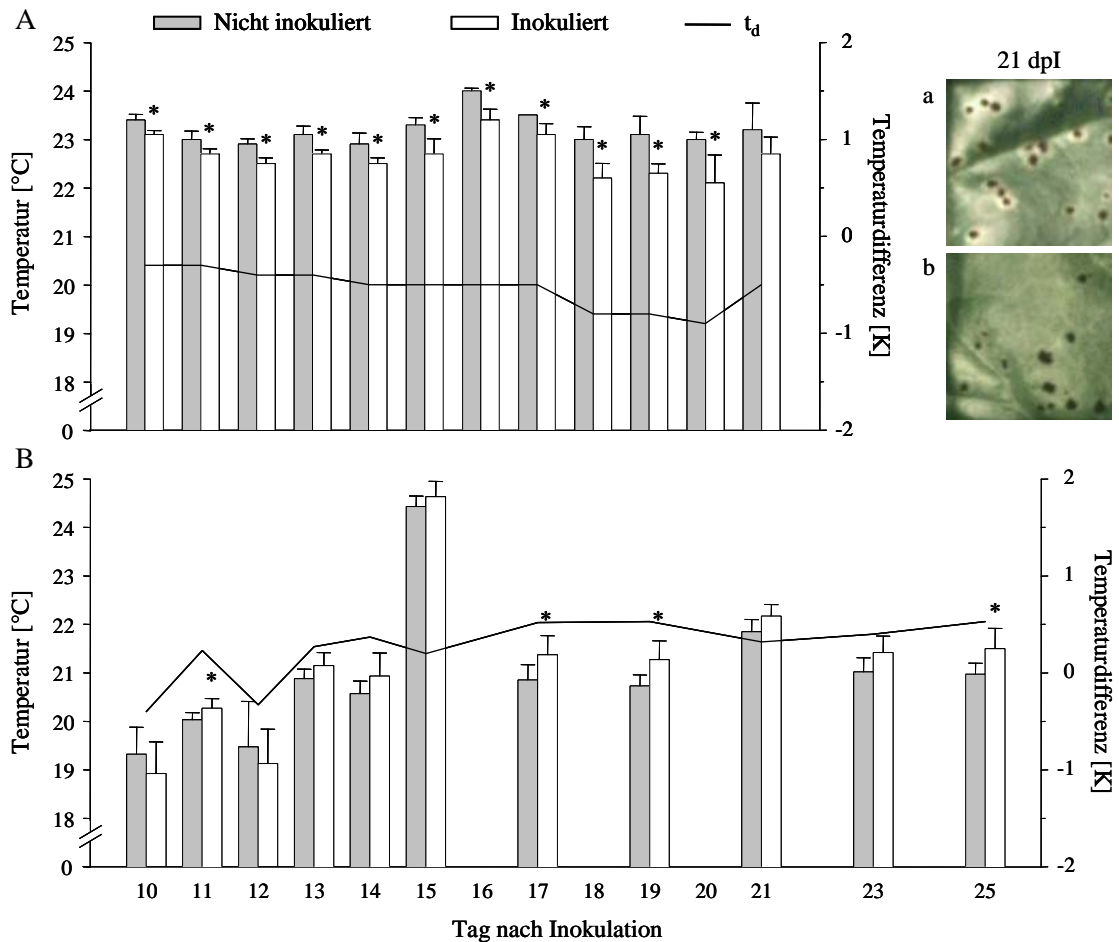


Abb. 3-36 Einfluss von *Uromyces betae* auf die durchschnittliche Temperatur und Temperaturdifferenz (t_d) von Zuckerrübenblättern der Sorte Nematop in den Versuchen A und B, sowie das Reifestadium der Pusteln am 21. Tag nach Inokulation (a, b) (* = inokulierte Variante unterscheidet sich signifikant von der nicht inokulierten nach t-Test; $p < 0,05$; T = Standardabweichung; A: $n = 6$ (inokuliert), $n = 4$ (nicht inokuliert); B: $n = 6$ (inokuliert/nicht inokuliert). Beide Versuche wurden mit derselben Thermokamera durchgeführt.

Signifikant verschieden zum nicht inokulierten, symptomfreien Gewebe war sie nur an Tag 21. Die Uredosporenlager waren von einem schwach sichtbaren kühleren Hof umgeben (Abb. 3-39, 15 dpI, T).

Die Ausdifferenzierung des Symptoms in ein Uredosporenlager und einen Hof war thermographisch mit dem 14. Tag nach Inokulation gekennzeichnet. An diesem Tag erwärmte sich das Zentrum der Chlorose um 0,06 K.

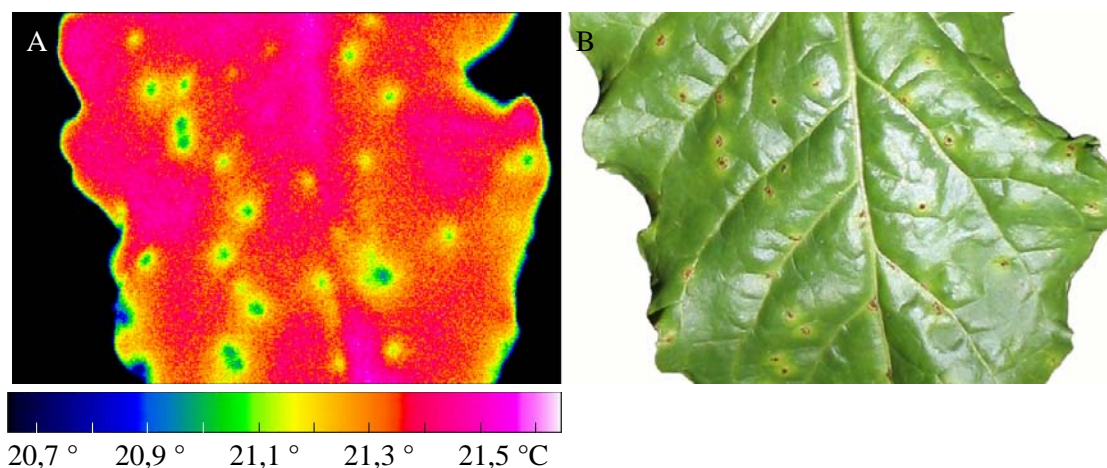


Abb. 3-37 Thermogramm (A) und Lichtbild (B) eines Zuckerrübenblattes der Sorte Nematop inokuliert mit *Uromyces betae*.

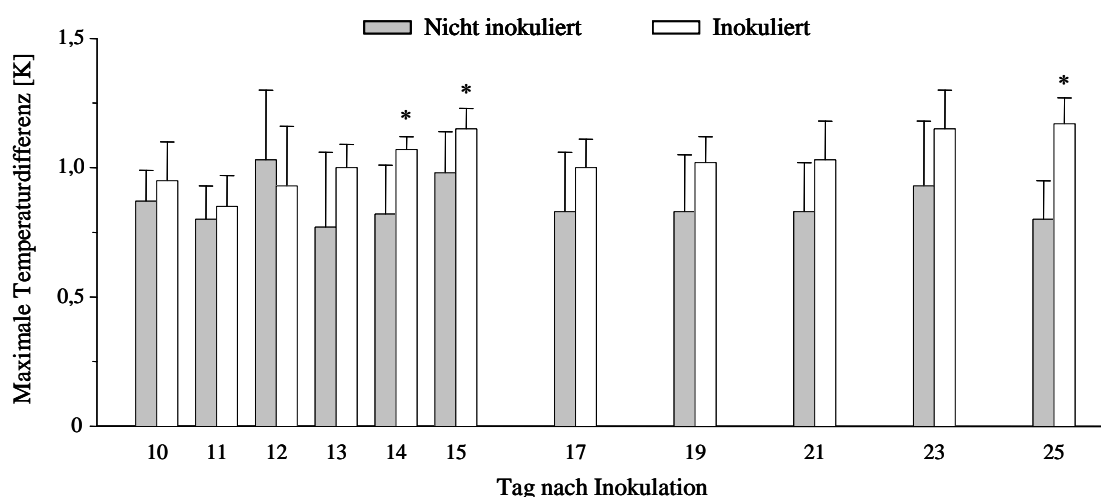


Abb. 3-38 Maximale Temperaturdifferenz (MTD) von Zuckerrübenblättern der Sorte Nematop inokuliert mit *Uromyces betae* und einer sichtbaren Anzahl von 4 Pusteln/cm² Blattfläche (* = inokulierte Variante unterscheidet sich signifikant von der nicht inokulierten nach t-Test; $p < 0,05$; T = Standardabweichung; $n = 6$).

Bis Tag 25 nach Inokulation stieg die Temperatur des Uredosporenlagers auf 0,2 K über die des Hofes an, unterschied sich von diesem aber nie signifikant. Der Hof unterschied sich wie das Uredosporenlager signifikant vom nicht inokulierten Blattgewebe, zum symptomfreien, nicht inokulierten Gewebe hingegen unterschied er sich nicht (Tab. 3-4).

Die Temperaturdifferenz zwischen Uredosporenlager und nicht inokuliertem Gewebe war fast 1 K größer als die zwischen Uredosporenlager und inokuliertem, symptomfreiem Gewebe (Abb. 3-40). Gleiches galt für die Temperaturdifferenzen bezüglich des Hofes. Die Differenz zwischen der entsprechenden Symptomausprägung und nicht

inokuliertem Blattgewebe war zwar deutlicher als zu inokuliertem, symptomfreien Blattgewebe, variierte aber bis zum 17. Tag nach Inokulation sehr stark.

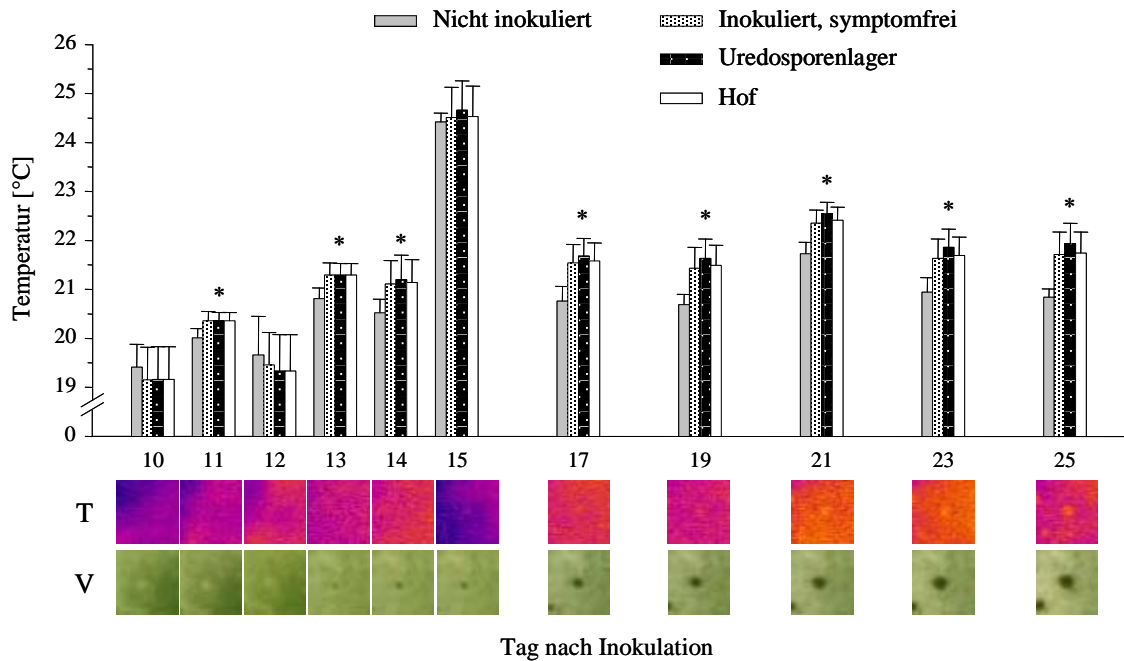


Abb. 3-39 Temperatur eines Uredosporenlagers und dessen Hof von Rostpusteln, verursacht durch *Uromyces betae* auf Zuckerrübenblättern der Sorte Nematop, im Vergleich zur Temperatur von nicht inokulierten Blättern und inokuliertem, symptomfreiem Blattgewebe. Thermogramme (T) und Videobilder (V) von der Entwicklung einer Rostpustel (* = Temperatur des Uredosporenlagers unterscheidet sich signifikant von der Temperatur nicht inokulierter Blätter nach t-Test; $p < 0,05$; T = Standardabweichung; $n = 16$).

Tab. 3-4 Übersicht der statistischen Analyse der Temperatur einer Rostpustel von *Uromyces betae* auf Zuckerrübenblättern der Sorte Nematop (* = signifikanter Unterschied in der Temperatur beider untersuchter Bereiche nach t-Test; $p < 0,05$; $n = 16$).

Untersuchte Bereiche	Tag nach Inokulation										
	10	11	12	13	14	15	17	19	21	23	25
Uredosporenlager/ inokuliertes, symptomfreies Blatt									*		
Hof/nicht inokuliertes Blatt		*		*	*		*	*	*	*	*

Die visuell sichtbare Größe einer Pustel übertraf an allen Tagen die im Thermogramm dargestellte Größe um mindestens 0,3 mm und maximal etwa 1 mm (Abb. 3-41). Mit der Thermokamera konnte kein Pustelhof nachgewiesen werden, so dass die Größe einer Pustel allein durch das Uredosporenlager bestimmt war. Dies war stets kleiner als

das Uredosporenlager im Videobild, wobei der Unterschied mit zunehmendem Alter der Pustel größer wurde. Der maximale Größenunterschied lag allerdings bei nur 0,48 mm am letzten Tag der Messungen.

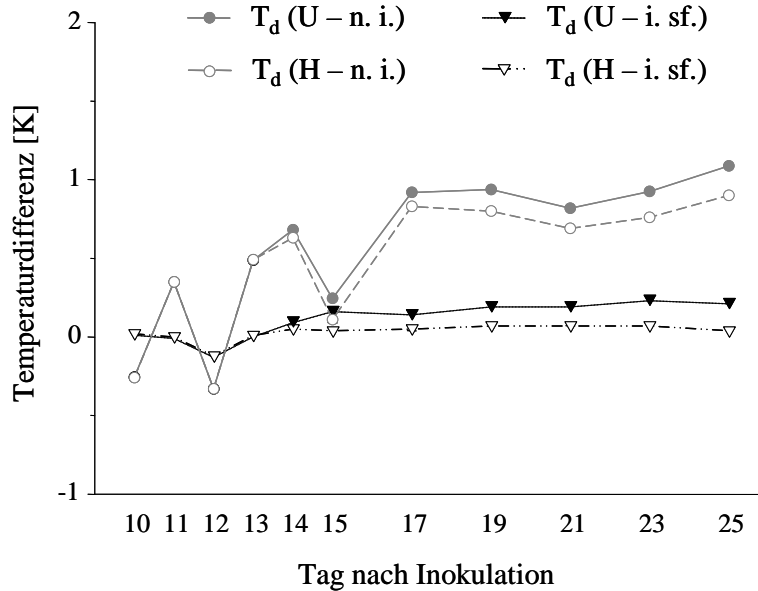


Abb. 3-40 Rostpusteln von *Uromyces betae* auf Zuckerrüben der Sorte Nematop: Temperaturdifferenzen zwischen Uredosporenlager (U) beziehungsweise Hof (H) und nicht inokuliertem Blattgewebe (n. i.) beziehungsweise inokuliertem, symptomfreiem Blattgewebe (i. sf.) (n = 16).

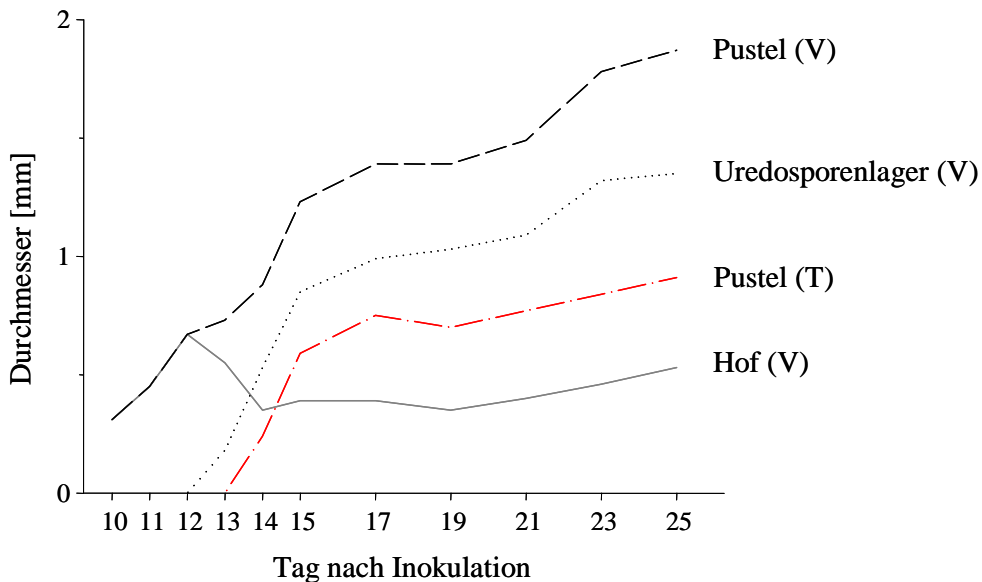


Abb. 3-41 Entwicklung einer Pustel von *Uromyces betae* auf Zuckerrübenblättern der Sorte Nematop, gemessen nach ihrer Größe im Thermogramm (T) und im Videobild (V) (n = 16).

3.2.3.3 Einfluss auf die Effektivität der Photosynthese

Rostpusteln führten zu einer lokalen Verringerung der Chlorophyllfluoreszenz FH. Dies war auf den Einfluss des Uredosporenlagers zurückzuführen. Mit dessen Entstehung erhöhte sich der Verhältniswert zu nicht inokuliertem Blattgewebe auf etwa 2,5 (Abb. 3-42). Im Schwarzweiß-Bild wurden die entsprechenden Pixel zunehmend dunkler. Der Unterschied dieses Verhältniswertes zum Wert 1 war an jedem Tag signifikant. Der Verhältniswert von inokuliertem, aber symptomfreiem Blattgewebe zum Uredosporenlager unterschied sich erst an Tag 14 vom Wert 1, an dem Tag, an welchem das Uredosporenlager deutlich sichtbar wurde. Die Verhältniswerte sowohl von nicht inokuliertem als auch inokuliertem, symptomfreiem Gewebe zum Hof der Rostpustel betragen stets einen Wert um 1. In den Schwarzweiß-Bildern war der Hof kaum sichtbar, tendenziell war er durch eine Aufhellung um das Uredosporenlager gekennzeichnet.

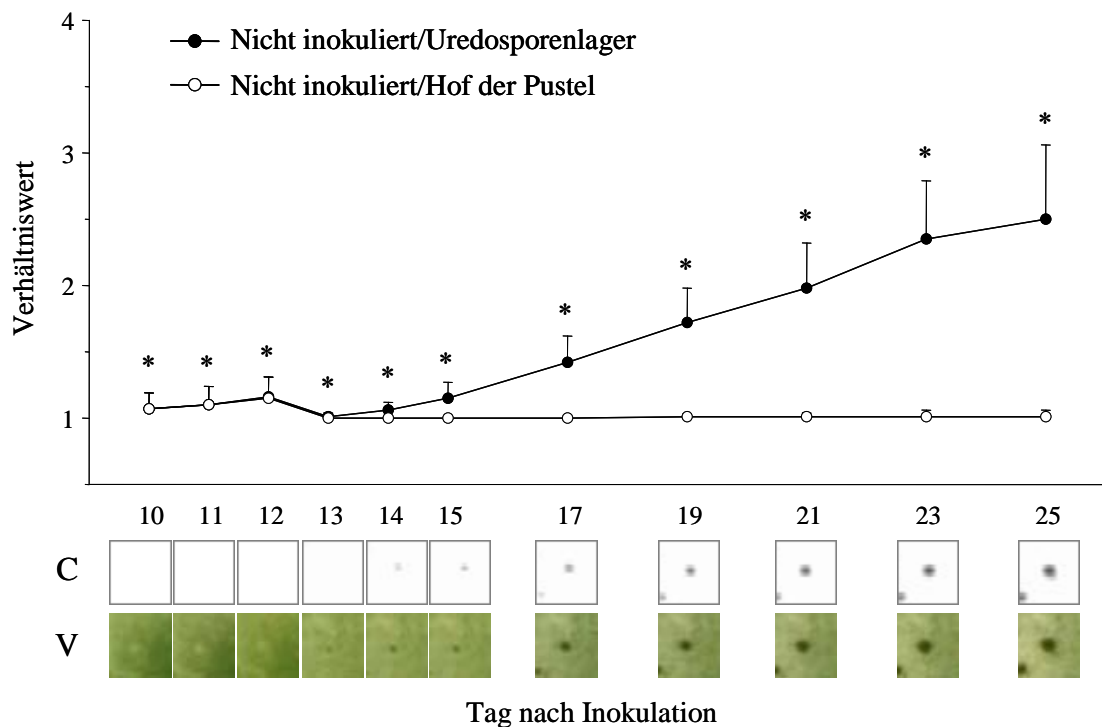


Abb. 3-42 Einfluss von Rostpusteln verursacht durch *Uromyces betae* auf die Chlorophyllfluoreszenz FH von Zuckerrüben der Sorte Nematop dargestellt als Verhältniswerte in den Relationen nicht inokuliertes Blattgewebe/Uredosporenlager und nicht inokuliertes Blattgewebe/Hof. Hohe Verhältniswerte weisen auf eine geringe FH hin. Schwarzweiß-Bilder zur Darstellung der FH (C) und Videobilder (V) von der Entwicklung einer Rostpustel (* = die Verhältniswerte der Relationen zwischen nicht inokuliertem Blattgewebe/Uredosporenlager und dem Verhältniswert 1 unterscheiden sich signifikant nach t-Test; $p < 0,05$; T = Standardabweichung; $n = 16$).

Die Ausdehnung einer im Verhältnis zum umgebenden Blattgewebe geringeren FH durch eine Infektion mit *U. betae* war in den Schwarzweiß-Bildern anfangs sehr gering. Dann nahm die betroffene Fläche innerhalb weniger Tage erst stark, später langsamer zu (Abb. 3-43). Der Hof trug zur Größe einer Rostpustel im Schwarzweiß-Bild kaum bei. Lediglich kurz vor und während des anfänglichen Wachstums des Uredosporenlagers und zum Ende der Messungen konnte die Größe des Hofes auch im Schwarzweiß-Bild gemessen werden. Die Ausdehnung der erhöhten FH entsprach nicht der Größe des visuell sichtbaren Hofes, sondern war durchschnittlich 0,4 mm geringer. Dagegen war der Bereich geringer FH im Zentrum der Pustel in etwa gleich groß wie das Uredosporenlager in den Videoaufnahmen. Die Ausdehnung der im Verhältnis zum symptomfreien Blattgewebe veränderten FH war insgesamt etwa 0,4 mm kleiner mit einem Maximum von 0,6 mm am 12. und 13. Tag nach Inokulation, kurz vor dem Erscheinen des Uredosporenlagers.

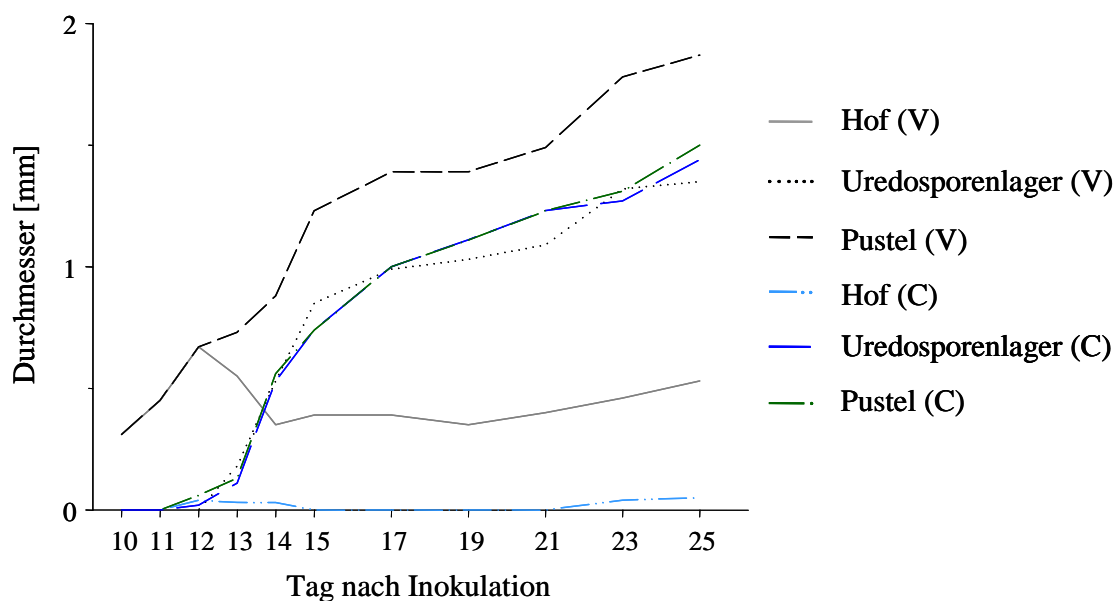


Abb. 3-43 Durchmesser einer Pustel von *Uromyces betae*, ihres Uredosporenlagers und ihres Hofes, auf Zuckerrübenblättern der Sorte Nematop, gemessen nach ihrer Größe im Schwarzweiß-Bild (C) zur Darstellung der Chlorophyllfluoreszenz FH und im Videobild (V) (n = 16).

3.2.4 Sensorenpotential zur präsymptomatischen Erfassung von Infektionen

Cercospora-Blattflecken waren im Thermogramm stets früher nachweisbar als in Videoaufnahmen, außer an Tag zwei und drei nach der Inokulation (Abb. 3-44).

Während 1 mm große Blattflecken neun Tage nach Inokulation als punktuelle Bereiche höherer Temperatur im Gegensatz zum umliegenden Gewebe im Thermogramm sichtbar waren, erschienen sie erst einen Tag später im Videobild. Mittels Chlorophyllfluoreszenz konnten Blattflecken früher als mit den anderen Sensoren nachgewiesen werden (Abb. 3-44). Für 1 mm große Blattflecken betrug der Unterschied zum Nachweis per Videobild vier Tage.

Bei Rostpusteln durch *U. betae* lagen mindestens vier Tage zwischen dem ersten visuell sichtbaren Symptom und dem Erreichen der gleichen Größe im Thermogramm. War eine Pustel 13 Tage nach der Inokulation 0,7 mm groß, so waren sie erst am 17. Tag nach Inokulation im Thermogramm genauso groß (Abb. 3-44). Zum Ende der Messungen hatten die Pusteln bei der visuellen Diagnose bereits eine Größe von fast 2 mm, im Thermogramm erstreckte sich die Temperaturveränderung nicht einmal auf 1 mm. Die Zeitspanne, in welcher die Pusteln die gleiche Größe im Schwarzweiß-Bild erreicht hatten, betrug dagegen nur drei Tage. Ab einer Größe von 1 mm dauerte es aber länger, bis die Pusteln in den Schwarzweiß-Bildern die gleiche Größe hatten wie in den Videoaufnahmen.

Diese Ergebnisse zeigten zum einen, dass *Cercospora*-Blattflecken durch beide Sensoren vor dem Erscheinen visuell sichtbarer Symptome detektiert werden konnten, im Gegensatz zu Rostpusteln. Der Sensor zur Messung der Chlorophyllfluoreszenz FH war zur Detektion von Symptomen bei beiden Krankheiten besser geeignet als die Thermokamera. Echter Rübenmehltau ließ sich durch Chlorophyllfluoreszenz nicht, und thermographisch nur durch einen Sensor darstellen.

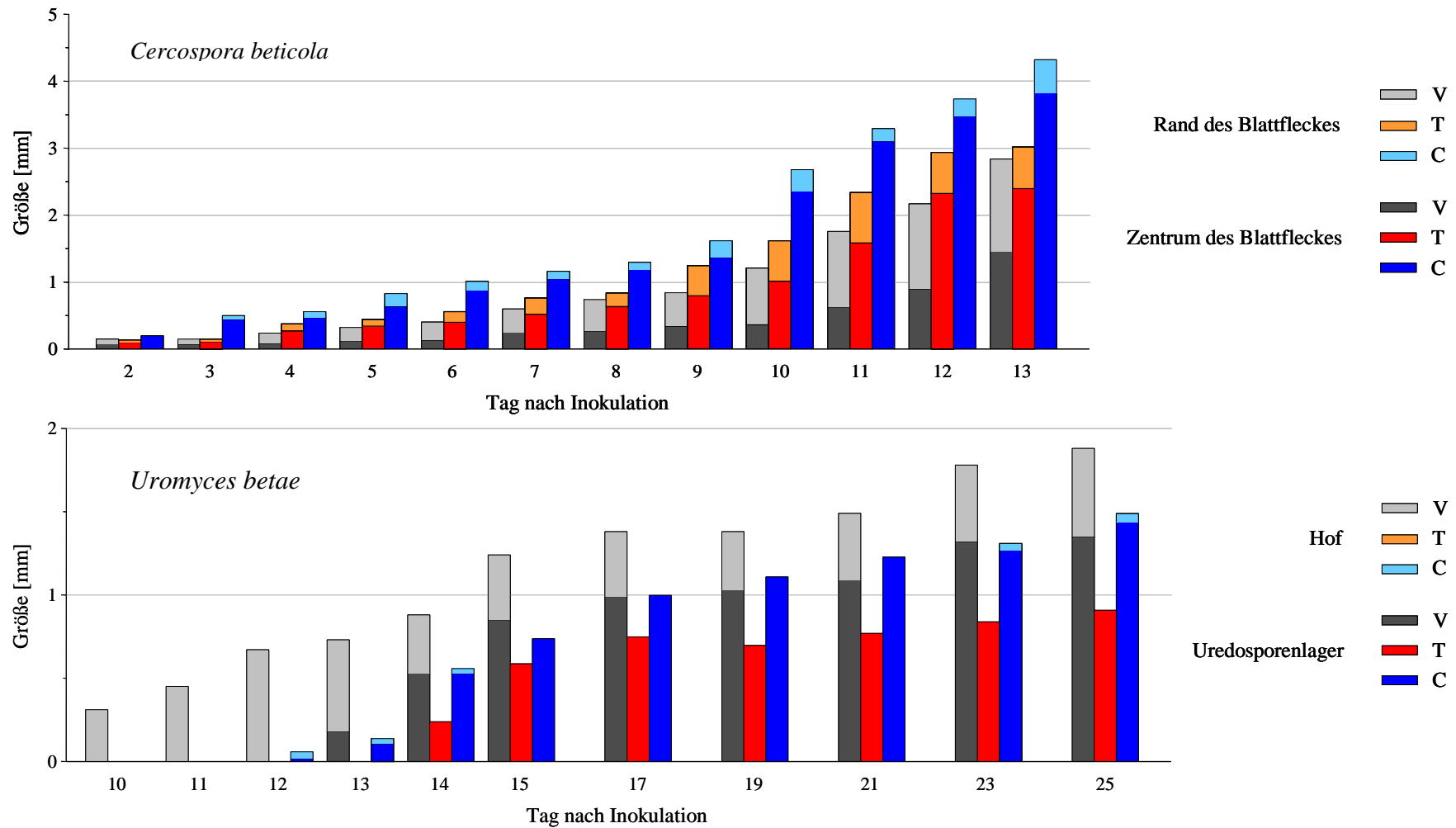


Abb. 3-44 Größe der Symptome einer Infektion mit *Cercospora beticola* beziehungsweise *Uromyces betae* auf Zuckerrübenblättern der Sorte Nematop, gemessen nach ihrer Größe im Videobild (V), Thermogramm (T) und in der Chlorophyllfluoreszenz (C) (n = 16).

3.3 Sensorgestützte Darstellung und Beurteilung der Heterogenität von Zuckerrübenbeständen

Die Versuchsfelder und Zuckerrübenbestände sollten bezüglich ihrer Heterogenität beurteilt werden. Der Schwerpunkt lag auf der Aussagekraft von Thermogrammen.

3.3.1 Einfluss des Bodens und der Topographie

Hier sollte auf die Bodenfaktoren und die Topographie, welche bei den Versuchsfeldern vorgefunden worden sind, und für die Beurteilung der Heterogenität von Bedeutung waren, eingegangen werden.

Der Standort Poppelsdorf hat einen einheitlichen Lehmboden mit der Bodenzahl 77. Das Feld ist eben und im Nordwesten von einer lichten Baumallee begrenzt. Es konnte thermographisch in einen kühlen Bodenbereich in der südöstlichen Ecke und einen wärmeren im Nordwesten unterteilt werden (Abb. 3-45, A). Die durchschnittlichen Temperaturen beider Bereiche unterschieden sich um 2,0 K. Eine visuelle Überprüfung der Bodenverhältnisse deutete auf stellenweise Verdichtungen in diesem Bereich des Feldes hin (Abb. 3-45, B).

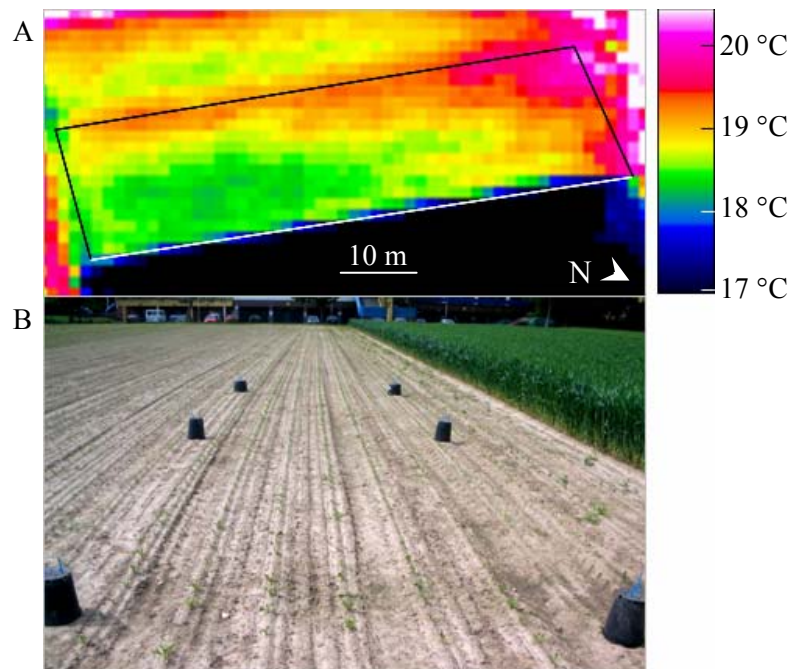


Abb. 3-45 Versuchsfeld Poppelsdorf am 12.05.2005: Thermogramm mit einem Temperaturniveau von 18,7 °C und einem Temperaturbereich von 3,5 °C (A), sowie ein Lichtbild des Bodens in der südöstlichen Ecke des Feldes (B). Die dunkle Schattierung in der unteren Hälfte des Bildes deutet auf Bodenverdichtung hin.

E_{Ca}-Werte < 8,9 mS/m wurden an Stellen gemessen, an denen die Oberflächentemperatur niedrig war (Abb. 3-46). Mit höheren Temperaturen waren dagegen E_{Ca}-Werte von ≥ 8,9 mS/m verbunden. Die Spannweite innerhalb des Feldes lag bei 15,5 mS/m.

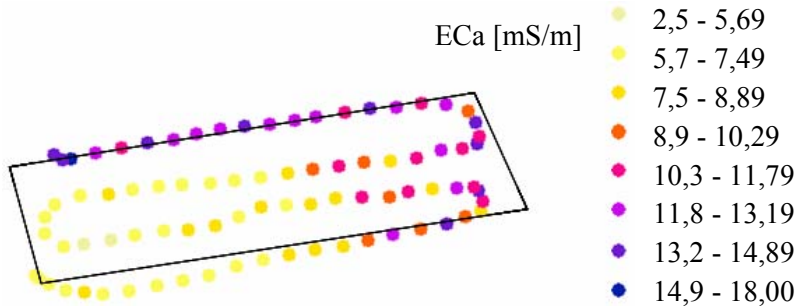


Abb. 3-46 Karte der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit (E_{Ca}) des Bodens vom Versuchsfeld Poppelsdorf vom 25.01.2006.

Der Boden des Versuchsfeldes Klein-Altendorf besteht aus Lehm und hat eine Bodenzahl von 86. Es konnten keine markanten Bodenunterschiede festgestellt werden (Abb. 3-47, A). Das Feld war eben, von 182 m im Südwesten auf 180,5 m im Nordosten abfallend. Es wurde auf keiner Seite beschattet, noch war es windgeschützt. Die Schattierungen im Lichtbild rührten von Bewölkung am Aufnahmetag her. Erst die Thermogramme zeigten, dass die Bodeneigenschaften heterogen waren. In nördlicher bis südlicher Richtung verlief ein etwa 40 bis 60 m breiter Streifen geringerer Temperatur zwischen Bereichen höherer Temperatur (Abb. 3-47, B). Die kühlere Fläche unterschied sich von den beiden wärmeren um nur 0,45 K. Die Differenz zwischen der höchsten und der niedrigsten im Feld gemessenen Temperatur war 1,56 K. Der Boden in der mittleren Feldregion war im Gegensatz zu den anderen Bereichen verdichtet.

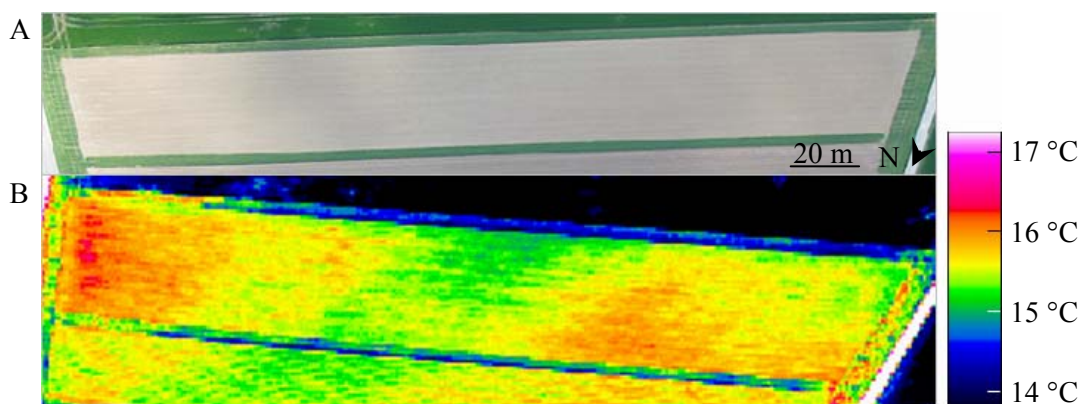


Abb. 3-47 Luftaufnahmen vom Versuchsfeld Klein-Altendorf am 12.05.2005: Lichtbild (A) und Thermogramm mit einem Temperaturniveau von 15,6 °C und einem Temperaturbereich von 3,5 °C (B).

Auch bei der ECa wurde eine Unterteilung des Feldes in einen mittleren Bereich mit geringen Messwerten, umgeben von Bereichen mit höheren deutlich (Abb. 3-48). Die beiden Bereiche unterschieden sich um maximal 28,3 mS/m. Beim Vergleich beider Bodenkarten war eine Ähnlichkeit vorhanden, jedoch stimmte die Ausprägung der Bodenheterogenität im Thermogramm nicht genau mit der Verteilung der ECa überein. Der Bereich mit ECa-Werten $< 19,2$ mS/m war vor allem dort vorzufinden, wo die Oberflächentemperatur gering war. Er war jedoch weniger stark abgegrenzt, und stärker in östliche statt in südwestliche Richtung ausgedehnt.

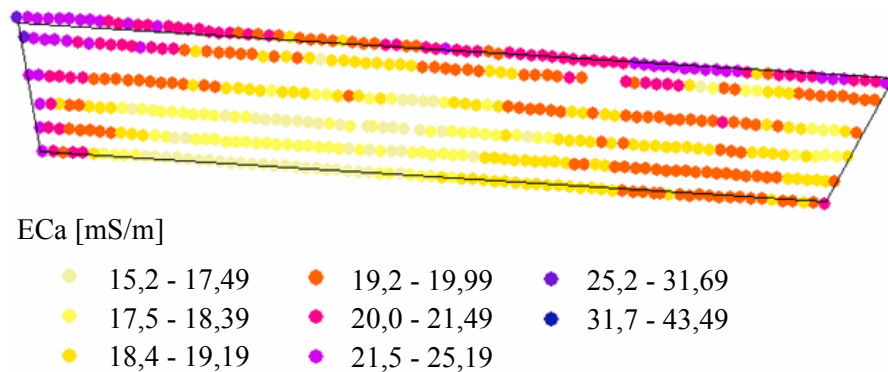


Abb. 3-48 Georeferenzierte Karte der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit (ECa) des Bodens vom Versuchsfeld Klein-Altendorf vom 16.04.2007.

Lehm war die vorherrschende Bodenart auf dem Versuchsfeld Frankenforst (Abb. 3-49). Im südlichen Teil auf etwa der Hälfte der gesamten Feldlänge erstreckte sich ein nach Norden hin exponierter Hang, leicht abfallend von 185 m auf 180 m. Hier war die Bodenqualität mit 58 und 60 am höchsten. In der nördlichen Feldhälfte kam der Trachyttuff des Untergrundes nah an die Oberfläche. Auf einer Länge von circa 40 m war der Boden aufgrund starker Verwitterung des Trachyttuffs tonig, und Wasser versickerte bei Niederschlägen nur langsam. Dies wurde zusätzlich dadurch begünstigt, dass es der tiefstgelegene Teil des Feldes war. Im Anschluss an die Senke folgte ein nach Süden exponierter Hang, der bis auf 185 m über Normalnull (NN) reichte. Hier war der Trachyttuff weniger stark verwittert und der Boden kiesig. Die Bodenzahl betrug 42 bis 46.

Diese starken Bodenunterschiede waren bei der Luftaufnahme kaum, im Thermogramm dagegen deutlich sichtbar (Abb. 3-50, A, B). Der mittlere Feldbereich war der kühlfte. Er hatte eine um durchschnittlich 1 K niedrigere Temperatur als Bereich 1. Der nördliche Teil des Feldes war am wärmsten und unterschied sich um 0,58 K von

Bereich 1 und um 1,65 K von Bereich 2, mit Ausnahme des nördlichen Feldendes, welches ebenso kalt war wie die Senke. Die maximale Temperaturdifferenz innerhalb des Feldes war 2,83 K.

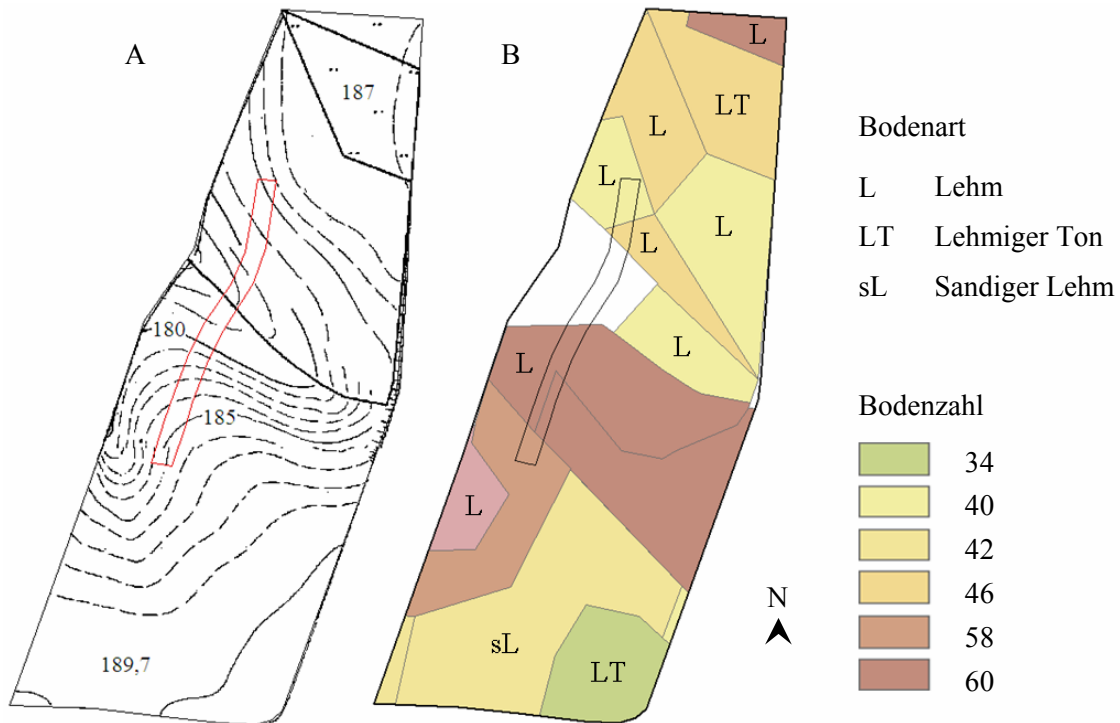


Abb. 3-49 Georeferenzierte Karte vom Versuchsfeld Frankenforst 2005: Topographie mit Angabe der Höhe über NN [m] (A), Bodenart und Bodenzahl (B). Das Versuchsfeld im Jahr 2006 ist durch eine rote (A) bzw. schwarze Linie (B) begrenzt (Quellen: www.geoserver.nrw.de (A), PFEIFFER et al., 2005 (B)).

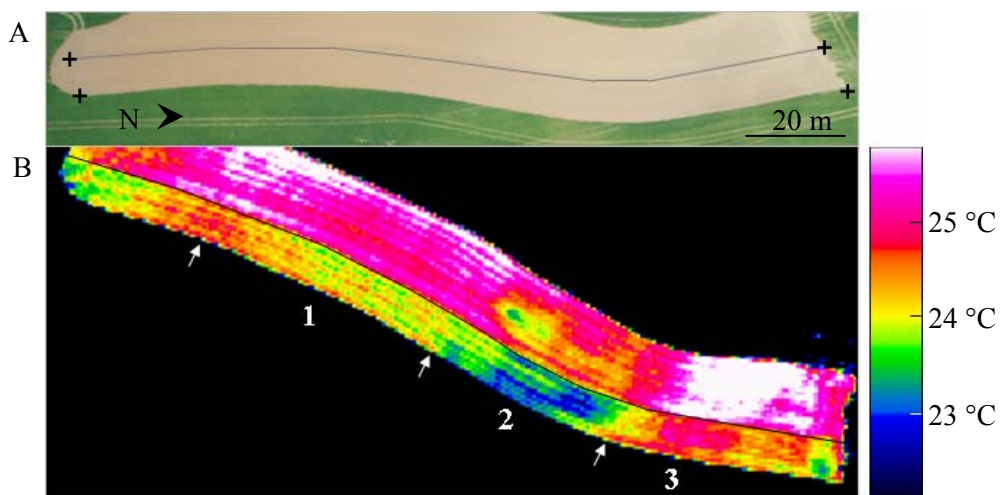


Abb. 3-50 Luftaufnahmen vom Versuchsfeld Frankenforst am 05.05.2006 (gekennzeichnet durch +): Lichtbild (A) und Thermogramm mit einem Temperaturniveau von 23,9 °C und einem Temperaturbereich von 3,5 °C (B).

Auch die Karte der ECa gab diese Bodenheterogenität wieder (Abb. 3-51). Hier war die Differenz zwischen dem niedrigsten und höchsten Wert 84,9 mS/m.

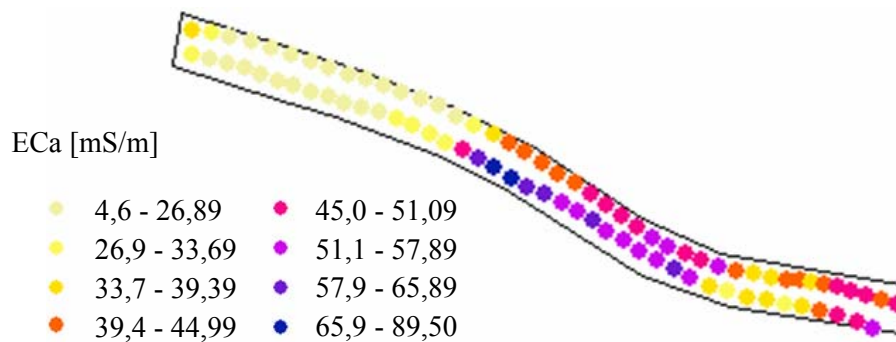


Abb. 3-51 Georeferenzierte Karte der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit (ECa) des Bodens vom Versuchsfeld Frankenforst vom 14.12.2004.

Das Temperaturmuster wurde von der ECa genauer wiedergegeben als in Klein Altdorf. Regionen mit kühlen Oberflächentemperaturen hatten eine höhere ECa als Bereiche mit hohen Temperaturen. Unterschiede der Bodeneigenschaften waren sowohl bei der Temperatur als auch bei der ECa in Frankenforst stärker ausgeprägt als in Klein Altdorf.

Deutliche Heterogenitäten zeigten sich auch auf dem Dikopshof. Hier verliefen verschiedene Bodenbereiche nahezu parallel von Nordost nach Südwest (Abb. 3-52, B). Das Feld erstreckte sich über 4,5 Höhenmeter auf einem nach Südosten exponierten Hang, an seinem Fuß von einer Pappelallee begrenzt (Abb. 3-52, A). Die untere Hälfte war steil, die obere nahezu eben. Auf der Kuppe und in der westlichen Ecke war der Boden lehmig und hatte mit 81 die höchste Bodenzahl. In Richtung der Senke nahm sie auf 40 ab, die Bodenart war lehmiger Sand. In der Senke herrschte stark lehmiger Sand mit einem Wert von 58 vor. Innerhalb des Versuchsfeldes hatte der steilste Teil demnach die ungünstigste Bodenart und zugleich die geringste Bodenzahl.

Diese Zonierung war gut im Luftbild erkennbar (Abb. 3-53, A). Im Thermogramm waren Temperaturunterschiede des Bodens deutlich sichtbar (Abb. 3-53, B). Die Temperaturen in der westlichen Feldecke, einer begrenzten Region in der Mitte und am nordöstlichen Rand waren im Durchschnitt 0,92 K niedriger als in den übrigen Regionen. Der mittlere Teil im Südwesten des Feldes hatte stets die höchste, der Streifen an der unteren Grenze die niedrigste Temperatur. Die Differenz zwischen dem im Feld gemessenen Maximal- und Minimalwert betrug durchschnittlich 3,58 K.

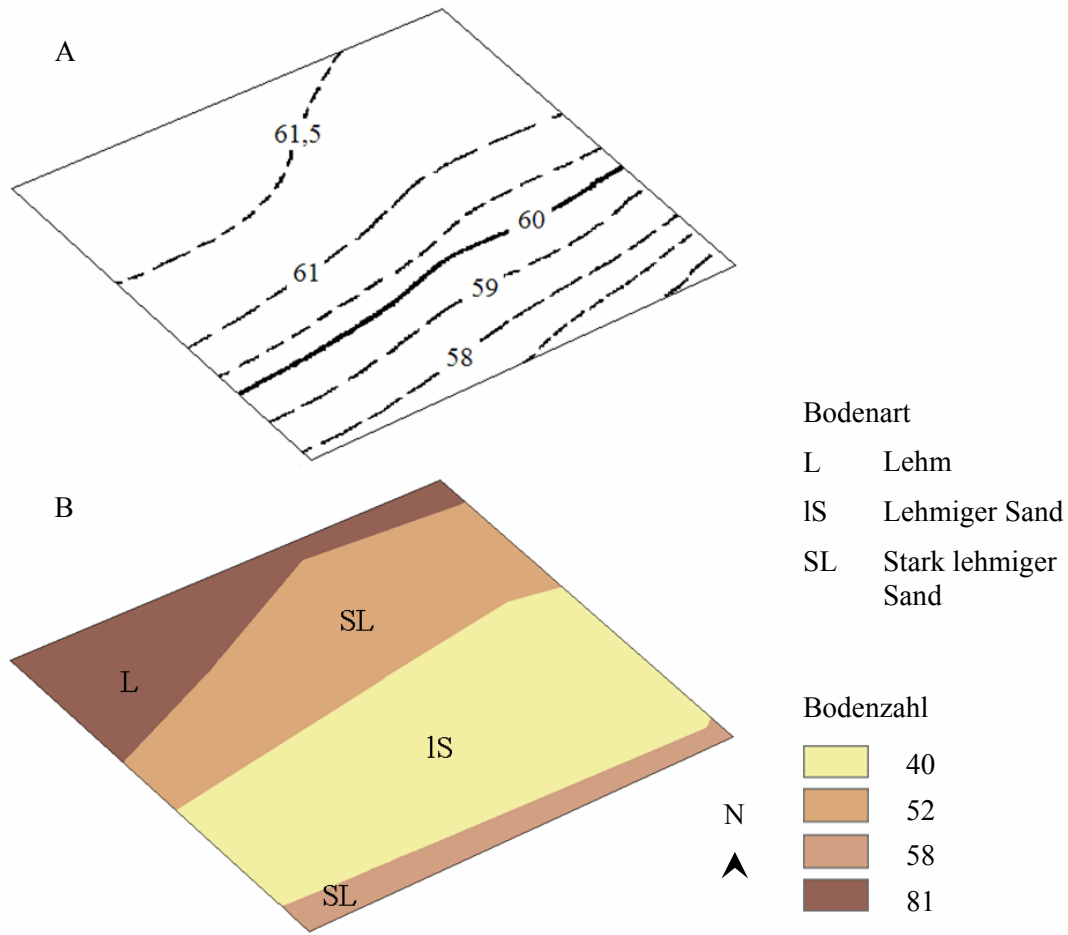


Abb. 3-52 Georeferenzierte Karte vom Versuchsfeld Dikopshof im Jahr 2006: Topographie mit Angabe der Höhe über NN [m] (A), Bodenart und Bodenzahl (B) (Quellen: www.geoserver.nrw.de (A), Anonym, Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen (B)).

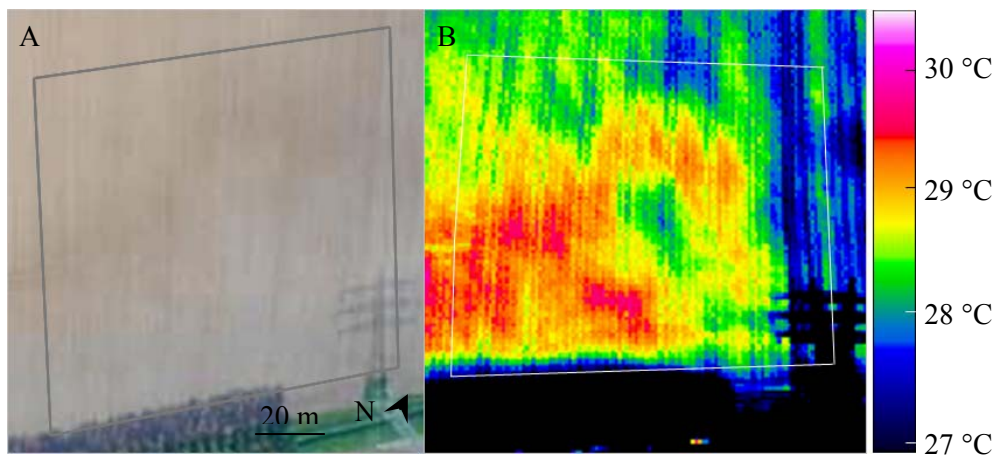


Abb. 3-53 Luftaufnahmen vom Versuchsfeld Dikopshof: Lichtbild von 1993 (A) und Thermogramm vom 05.05.2006 mit einem Temperaturniveau von 28,7 °C und einem Temperaturbereich von 3,5 °C (B).

Die ECa war mit dem Muster des Bodens und der Oberflächentemperatur identisch. In

Bereichen fruchtbaren Bodens und niedriger Temperatur war sie höher als in den anderen (Abb. 3-54). Die Differenz zwischen dem höchsten und dem niedrigsten Wert im Feld war 15,3 mS/m, also mit dem in Poppelsdorf der geringste von allen Standorten.

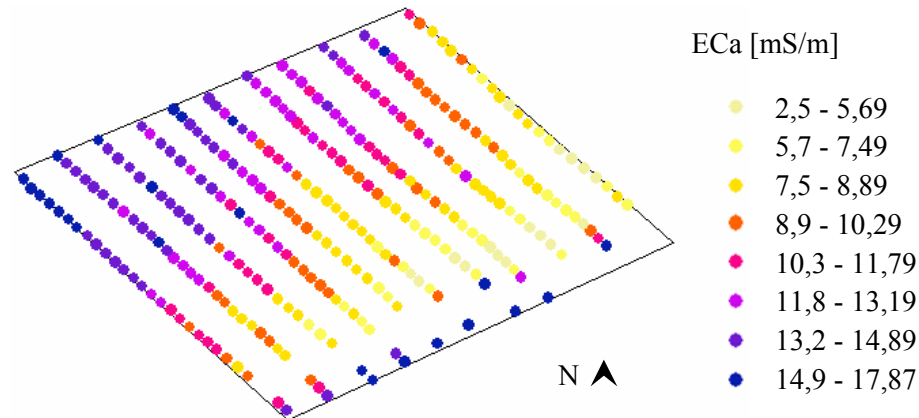


Abb. 3-54 Georeferenzierte Karte der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit (ECa) des Bodens vom Versuchsfeld Dikopshof vom 4.1.2005.

3.3.2 Bestandesdichte und -vitalität als Indikator für Heterogenität

Die Anzahl der Pflanzen pro Quadratmeter und ihre Vitalität können in verschiedenen Regionen eines Feldes unterschiedlich hoch sein. Wie der Boden ist auch die Bestandesdichte ein möglicher Indikator für Heterogenität. Eine geringe Vitalität der Pflanzen kann zu geringer Bestandesdichte führen. In diesem Abschnitt sollte aufgezeigt werden, wie die Dichte und Vitalität innerhalb gesunder Bestände variierte, und ob sie mit den Bodeneigenschaften und der Topographie zusammenhängen.

Trotz homogener Bodeneigenschaften wuchsen die Pflanzen in Poppelsdorf nicht gleich gut. Digitale, thermische und multispektrale Luftaufnahmen vom 28.06.2005 zeigten noch vor Bestandesschluss eine Unterteilung in mehr und weniger gut entwickelte Bestandsbereiche mit einer entsprechend hohen und geringen Dichte (Abb. 3-55, A). Auf Basis dieser Zonierung wurden acht Parzellen ausgewählt und während der Vegetationsperiode regelmäßig auf Krankheitsbefall bonitiert und mit der Thermographiekamera aufgenommen (Abb. 3-55, A, B). Parzelle 1 lag im Bereich, wo das Rübenwachstum aufgrund verdichteten Bodens am schwächsten war und die Pflanzen zum Zeitpunkt der Bonitur maximal elf Blätter aufwiesen. Im Bereich des Vorgewendes wurden ähnliche Verhältnisse vorgefunden. Sie wiesen die höchste Temperatur auf, und im Multispektralbild waren sie dunkelrot, ein Hinweis auf die geringere

Vitalität des Bestandes (Abb. 3-55, C). Die Parzellen 2 bis 4, 6 und 7 lagen in Bereichen mit moderatem Rübenwachstum mit einer durchschnittlichen Anzahl von 16 Blättern. Die Oberflächentemperatur war geringer, die Vitalität der Pflanzen größer als von Parzelle 1. Bestes Wachstum mit circa 20 Blättern pro Pflanze war an der nordöstlichen und nordwestlichen Längsseite in den Parzellen 5 und 8 möglich. Die Bestandstemperatur war etwa 5 °C niedriger als im Bereich des schwächsten und 3 °C niedriger als in dem mit mittlerem Rübenwachstum. Die intensiv rote Färbung im Multispektralbild wies auf eine hohe Chlorophyllkonzentration hin. Es war kein deutlicher Zusammenhang zwischen der Oberflächentemperatur des Bodens und der des Bestandes erkennbar. Einige verdichtete Bereiche, in denen die Bodentemperatur gering war, wiesen eine höhere Temperatur auf. Die Heterogenität des Bestandes blieb bis zum Ende der Vegetationsperiode bestehen.

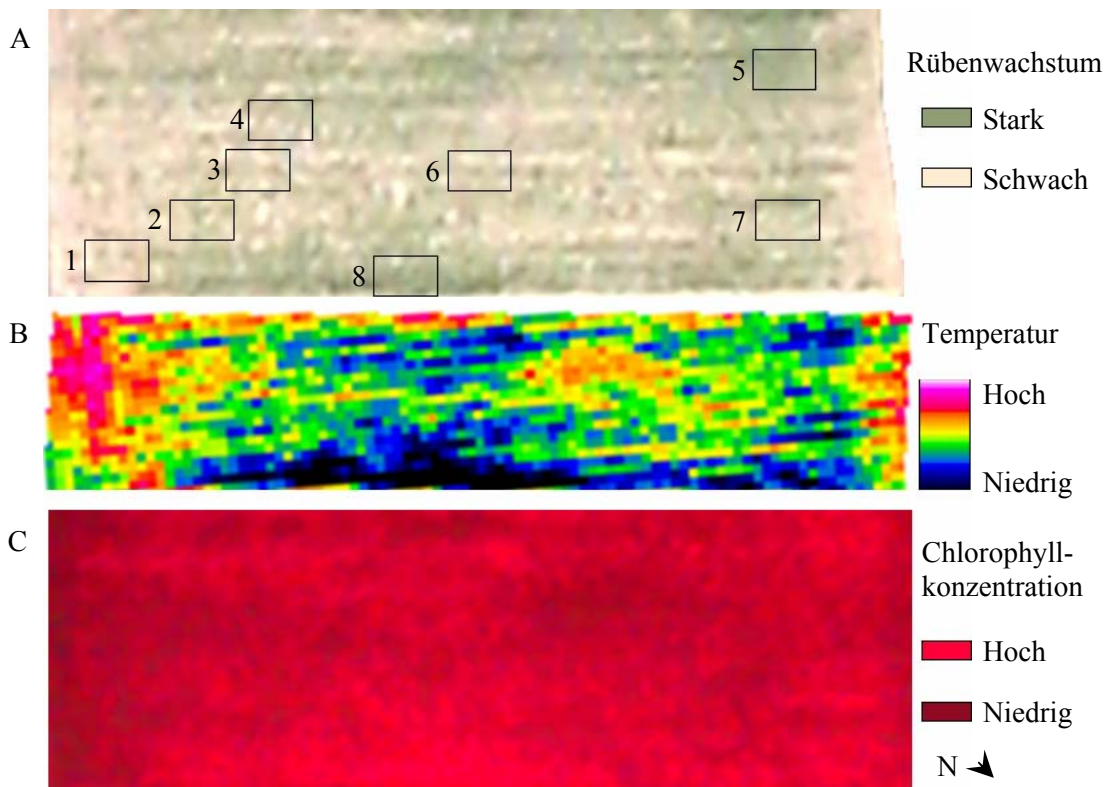


Abb. 3-55 Lichtbild (A), Thermogramm (B) und Multispektralbild (C) vom Versuchsfeld Poppelsdorf am 28.06.2005 vor Bestandesschluss, und Auswahl der Parzellen aufgrund der Bestandesdichte.

Das Rübenwachstum in Klein-Altendorf war relativ homogen (Abb. 3-56, A). Innerhalb des kühleren Temperaturbereiches des Bodens war die Entwicklung der Pflanzen nur zu Beginn der Vegetationsperiode verzögert. Am nordöstlichen Feldende waren

die Rüben bis auf einen Bereich, in dem die Saat nicht aufgegangen war, am besten entwickelt. Am gegenüberliegenden Ende war der Bestand teilweise lückig und verunkrautet. Die Unterschiede zwischen den Bereichen waren aber gering. Kurz nach Bestandesschluss war ein geringer Befall mit *Erysiphe betae* zu beobachten. Zu diesem Zeitpunkt war auch die Oberflächentemperatur des Bestandes einheitlich (Abb. 5-56, B), die MTD war 1,8 K. Nur an der östlichen Schmalseite war die Temperatur im Verhältnis zum Durchschnitt des übrigen Feldes um 0,4 K erhöht. Die Chlorophyllkonzentration war über das Feld gleichmäßig verteilt (Abb. 3-56, C). Vier Sensoren maßen an Standorten im mittleren und östlichen Teil des Feldes vom 5.08. bis 20.10.2005 die relative Luftfeuchtigkeit im Bestand (Abb. 3-56, A). Der Sensor am Standort 4 stand in einem Bereich mit verdichtetem Boden.

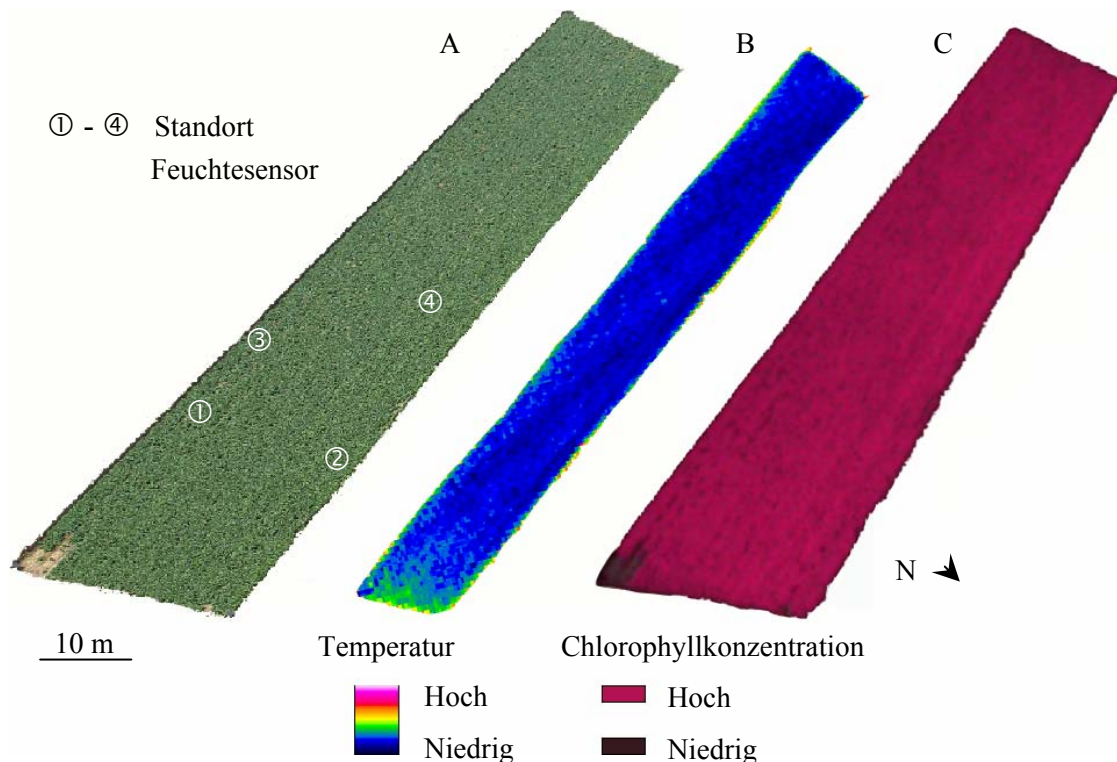


Abb. 3-56 Lichtbild (A), Thermogramm (B) und Multispektralbild (C) vom Versuchsfeld Klein-Altendorf am 18.08.2005 nach Bestandesschluss.

Die durchschnittliche relative Feuchtigkeit aller Sensoren war 27 % (Abb. 3-57). Der Median lag zwischen 8 % und 18 %. Nur die Standorte 2 und 4 unterschieden sich signifikant voneinander. An beiden Standorten wurde die geringste relative Feuchtigkeit gemessen.

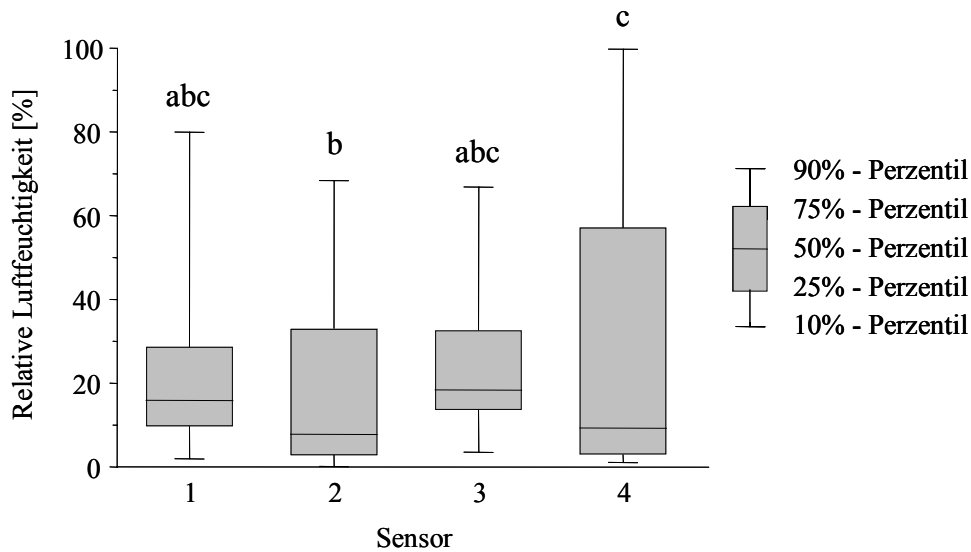


Abb. 3-57 Relative Luftfeuchtigkeit im Zeitraum vom 5.08.2005 bis 20.10.2005 an vier Standorten im Versuchsfeld Klein-Altendorf (verschiedene Buchstaben kennzeichnen einen signifikanten Unterschied nach t-Test; $p < 0,05$).

Der Boden am Standort Frankenforst war am heterogensten. Mitte Juli war der gesunde Bestand deutlich in Bereiche schlechteren und besseren Rübenwachstums unterteilt (Abb. 3-58, A; Abb. 3-59, A - E). Die Pflanzen entwickelten sich am besten auf der Kuppe im Süden und nördlich im Anschluss an die Senke, in den Bereichen, in welchen die Bodenzahlen am höchsten waren (Abb. 3-58, A, ① und ④; Abb. 3-59, A und D). Auf der nördlichen Kuppe war der Bestand uneinheitlich, bestehend aus Pflanzen im Jugend- als auch im Rosettenstadium (Abb. 3-58, A, ⑤; Abb. 3-59, E). Im Thermogramm war das uneinheitliche Wachstum durch Pixel in Rottönen direkt neben solchen in Blau- und Grüntönen gekennzeichnet (Abb. 3-58, B). Teilweise schon im Bereich der Senke war der Bestand noch gut entwickelt, und wie in ① und ④ bereits geschlossen (Abb. 3-58, A, ②; Abb. 3-59, B). Am wenigsten entwickelt war der Bestand in der Senke (Abb. 3-58, A, ③). Die Pflanzen befanden sich noch in der Jugendentwicklung (Abb. 3-59, C). Die Oberflächentemperatur verhielt sich entsprechend dem Entwicklungszustand des Bestandes und nahm graduell vom Bereich mit dem besten Pflanzenwachstum zum Bereich mit dem schlechtesten beziehungsweise inhomogensten Wachstum um 7 K zu (Abb. 3-58, B).

Einen Monat später, bei minimalem Befall durch *Cercospora beticola* ohne Einfluss auf die Pflanzenentwicklung, waren die Bestandesunterschiede weniger deutlicher ausgeprägt (Abb. 3-58, C). In Bereich ① war der Bestand nach wie vor am besten entwickelt (Abb. 3-59, F), unterschied sich bezüglich des Pflanzenwachstums aber nur

minimal von den Bereichen ② und ④ (Abb. 3-59, G und I). Seine durchschnittliche Oberflächentemperatur lag nur 0,1 K höher als die der beiden anderen (Tab. 3-5). In den Zonen ③ und ⑤ war der Bestand noch nicht geschlossen, und ihre Temperatur lag 0,2 K über der von Bereich ① (Tab. 3-5). Allerdings unterschieden sich beide Bereiche hinsichtlich ihres Pflanzenwachstums dahingehend, dass es in ③ einheitlich schlecht, und in ⑤ nach wie vor uneinheitlich war, mit teilweise sehr gut entwickelten Pflanzen. Der maximale Unterschied zwischen dem kältesten und dem wärmsten Bereich war nur 0,2 K (Abb. 3-58, D). Die Chlorophyllkonzentration war dort, wo die Temperatur niedrig war am höchsten (Abb. 3-58, E).

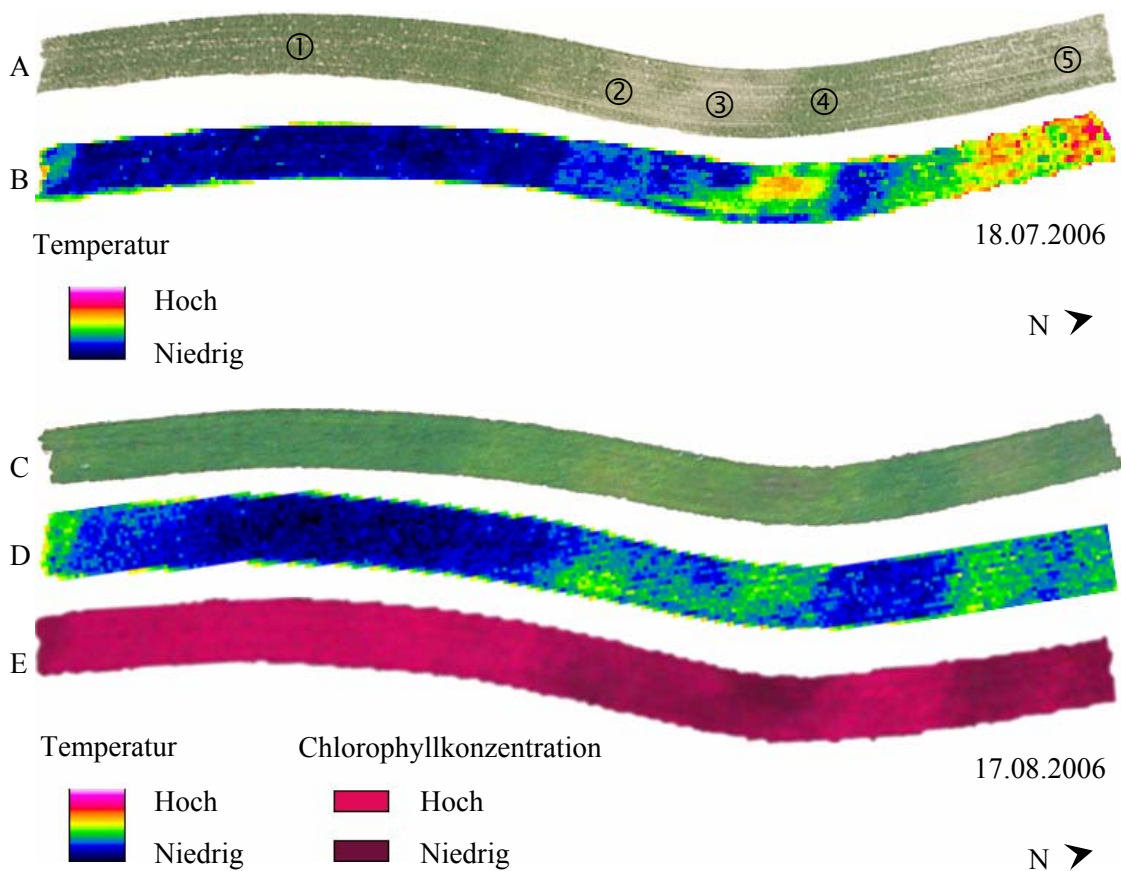


Abb. 3-58 Luftaufnahmen vom Versuchsfeld Frankenforst am 18.07.2006 und 17.08.2006: Lichtbild (A bzw. C), Thermogramm (B bzw. D) und Multispektralbild (E). Die Farben der Thermogramme sind nicht direkt miteinander vergleichbar.

Im Thermogramm, Licht- und Multispektralbild vom Dikopshof am 18.07.2006 war jeweils das gleiche Muster sichtbar (Abb. 3-60, A - C). In der Senke verlief ein wellenförmiger Streifen, in dem die Zuckerrüben am besten wuchsen, und die größte Dichte hatten (Abb. 3-60, A; Abb. 3-61, A). Davon abgegrenzt war das Wachstum der Pflanzen am Hang minimal, durchsetzt mit Nestern besseren Wachstums (Abb. 3-60, A).

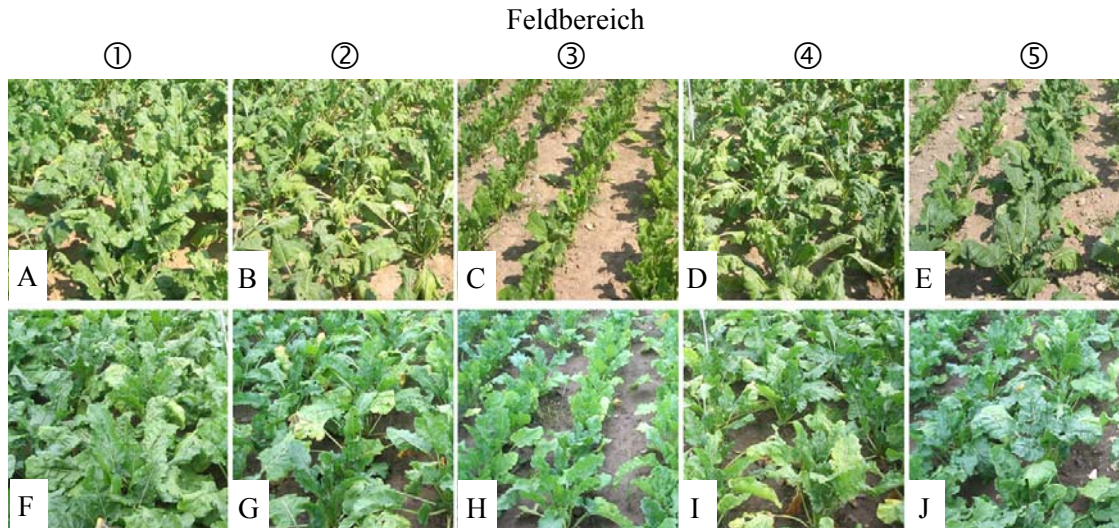


Abb. 3-59 Bereiche unterschiedlichen Rübenwachstums auf dem Versuchsfeld Frankenforst am 21.07.2006 (A - E) und 18.08.2006 (F - J).

Tab. 3-5 Übersicht über die durchschnittlichen Oberflächentemperaturen des Zuckerrübenbestandes in den Bereichen ① - ⑤ des Versuchsfeldes Frankenforst zu den Aufnahmezeitpunkten 18.07.2006 und 17.08.2006 (n = 3).

Aufnahmeterrin	Durchschnittliche Oberflächentemperatur im Feldbereich [°C]				
	①	②	③	④	⑤
18.07.	34,2	36,1	40,3	36,4	41,6
17.08.	16,0	16,1	16,2	16,1	16,2

Die geringen Niederschlagsmengen im Juni und Juli mit insgesamt nur 74 mm bei durchschnittlichen Lufttemperaturen von 17 beziehungsweise 23 °C verstärkten den Einfluss des geringen Wasserhaltevermögens des stark sandigen Lehms beziehungsweise des Sandbodens auf das Wachstum. Die Blätter waren dort fast abgestorben (Abb. 3-61, B). Im westlichen Bereich der Kuppe wuchsen die Pflanzen besser, ihre Dichte und -vitalität waren erhöht. Bereiche mit gutem Pflanzenwachstum hatten niedrige solche mit schlechtem Wachstum wiesen hohe Temperaturen auf (Abb. 3-60, A und B). Die Temperaturdifferenz im Feld betrug 11,7 K. Die Chlorophyllkonzentration korrelierte räumlich ebenfalls mit der Bestandesdichte und Temperatur (Abb. 3-60, C).

Am 17.08.06 zeichnete sich erneut mit allen Sensoren das gleiche Muster ab (Abb. 3-60, D - F). Weil die Niederschläge allein zwischen dem 1.08. bis zum Aufnahmezeitpunkt 47 mm betragen, hatte sich der Bestand wieder erholt.

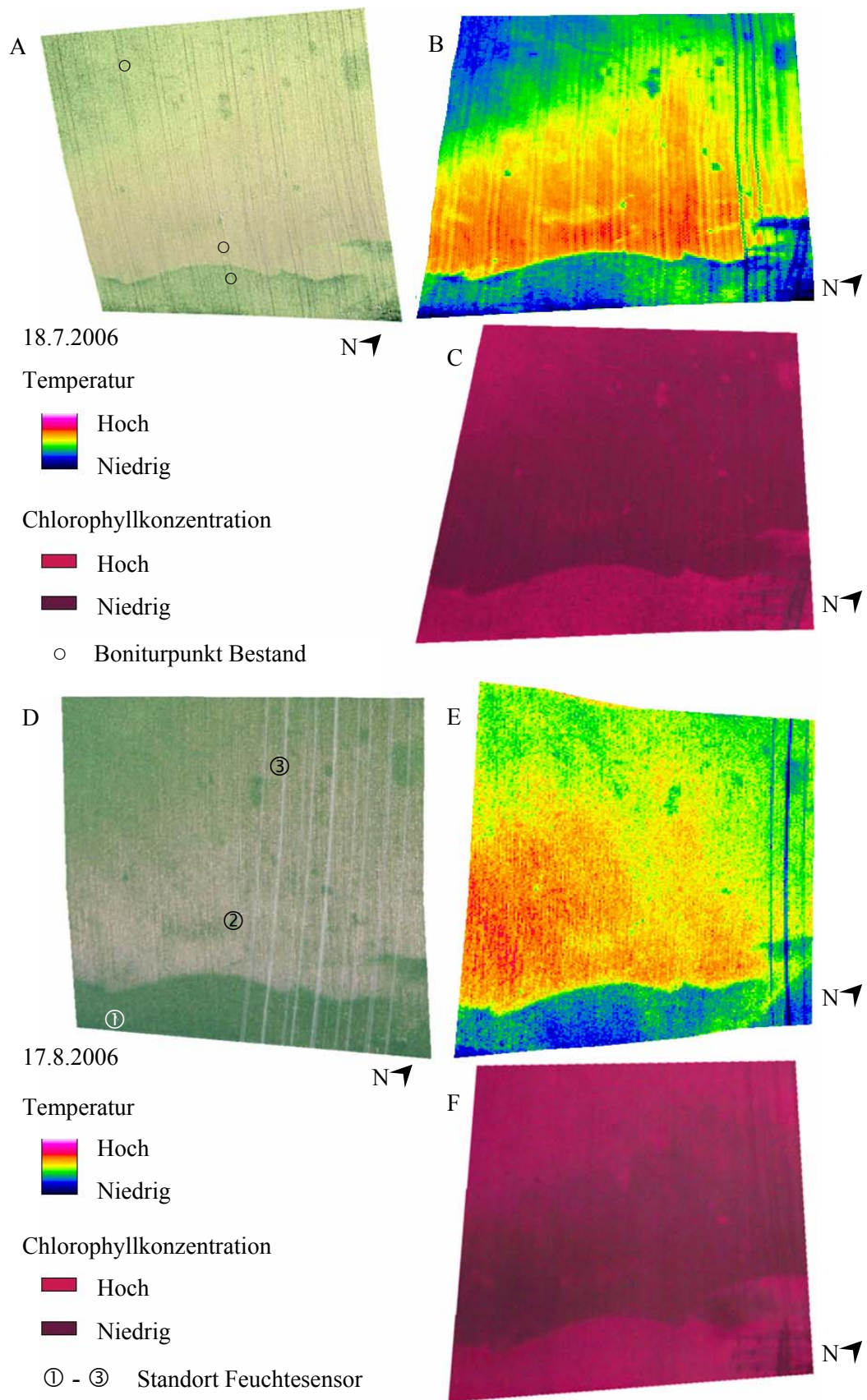


Abb. 3-60 Luftaufnahmen vom Versuchsfeld Dikopshof am 18.07.2006 und 17.08.2006: Lichtbild (A bzw. D), Thermogramm (B bzw. E) und Multispektralbild (C bzw. F). Die Farben der Thermogramme sind nicht direkt miteinander vergleichbar.

Vor allem die Pflanzen am Hang hatten vom Regen profitiert (3-61, E). Der Bereich guten Wachstums auf der Kuppe, erst nur auf die westliche Ecke begrenzt, hatte sich auf den Hang ausgedehnt. Die scharfe Abgrenzung zwischen den Rüben am Hang und denen in der Senke blieb erhalten. Nach wie vor hatten die Rübenpflanzen auf der Kuppe und in der Senke einen Wachstumsvorsprung gegenüber denen am Hang (Abb. 3-61, D und F). Sein Einfluss auf die Oberflächentemperatur war aber reduziert. Somit hatte sich auch die MTD des Feldes auf 0,8 K verringert.

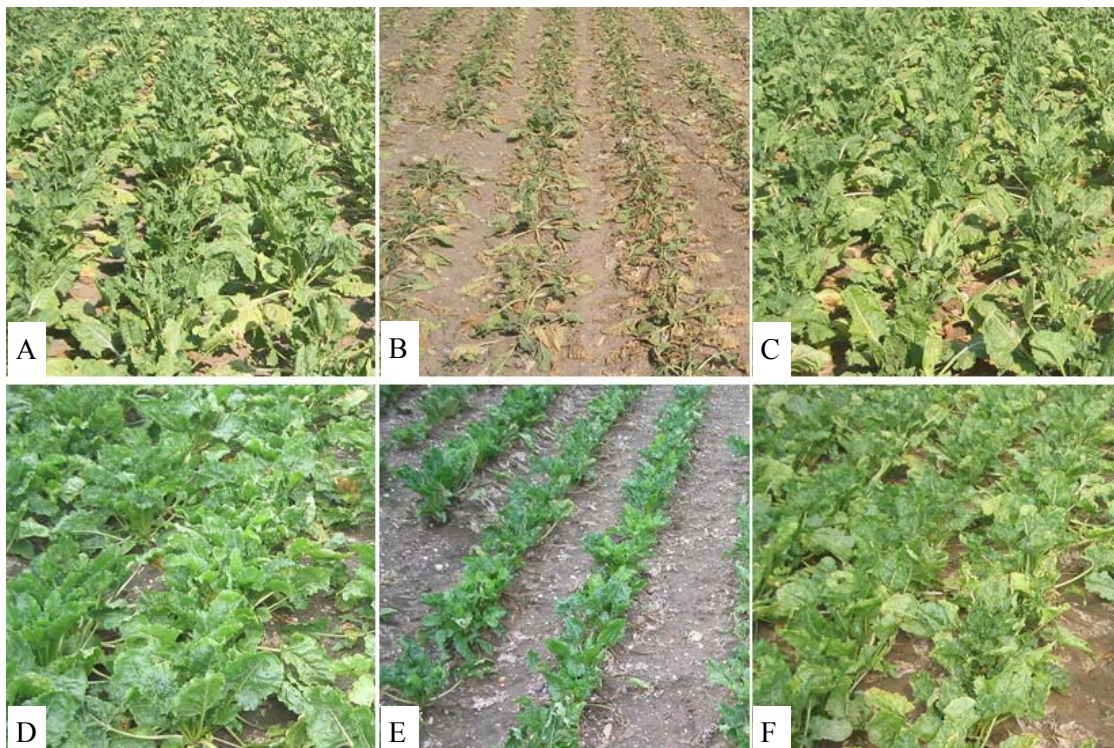


Abb. 3-61 Bereiche unterschiedlichen Rübenwachstums auf dem Versuchsfeld Dikopshof am 21.07.2006 bzw. 16.08.2006: Senke (A bzw. D), Hang (B bzw. E) und Kuppe (C bzw. F). Die Lage der Boniturstellen im Feld ist Abb. 3-60, A zu entnehmen.

Der Median der relativen Feuchte über den Zeitraum vom 30.06.2006 bis zum 9.09.2006 lag im Bereich der Senke am höchsten (Abb. 3-62). Im Bereich der Kuppe war der Median der relativen Luftfeuchtigkeit 4,5 % geringer, im Bereich des Hanges unterschied er sich um 15 % von dem in der Senke. Die relative Luftfeuchtigkeit an den drei Standorten im Feld unterschied sich allerdings nicht signifikant voneinander.

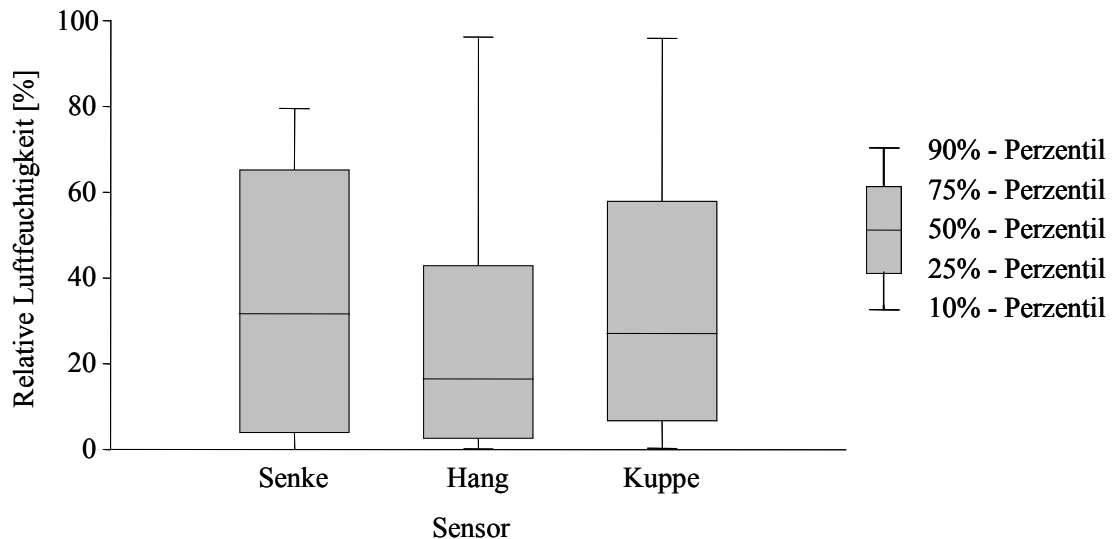


Abb. 3-62 Relative Luftfeuchtigkeit im Zeitraum vom 30.06.2006 bis 9.09.2006 in der Senke ①, am Hang ② und auf der Kuppe ③ des Versuchsfeldes Dikopshof (keine signifikanten Unterschiede zwischen den Sensoren nach t-Test; $p < 0,05$).

3.4 Sensorgestützte Darstellung und Beurteilung der Heterogenität von Blattfleckenkrankheiten an Zuckerrüben

Wenn Bestände heterogen beziehungsweise homogen entwickelt sind, so beeinflusst dies unter Umständen die zeitliche und räumliche Verteilung von Krankheitserregern, da ihre Lebensvorgänge unmittelbar an die ihrer Wirtspflanzen geknüpft sind. Außerdem wird die Epidemiologie maßgeblich vom Wetter während der Vegetationsperiode beziehungsweise dem Mikroklima im Bestand bestimmt. Das Auftreten der Pathogene und ihre epidemiologische Entwicklung in Abhängigkeit von der Witterung wurde auf den Versuchsflächen Klein-Altendorf, Dikopshof und Frankenforst untersucht.

3.4.1 Auftreten und zeitliche Variabilität

Auf dem Versuchsfeld Klein-Altendorf wurden 2005 die ersten Krankheitssymptome von *C. beticola* Ende Juli festgestellt (Abb. 3-63, A). In der darauf folgenden regenreichen Zeit mit durchschnittlichen Tagestemperaturen von über 20 °C stieg die Befallshäufigkeit im Feld stark an (Abb. 3-63, B). Mitte August waren an mehr als 60 % der Boniturorte Symptome von *C. beticola* zu finden, einen Monat später an 100 %. Dabei blieb die durchschnittliche Befallsstufe nahezu konstant auf einem Wert von 1 bis 2,2. Echter Mehltau wurde erst zur Bonitur am 18.08.2005 an Zuckerrübenblättern festge-

stellt (Abb. 3-63, A). Wie bei der Blattfleckenkrankheit nahm auch beim Echten Mehltau die Anzahl der Stellen, an denen die Krankheit aufgetreten war, innerhalb kurzer Zeit stark zu. Im Gegensatz zur Blattfleckenkrankheit stieg jedoch auch die befallene Blattfläche der Rübenpflanzen exponentiell auf einen Wert über 90% an. Hier waren Temperaturen zwischen 15 und 20 °C und geringe Niederschläge zwischen Ende August und Anfang September förderlich (Abb. 3-63, B). Erst Mitte September, als die durchschnittlichen Tagestemperaturen auf 10 bis 15 °C zurückgegangen waren, waren die Rüben mit *U. betae* befallen (Abb. 3-63, A und B). Bis zum Ende der Bonituren Mitte Oktober breitete sich der Rübenrost noch auf 80 % der Boniturstellen aus, die durchschnittliche Befallsstärke pro Pflanze blieb allerdings unter 10 %.

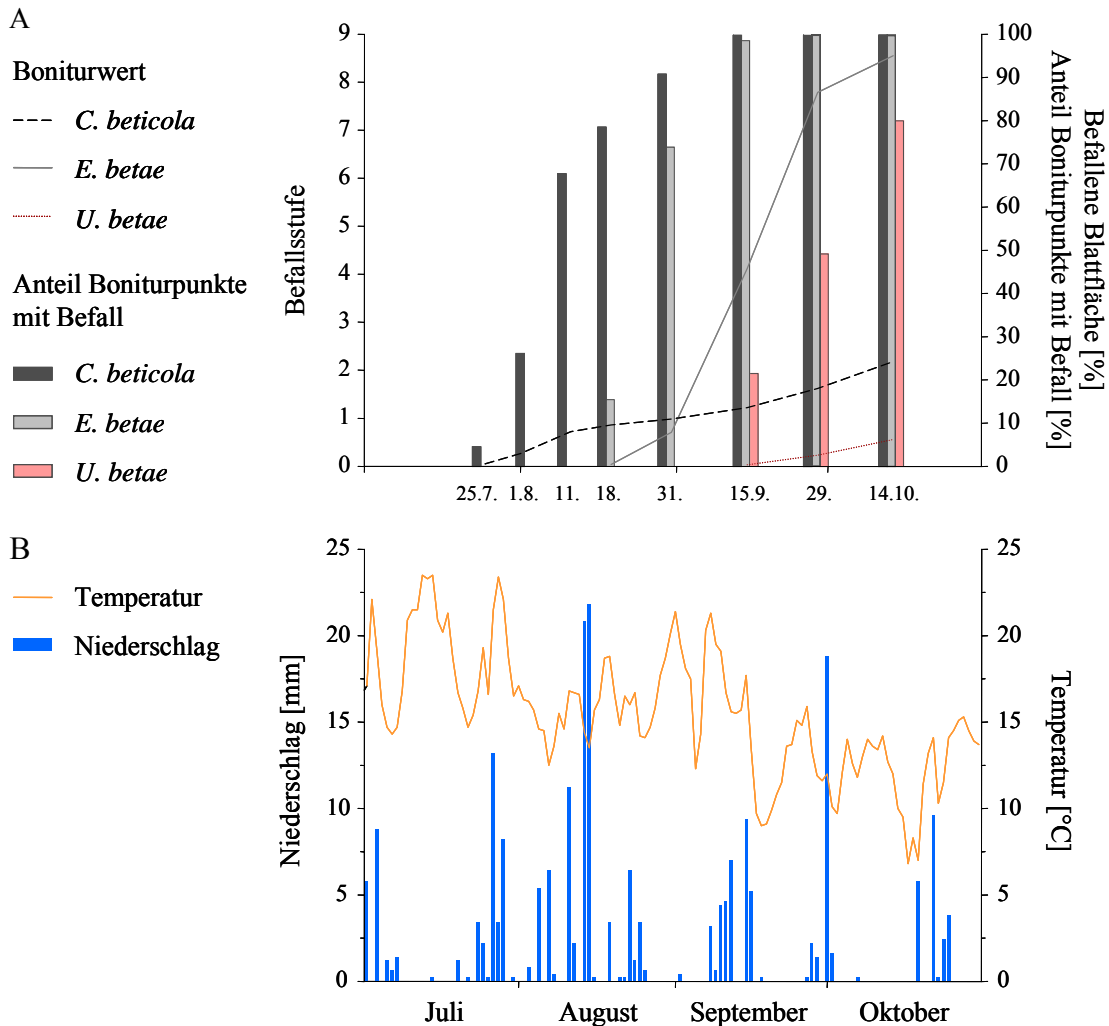


Abb. 3-63 Befallsentwicklung der Krankheiten *Cercospora beticola*, *Erysiphe betae* und *Uromyces betae* auf dem Versuchsfeld Klein-Altendorf ab Befallsbeginn bis zum 14.10.2005 (A), sowie die zugehörigen Wetterdaten vom 1.07.2005 bis 31.10.2005 (B) (Befallsstufe: 0 = gesund, 9 = Blattverlust, 100 % Befallshäufigkeit auf > 10 Blättern; n (Boniturstellen) = 65).

Ein Jahr später war *C. beticola* auf dem Frankenforst einen Monat nach Befallsbeginn schon an jedem Boniturpunkt vorhanden und erreichte im Laufe der Vegetationsperiode höhere Befallswerte (Abb. 3-64, A). Die Krankheit war im letzten Augustdrittel erst an 17 % der Boniturstellen aufgetreten, innerhalb der elf folgenden Tage aber an allen. Der Befallsgrad stieg langsam auf durchschnittlich 7,4 an. Wie in 2005 wurde Befall erstmals im Hochsommer festgestellt. Auch 2006 waren Temperaturen über 20 °C und Regenereignisse der Pathogenentwicklung förderlich (Abb. 3-64, B). Echter Mehltaus wurden Ende August an den Zuckerrüben festgestellt (Abb. 3-64, A). Die befallene Blattfläche betrug nur 5 %, dafür war Befall an 40 % der Boniturstellen vorhanden.

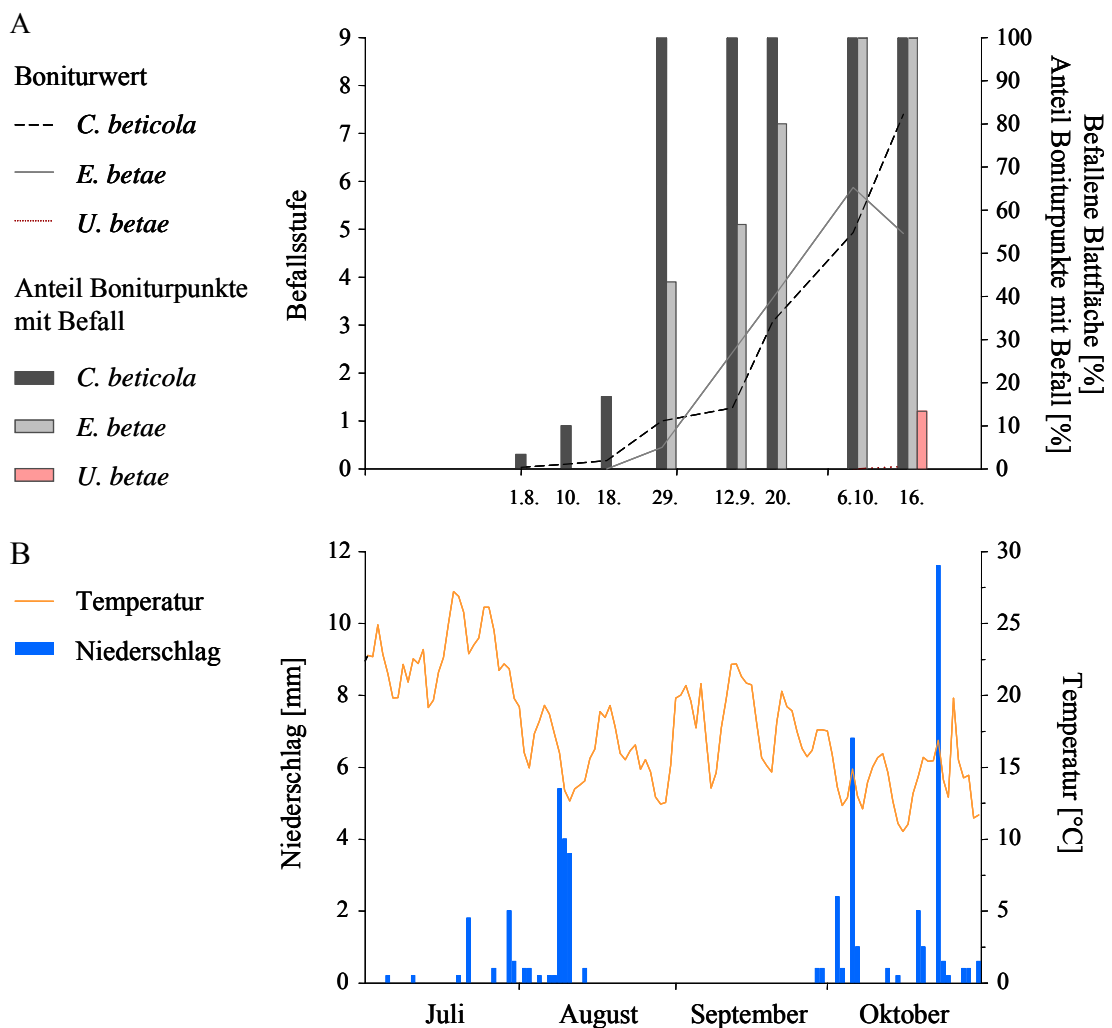


Abb. 3-64 Befallsentwicklung der Krankheiten *Cercospora beticola*, *Erysiphe betae* und *Uromyces betae* auf dem Versuchsfeld Frankenforst ab Befallsbeginn bis zum 16.10.2006 (A), sowie die zugehörigen Wetterdaten vom 1.07.2006 bis 31.10.2006 (B) (Befallsstufe: 0 = gesund, 9 = Blattverlust, 100 % Befallshäufigkeit auf > 10 Blättern; n (Boniturpunkte) = 30).

In der folgenden Zeit, bei trockenem Wetter und Temperaturen zwischen 15 und

20 °C, stieg der Anteil der befallenen Blattfläche und die Anzahl der Boniturstellen mit Befall gleichmäßig an (Abb. 3-64, A, B). Mitte Oktober war der Befallsgrad rückläufig. Rostpusteln wurden am letzten Termin mit durchschnittlich 0,6 % befallener Blattfläche aller Pflanzen und an 13% der Stellen bonitiert (Abb. 3-64, A und B).

Am Dikopshof wurden Symptome von *C. beticola* etwa eineinhalb Wochen vorher als am Frankenforst festgestellt. Nach einer langsamen Anfangsentwicklung Ende Juli nahm die Verbreitung nach häufigen Niederschlägen bis Mitte August stark zu (Abb. 3-65, A, B). Als die Krankheit an allen Boniturstellen zu finden war, stieg auch die Befallsstärke an. Die Rüben waren weniger mit *E. betae* infiziert als am Frankenforst und in Klein-Altendorf.

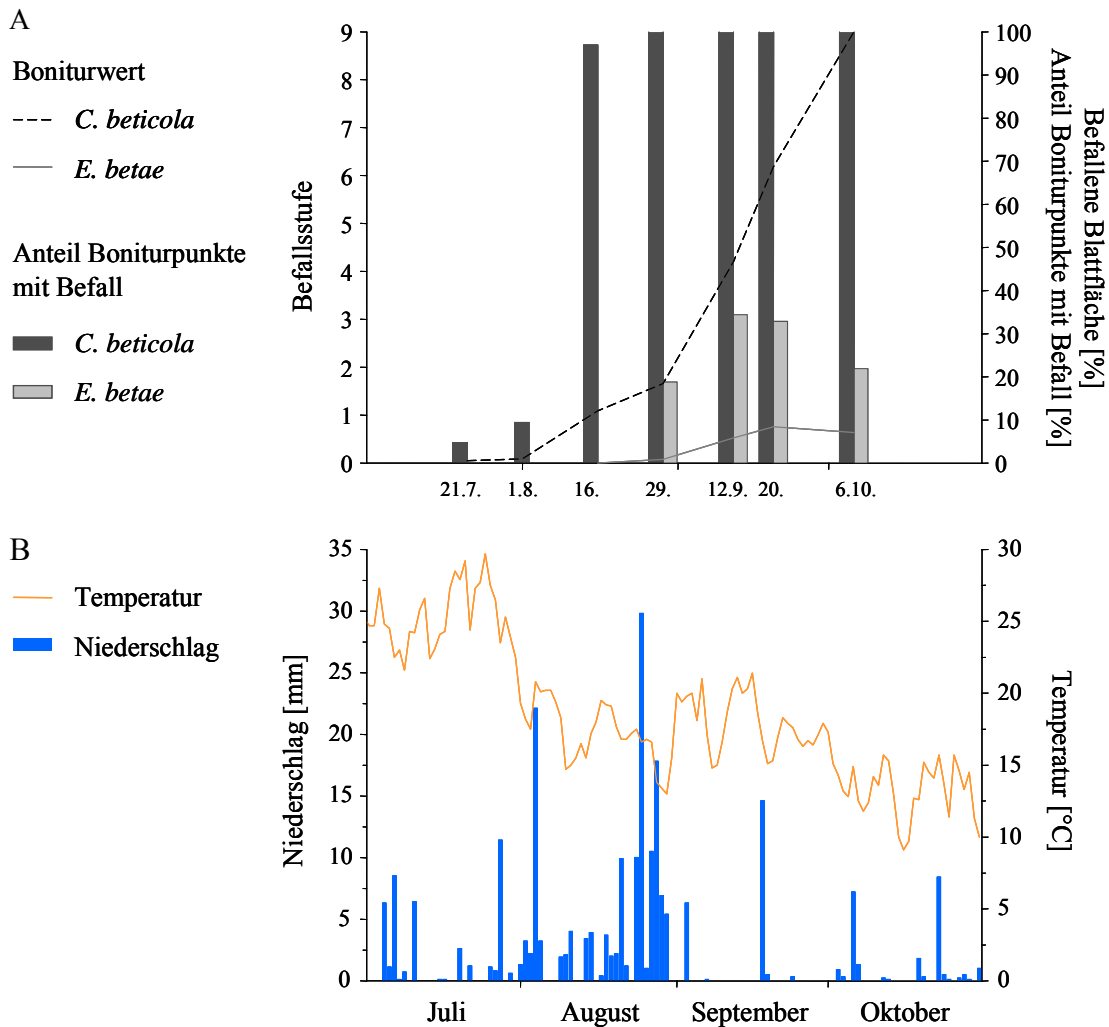


Abb. 3-65 Befallsentwicklung der Krankheiten *Cercospora beticola*, *Erysiphe betae* und *Uromyces betae* auf dem Versuchsfeld Dikopshof ab Befallsbeginn bis zum 6.10.2006 (A), sowie die zugehörigen Wetterdaten vom 1.07.2006 bis 31.10.2006 (B) (Befallsstufe: 0 = gesund, 9 = Blattverlust, 100 % Befallshäufigkeit auf > 10 Blättern; n (Boniturstellen) = 64).

Pusteln wurden nur an maximal 34 % der Boniturstellen festgestellt (Abb. 3-65, A). Die befallene Blattfläche erreichte im Durchschnitt nur 8,4 %. Dieser Wert sank zum Ende der Vegetationsperiode wieder ab, obwohl die Temperaturen nach dem Auftreten zwischen 15 und 20 °C lagen und es nur wenig regnete. Rübenrost trat dort nicht auf. Zwischen dem 1.07. und 31.10. waren die Niederschläge mit durchschnittlich 1,9 mm pro Tag in Klein-Altendorf und am Dikopshof gleich hoch, am Frankenfort mit 0,4 mm am niedrigsten. Die Temperaturen betragen am Frankenforst durchschnittlich 17,8 °C, am Dikopshof wegen der geringeren Höhenlage 18,5 °C und in Klein-Altendorf 15,5 °C.

3.4.2 Verbreitung und räumliche Heterogenität

Das Verhältnis zwischen der Anzahl der Boniturstellen, an welchen ein Befall festgestellt worden ist, und der Befallsstärke des entsprechenden Pathogens bietet nur einen Anhaltspunkt, ob eine Krankheit innerhalb des Feldes heterogen verteilt ist. Eine Aussage über die tatsächliche Verteilung der Befallsintensität innerhalb des Feldes kann nur über Befallskarten gemacht werden. Erst dann können Verbreitungsmuster in Bezug zum Boden, dem Relief und der Oberflächentemperatur des Bestandes gesetzt werden und einen Hinweis auf Risikozonen geben.

In Klein-Altendorf ging der Befall mit *C. beticola* von einer begrenzten Stelle im Bereich des verdichteten Bodens aus (Abb. 3-66, C, 25.07.2005). Von dort breitete sich die Krankheit innerhalb einer Woche mit einer Befallsstufe von 1 nahezu über das gesamte Feld aus (Abb. 3-66, C, 1.08.2005). Die Pflanzen, an denen die Krankheit zuerst diagnostiziert worden ist, besaßen bis zum Ende der Vegetationsperiode stets die höchste Befallsstufe. Zum dritten Boniturtermin Mitte August hatte sich ein weiteres Befallszentrum gebildet (Abb. 3-66, C, 19.08.2005). Die Anzahl der festgestellten Befallsstufen blieb bis Ende August konstant, und die Befallsstärke zwischen zwei benachbarten Boniturstellen unterschied sich maximal um zwei Befallsstufen. Wie in Abbildung 3-63, A anhand der Befallsentwicklung dargestellt, stagnierte die Ausbreitung der Krankheit nahezu zwischen dem 11. und 31.08.2005. Mitte September war in der Feldmitte ein Befallsbereich vorhanden, welcher mit dem des verdichteten Bodens übereinstimmte. An jedem Boniturtermin war eine Befallsstufe an der Mehrheit aller Boniturstellen vorzufinden, was auf einen insgesamt recht homogenen Befall deutete. Erst ab Mitte September bis Mitte Oktober fächerte sich der Befall auf bis zu

sieben Befallsstufen auf.

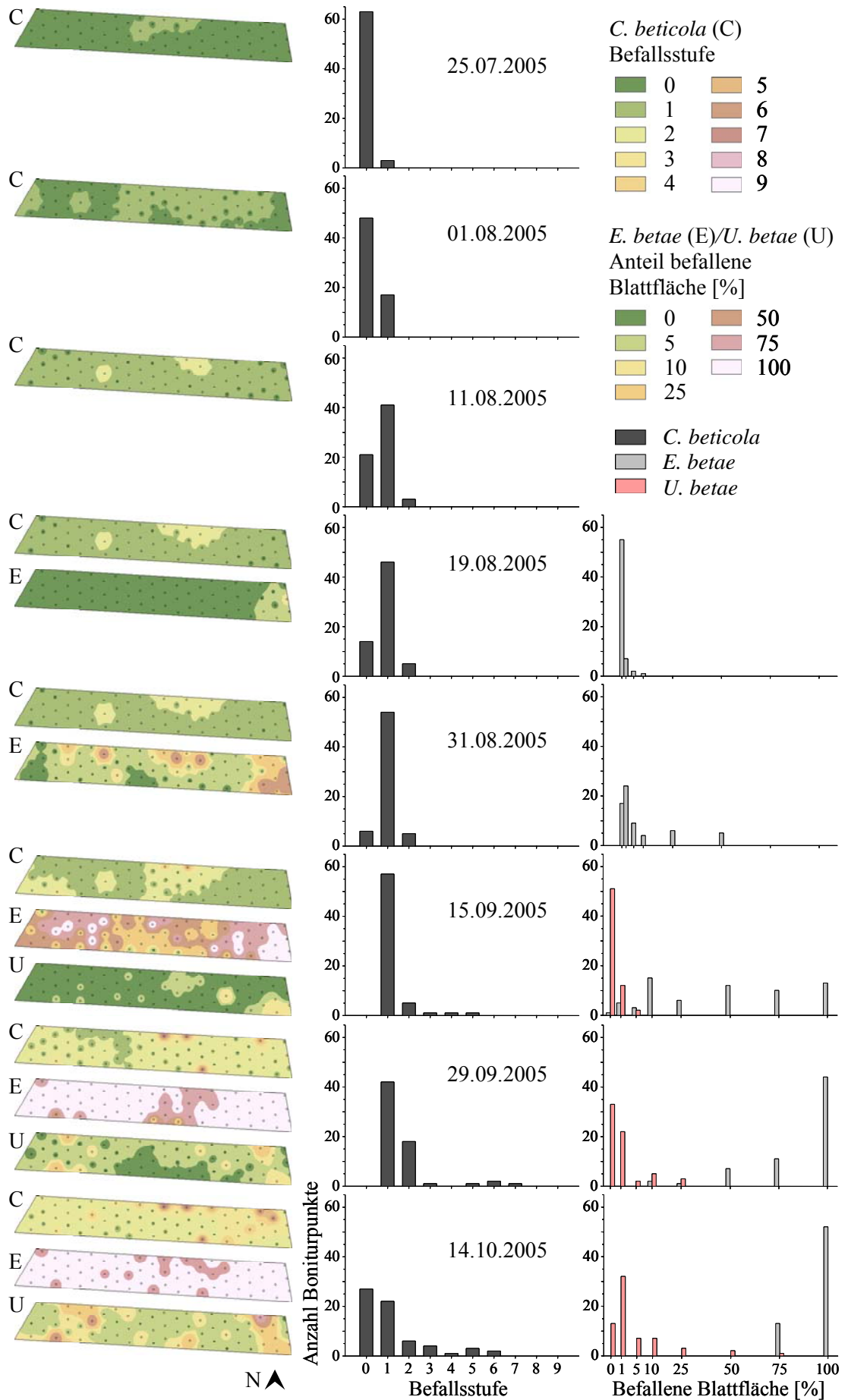
Echter Mehltau wurde Mitte August erstmals an Pflanzen am östlichen Feldrand mit einer geringen befallenen Blattfläche bonitiert (Abb. 3-66, E, 19.08.2005). Wie bei der *Cercospora*-Blattfleckenkrankheit blieb die Befallsstärke dort an jedem Boniturtermin die höchste im Feld. Anders als bei *C. beticola* waren schon beim nächsten Termin fast alle Pflanzen mit *E. betae* befallen, einige davon sogar mit bis zu 50 % ihrer Blattfläche (Abb. 3-66, E, 31.08.2005). An diesem und dem folgenden Boniturtermin bestand aber der wesentliche Unterschied zur *Cercospora*-Blattfleckenkrankheit darin, dass einige Stellen mit hohen Befallwerten von Flächen mit geringem Befall umgeben waren. Das heißt, die Anzahl an Befallsstufen nahm zu, und fächerte sich am 15.09.2005 auf das gesamte Spektrum zu nahezu gleichen Anteilen auf (Abb. 3-66). Zum Ende der Vegetationsperiode konnte mit zunehmender Befallsstärke ein gegenläufiger Prozess beobachtet werden (Abb. 3-66, E, 29.09. und 14.10.2005). Außerdem waren die Pflanzen in dem sich von Nordosten nach Südwesten in der Mitte des Feldes erstreckenden Bereich stets am geringsten befallen.

Rübenrost war im Gegensatz zu den beiden anderen Krankheiten bereits zu Beginn der Epidemie an mehreren Stellen des Feldes vorzufinden (Abb. 3-66, U, 15.09.2005). Die betroffenen Boniturstellen im südöstlichen Teil des Feldes wiesen eine geringfügig höhere Befallsstärke auf. Wie bei Ephemem Mehltau kam es im Laufe der Zeit zu einer Auffächerung der Befallsstufen und zur Ausbildung von Bereichen mit höheren Befallsstärken und der Aussparung des mittleren Feldbereiches mit hohen Befallwerten (Abb. 3-66, U, 29.09. und 14.10.2005).

Folgende Seite:

Abb. 3-66 Georeferenzierte Befallskarten der Krankheiten *Cercospora beticola*, *Erysiphe betae* und *Uromyces betae* am Standort Klein-Altendorf (2005), sowie die Verteilung der Boniturgruppen (Befallsstufe: 0 = gesund, 9 = Blattverlust, 100 % Befallshäufigkeit auf > 10 Blättern; n (Boniturstellen) = 65).

Ergebnisse



Auch am Standort Frankenforst wurden als erstes Symptome von *C. beticola* an den Zuckerrüben festgestellt. Der Befall ging am 1.08.2006 und in der nachfolgenden Woche von Boniturstellen aus, die im Bereich sehr guten Rübenwachstums lagen (Abb. 3-67, C, 1.08. und 10.08.2006). Ende des Monats war der gesamte Bestand einheitlich mit *C. beticola* mit einer Befallsstufe von 1 infiziert. Auch bei der weiteren Krankheitsentwicklung waren der südliche und der zwischen Senke und nördlichem Ende gelegene als auch der nördlichste Bereich des Feldes stets am stärksten mit dem Pathogen befallen. In diesen Bereichen war das Pflanzenwachstum am besten. Wie in Klein-Altendorf kam es ab Mitte/Ende September zur Auffächerung der Befallsgruppen, im Gegensatz zu Klein-Altendorf war aber nicht eine Befallsgruppe besonders vorherrschend (Abb. 3-67, C, 20.09. - 16.10.2006). Die höchste Befalls-heterogenität wurde Ende September/Anfang Oktober verzeichnet.

Beim Echten Mehltau waren schon zu Befallsbeginn fast alle Befallsgruppen vorhanden (Abb. 3-67, E, 29.08. - 16.10.2006). Der Unterschied zwischen den einzelnen Feldbereichen war daher stärker ausgeprägt, und die Krankheitsverteilung heterogener als bei *C. beticola*. Dies war am besten am 12.09.2006 zu sehen, als die Mitte des Feldes vollkommen befallsfrei, die beiden Enden dagegen mit bis zu 100 % der Blattfläche mit *E. betae* befallen waren. Am stärksten war der Befall auf den Pflanzen im südlichen und äußersten nördlichen Teil des Feldes. Noch einen Monat nach Befallsbeginn blieben die Pflanzen nördlich und südlich der Senke befallsfrei.

Rübenrost entwickelte sich am letzten Boniturermin Mitte Oktober mit bis zu 10 % befallener Blattfläche im Norden und mit geringer Befallsstärke an einer Boniturstelle im Süden des Feldes (Abb. 3-67, U, 16.10.2006).

Auf dem Dikopshof breiteten sich als erstes die *Cercospora*-Blattflecken von wenigen Inokulumquellen aus, so dass im August alle Zuckerrübenpflanzen nahezu mit einheitlicher Befallsstärke befallen waren (Abb. 3-68, C, 21.07.2006). Auch auf diesem Feld bildeten sich im September Zentren mit einem um mehrere Stufen höheren Befall als bei den benachbarten Boniturstellen aus. Die Schwerpunkte lagen in den Bereichen guten Bodens und Pflanzenwachstums an der südöstlichen Feldgrenze und in der nordwestlichen Ecke (Abb. 3-68, C, 29.08. - 20.09.2006). Zum Ende der Vegetationsperiode verringerte sich der Abstand zwischen den Befallsstufen innerhalb des Feldes wieder, bis schließlich alle Rüben maximal befallen waren.

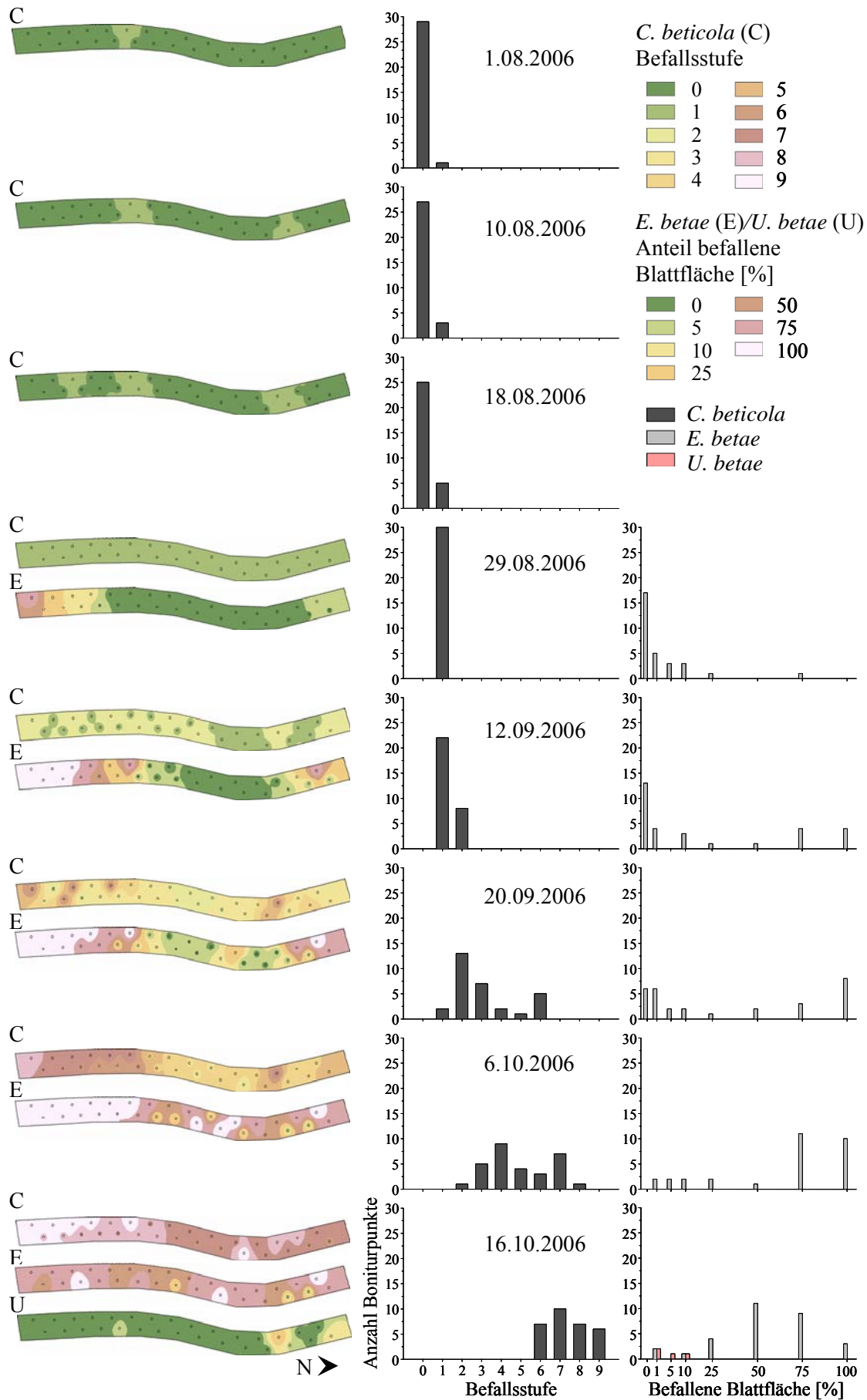
Echter Mehltau tauchte etwa einen Monat später auf Pflanzen in der nordwestlichen

Ecke des Feldes auf der Kuppe auf (Abb. 3-68, E, 29.08.2008). Bereits am ersten Boniturtermin, an welchem Symptome des Pathogens festgestellt wurden, variierte der Anteil befallener Blattfläche auf den Pflanzen zwischen 1 % und 25 %. Eine weitere Inokulumquelle für Sekundärinfektionen war zwei Wochen später in der Mitte der Senke festzustellen (Abb. 3-68, E, 12.09.2006). Dieses Verbreitungsgebiet wuchs mit dem im Nordwesten zusammen und dehnte sich in alle Richtungen aus. Nur in der nordöstlichen Ecke des Feldes blieb im Gegensatz zu *C. beticola* ein Großteil der Pflanzen frei von Symptomen durch *E. betae*, so dass bis zum Ende der Vegetationsperiode stets mindestens fünf Befallsstufen zwischen 1 und 75 % an den Pflanzen festgestellt werden konnten. Vor allem am letzten Termin wechselten sich Boniturstellen mit sehr hohem Befall mit solchen ohne beziehungsweise sehr geringem Befall ab (Abb. 3-68, E, 6.10.2006). Der Befall war zu diesem Zeitpunkt vor allem in der nordwestlichen Ecke des Feldes zurückgegangen.

Folgende Seite:

Abb. 3-67 Georeferenzierte Befallskarten der Krankheiten *Cercospora beticola*, *Erysiphe betae* und *Uromyces betae* am Standort Frankenforst (2006), sowie die Verteilung der Boniturguppen (Befallsstufe: 0 = gesund, 9 = Blattverlust, 100 % Befallshäufigkeit auf > 10 Blättern; n (Boniturstellen) = 30).

Ergebnisse



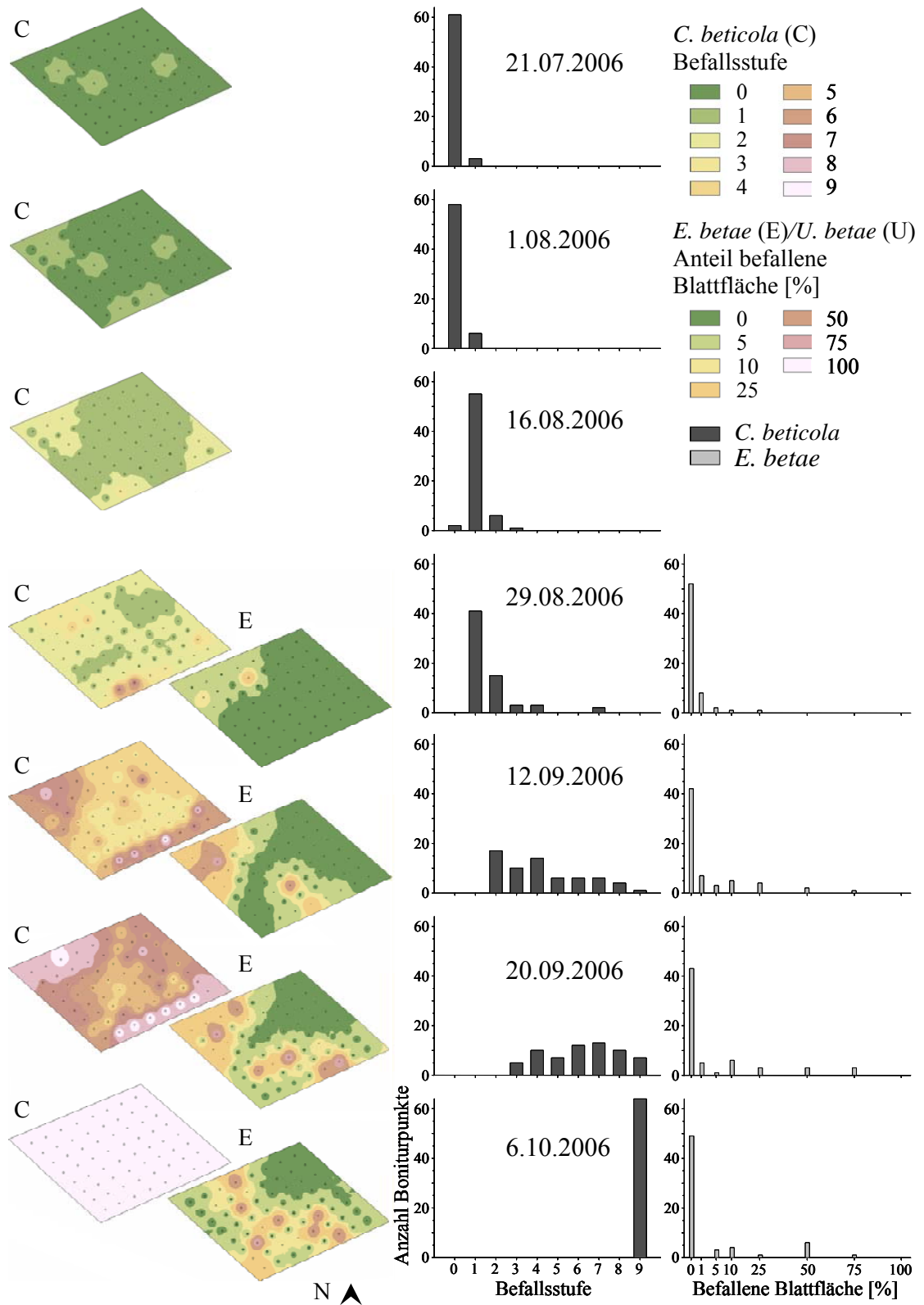


Abb. 3-68 Georeferenzierte Befallskarten der Krankheiten *Cercospora beticola*, *Erysiphe betae* und *Uromyces betae* am Standort Dikopshof (2006), sowie die Verteilung der Boniturgruppen (Befallsstufe: 0 = gesund, 9 = Blattverlust, 100 % Befallshäufigkeit auf > 10 Blättern; n (Boniturnpunkte) = 64).

3.5 Detektion von Krankheitssymptomen im Bestand mittels Thermographie

Am Versuchsfeld Poppelsdorf sollte 2005 festgestellt werden, ob in kleinräumigem Maßstab Bestandesbereiche unterschieden werden konnten, die verschieden stark von Blattkrankheiten befallen waren. Aufgrund starken Vorkommens der Späten Rübenfäule durch *Rhizoctonia solani* und der dadurch verursachten Lücken im Bestand waren nicht alle Parzellen für die Auswertung geeignet. Die Parzellen mit dem besten Rübenwachstum, Nr. 5 und Nr. 8, waren am stärksten von den relevanten Pathogenen befallen. Obwohl beide bezüglich des Bodens als auch der Vitalität der Pflanzen die gleichen Voraussetzungen hatten, dominierte auf der Parzelle 5 die *Cercospora*-Blattfleckenkrankheit, auf Parzelle 8 der Echte Mehltau. Außerdem wurde die Parzelle Nr. 4 zur Auswertung herangezogen, da deren Bestand regelmäßig gegen beide Pathogene behandelt worden war. Symptome von *U. betae* wurden nicht festgestellt.

Zuerst wurde berechnet, ob sich innerhalb einer Parzelle die Temperaturdifferenz von gesunden Teilbereichen, t_{dn} , von der von befallenen, t_{db} , unterschied. Dabei wurde zunächst nicht nach Befallsintensität oder Krankheit differenziert. An den beiden ersten Terminen wurde in beiden Parzellen nur ein Befall mit *C. beticola* festgestellt. Die Teilbereiche unterschieden sich nicht in ihrer Oberflächentemperatur, wenn t_d unter $\pm 0,13$ K lag (Tab. 3-6). Zwar waren befallene Teilbereiche der Parzelle 5 Mitte Juli um 0,52 K signifikant wärmer als nicht befallene, aber dieser Effekt verschwand mit zunehmender Befallsintensität. Bei Parzelle 4 blieb die Befallsintensität auch bei späteren Aufnahmetermen unter der von Parzelle 5 und 8. Trotzdem unterschied sie sich hinsichtlich des Vorzeichens der t_d als auch hinsichtlich der Signifikanz des Temperaturunterschieds nicht von den beiden anderen Parzellen.

Tab. 3-6 Einfluss von Befall mit *Cercospora beticola* und *Erysiphe betae* auf die Bestandesoberflächentemperatur von Teilbereichen einer Zuckerrübenparzelle ($t_{db} - t_{dn}$ = Temperaturdifferenz, t_d [K]; t-Test; $p < 0,05$).

Datum	Parzelle 4		Parzelle 5		Parzelle 8	
	$t_{db} - t_{dn}$	p	$t_{db} - t_{dn}$	p	$t_{db} - t_{dn}$	p
14.07.2005	0,07	0,725	0,52	0,015	-0,10	0,540
28.07.2005	-0,24	0,017	-0,13	0,541	-0,16	0,021
10.08.2005	-0,20	0,007	0,06	0,688	-0,20	0,008
24.08.2005	-0,61	0,026	-0,01	0,970	-0,20	0,156

Des Weiteren wurde bei den Parzellen 5 und 8 die Temperaturdifferenz in Abhängigkeit der Befallsstufe der Teilbereiche erfasst. Bei Parzelle 5 erfolgte dies für *C. beticola* anhand der Befallsstufen (Tab. 3-7), bei Parzelle 8 anhand des Anteils der mit *E. betae* befallenen Blattfläche (Tab. 3-8). Bei beiden Parzellen bestand an fast allen Terminen ein signifikanter Unterschied zwischen der t_d gesunder Bereiche und der ersten Befallsstufe. Die Differenz war für *C. beticola* 0,52 K, für *E. betae* nur 0,28 K. Stärker befallene Teilbereiche unterschieden sich dagegen meist nicht von gesunden. Bei späteren Terminen und einem breiterem Spektrum an Befallsintensitäten waren die Unterschiede nicht mehr signifikant. Über absolute Temperaturen ließ sich keine Aussage machen. Bei *C. beticola* und *E. betae* waren stärker befallene Bereiche sowohl wärmer als auch kühler als gesunde.

Tab. 3-7 Durchschnittliche Temperaturdifferenz der Teilbereiche von Parzelle 5 in Abhängigkeit von der Befallshöhe von *Cercospora beticola* (Befallsstufe: 0 = gesund, 9 = Blattverlust, 100 % Befallshäufigkeit auf > 10 Blättern; verschiedene Buchstaben kennzeichnen einen signifikanten Unterschied zwischen den Befallsstufen zu einem Boniturtermin nach t-Test; $p < 0,05$; Befallsstufe 0 am 10.08.2005 wurde nicht in die statistischen Auswertungen miteinbezogen, da $n < 3$).

Datum	Befallsstufe								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
14.07.2005	0,00 a	0,52 b							
28.07.2005	0,00 ab	-0,19 b	0,16 ac						
10.08.2005	0,00	0,01 a	0,13 b	-0,03 ab	0,11 ab				
24.08.2005		0,04 a	-0,02 a	0,11 a		-0,06 a	0,01 a	0,02 a	-0,22 a

Tab. 3-8 Durchschnittliche Temperaturdifferenz der Teilbereiche von Parzelle 8 in Abhängigkeit von der mit *Erysiphe betae* befallenen Blattfläche [%] (verschiedene Buchstaben kennzeichnen einen signifikanten Unterschied zwischen den Befallsstufen zu einem Boniturtermin nach t-Test; $p < 0,05$).

Datum	Befallene Blattfläche [%]						
	0	1	5	10	25	50	75
10.08.2005	0,04 a		0,28 b				
24.08.2005	-0,43 a		0,23 b	-0,24 ac	-0,02 abc	-0,24 ac	-0,25 ac

Während der Befall von *C. beticola* in Parzelle 5 von der einen auf die andere Seite abnahm (Abb. 3-69, D), war dies weder auf dem Thermogramm (Abb. 3-69, A) noch auf der georeferenzierten Temperaturkarte (Abb. 3-69, B) erkennbar. Stattdessen bewirkten freie Bodenfläche, Blattvergilbung und Befall mit *R. solani* lokale Erhöhungen der Temperatur (Abb. 3-69, A und C).

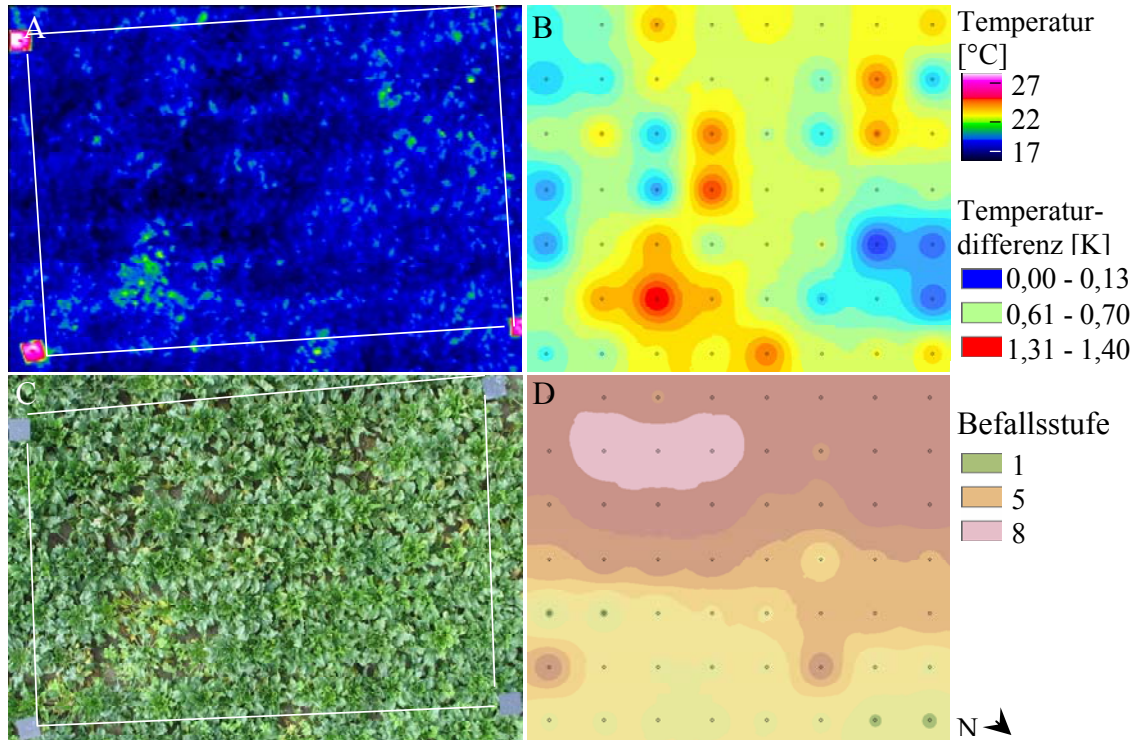


Abb. 3-69 Aufsicht der Parzelle 5 am Standort Poppelsdorf am 24.08.2005: Thermogramm (A), georeferenzierte Karte der Temperaturdifferenz (B), Lichtbild (C) und georeferenzierte Befallskarte für *Cercospora beticola* (D) (Befallsstufe: 0 = gesund, 9 = Blattverlust, 100 % Befallshäufigkeit auf > 10 Blättern).

Auch wenn bei Parzelle 8 eine gewisse Übereinstimmung der räumlichen Ausdehnung geringerer Temperatur und erhöhter Befallsintensität vorhanden war, so war eine lokal erhöhte Temperatur in der Regel auf freie Bodenfläche aufgrund von Bestandeslücken durch *R. solani* zurückzuführen (Abb. 3-70, A und C). Aus diesem Grund ließ sich nicht von der Höhe der Temperatur auf die Befallsstärke schließen.

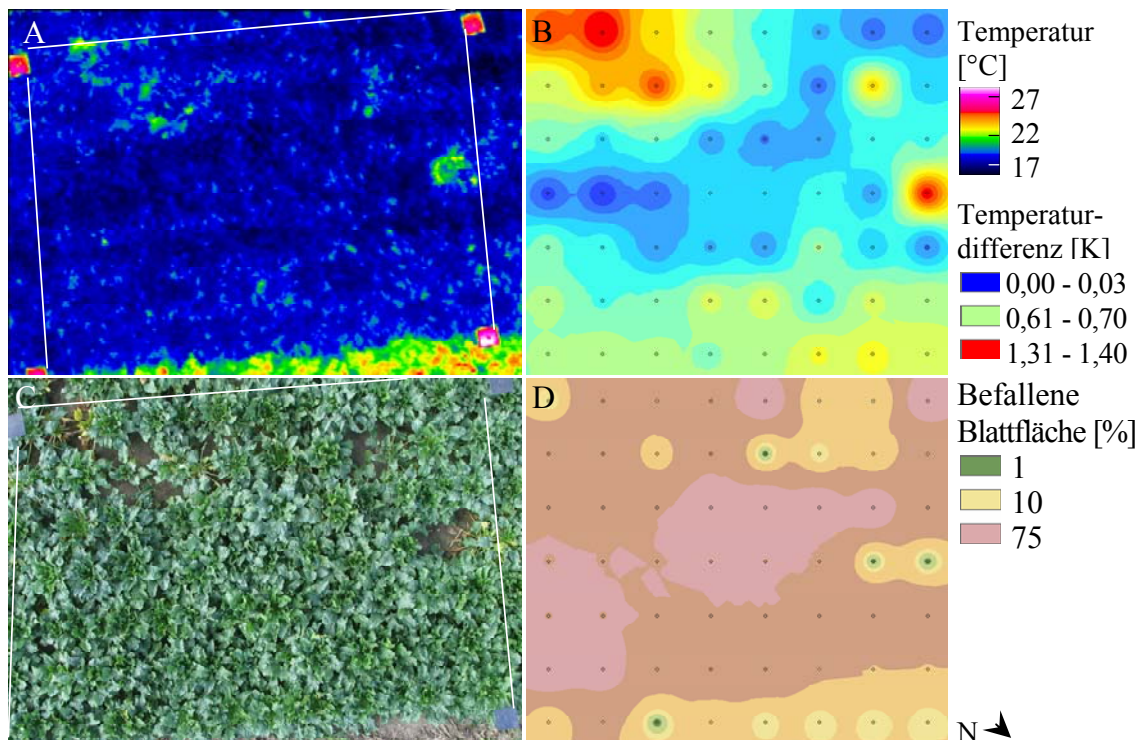


Abb. 3-70 Aufsicht der Parzelle 8 am Standort Poppelsdorf am 24.08.2005: Thermogramm (A), georeferenzierte Karte der Temperaturdifferenz (B), Lichtbild (C) und georeferenzierte Befallskarte für das Pathogen *Erysiphe betae* (D).

3.6 Detektion von Befalls-Risikobereichen über Temperaturzonen im Bestand

Das Risiko für einen Befall durch die Pathogene war nicht nur für die Standorte unterschiedlich hoch, sondern auch innerhalb der Versuchsfelder. Auf Grundlage der Boniturdaten eines jeden Termins wurden für die Standorte Klein-Altendorf, Frankenforst und Dikopshof Rangfolgen für das Risiko eines Befalls durch die drei Pathogene erstellt.

Im Jahr 2005 ging am Standort Klein-Altendorf von den Pathogenen *C. beticola* und *U. betae* das durchschnittlich geringste Befallsrisiko mit einem Wert von etwa 2 aus (Abb. 3-71). Bei *C. beticola* und *U. betae* war dies auf die geringe Befallsstärke zurückzuführen. Aufgrund des späten Befalls mit *U. betae* lag das Befallsrisiko für *C. beticola* um 0,3 höher. Das Vorkommen von *Cercospora*-Blattflecken war im Feld homogen, das des Rübenrostes inselartig. Der Standort erwies sich als günstig für die Ausbreitung von *E. betae*. Dessen durchschnittliches Befallsrisiko war 4,8, die Befallsstärke variierte genauso viel wie die von *U. betae*. Der Unterschied im Verbreitungsmuster zwischen beiden Pathogenen lag darin, dass *U. betae* gleichmäßig verteilt

Befallsinseln verursachte, welche bei *E. betae* tendenziell gruppiert waren.

Ein Jahr später fiel das Befallsrisiko für *U. betae* auf dem Frankenforst noch geringer aus als für Klein-Altendorf. Die Befallsrisikogruppe war 1,2 und die Streuung betrug nur 1 (Abb. 3-71). Die Verteilung des Befallsrisikos innerhalb des Feldes entsprach den Boniturwerten vom 16.10.2006. Der Befall durch *C. beticola* war mit einem Befallsrisiko von 3,3 höher als in Klein-Altendorf, die Heterogenität der Verbreitung innerhalb des Feldes dagegen geringer. Das Befallsrisiko von *E. betae* für den Frankenforst war mit 4,5 nur minimal geringer als in Klein-Altendorf, die Feldregionen unterschieden sich aber stärker in der Befallshöhe. Die Bedingungen im südlichen und nördlichen Feldende begünstigten den stärksten Befall.

Das Risiko für einen Befall mit *C. beticola* war für den Dikopshof im Jahr 2006 am größten. Hier erreichte das Pathogen ein Befallsrisiko von 4,1 (Abb. 3-71). Die Variabilität innerhalb des Feldes war aber gering. Starker Befall beschränkte sich auf die nordwestliche Ecke, eine begrenzte Stelle im Norden und auf den südlichen Feldrand. Mit 1,8 hatte der Dikopshof das geringste Risiko für einen Befall durch *E. betae* von allen Versuchsstandorten. Dennoch war der Befall innerhalb des Feldes heterogen. Hauptbefallszone war die nordwestliche Feldecke (Abb. 3-71, E).

Die Befallswerte der *Cercospora*-Blattflecken auf dem Standort Klein-Altendorf korrelierten schwach mit der Bodentemperatur vom 12.05. (Tab. 3-9, C). Dennoch war der Befall mit *C. beticola* in Regionen mit einem kühleren Boden tendenziell stärker als in denen mit einem wärmeren (Abb. 3-72, A, C). Die Korrelation mit der Bestandestemperatur am 18.08.2005 war geringer. Sowohl bezüglich der Boden- als auch der Bestandestemperatur nahm die Korrelation mit zunehmender Befallsstärke ab. Die Befallsrisikogruppen für das Pathogen korrelierten besser mit dem Boden als mit dem Bestand, generell aber weniger stark als die Befallswerte zu bestimmten Boniturerminen.

Bei *E. betae* korrelierten alle Befallswerte außer denen am 19.08. und 31.08.2005 stärker mit der Temperatur des Bodens als mit der des Bestandes (Tab. 3-9, E). Die Korrelationskoeffizienten waren durchweg positiv. Im Gegensatz zu *C. beticola* verbreitete sich *E. betae* also vorwiegend dort, wo der Boden und der Bestand hohe Temperaturen aufwiesen (Abb. 3-72, B und C, D und E). Die höchsten Koeffizienten wurden zwischen den Befallswerten vom 29.09.2005 und der Bodentemperatur mit 0,49 und denen vom 19.08.2005 und der Bestandestemperatur mit 0,50 erreicht.

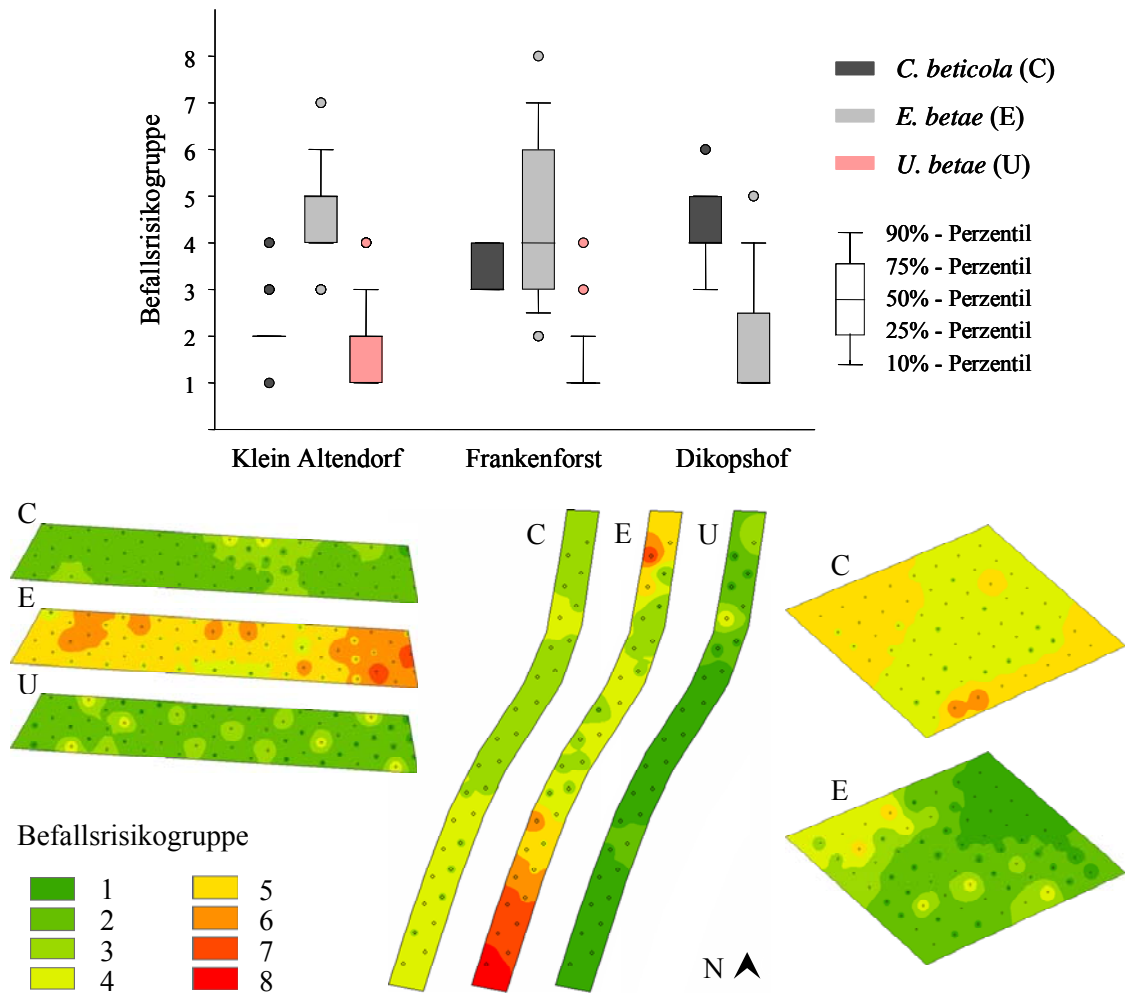


Abb. 3-71 Verteilung der Befallsrisikogruppen für die Pathogene *Cercospora beticola*, *Erysiphe betae* und *Uromyces betae* an den Standorten Klein-Altendorf 2005, Frankenforst und Dikopshof 2006 auf Grundlage der Befallshäufigkeit und -stärke an den Boniturstellen. Georeferenzierte Karten der Befallsrisikogruppen (Befallsrisikogruppen: 1 = kein Befall an jedem Boniturtermin, 8 = sehr starker Befall an jedem Boniturtermin).

Während bei zunehmender Befallsstärke die Korrelation mit der Bodentemperatur relativ konstant blieb, nahm sie in Bezug auf die Bestandestemperatur vom 18.08.2005 ab. Die Korrelation zwischen der Verbreitung der Befallsrisikogruppen für *E. betae* mit der Temperatur des Bodens war stärker als mit der des Bestandes. Mit einem Wert von -0,49 entsprach erstere dem höchsten Wert, der durch die Korrelation mit den Befallswerten an einem einzelnen Boniturtermin erreicht wurde (Tab. 3-9).

Die Befallswerte von *U. betae* korrelierten nicht oder nur sehr gering mit der Boden- und Bestandestemperatur (Tab. 3-9, U). In beiden Fällen erreichten die Befallsrisikogruppen minimal höhere Koeffizienten. Zwischen dem Befallsrisiko aller Pathogene und den Temperaturen bestand kein Zusammenhang (Tab. 3-9; Abb. 3-72, F).

Tab. 3-9 Korrelationskoeffizienten aus der Korrelation der Befallswerte der Pathogene *Cercospora beticola* (C), *Erysiphe betae* (E) und *Uromyces betae* (U) zu den einzelnen Boniturterminen, der Befallsrisikogruppen für jedes einzelne Pathogen¹ und für alle Pathogene zusammen² mit der Temperaturdifferenz (T_d) für den Standort Klein-Altendorf am 12.05.2005 und 18.08.2005.

Boniturtermin	T _d 12.05.2005			T _d 18.08.2005		
	C	E	U	C	E	U
25.07.2005	-0,25			-0,08		
1.08.2005	-0,31			-0,16		
11.08.2005	-0,37			-0,28		
19.08.2005	-0,38	0,37		-0,20	0,50	
31.08.2005	-0,33	0,27		-0,20	0,29	
15.09.2005	-0,32	0,44	-0,03	-0,04	0,13	0,05
29.09.2005	-0,15	0,49	0,09	0,05	0,05	0,04
14.10.2005	0,02	0,30	0,10	0,09	0,14	0,05
Befallsrisiko ¹	-0,29	0,49	-0,11	-0,14	0,27	-0,13
Befallsrisiko insgesamt ²		0,16			-0,08	

Die anfänglichen Befallswerte von *C. beticola* zu den einzelnen Boniturterminen korrelierten mit der Oberflächentemperatur des gesunden Bestandes vom 4.07., 18.07. und 17.08.2006 am Frankenforst, nur sehr gering, mit zunehmenden Befall stärker (Tab. 3-10, C). Erst ab einer durchschnittlichen Befallsstärke von 5 und einer Auffächerung der Befallsstufen stieg die Korrelation über -0,50, mit einem Maximum von -0,66 zwischen der Bestandestemperatur vom 17.08.2006 und dem Befall am 6.10.2006 (Abb. 3-73, A und D). *Cercospora*-Blattflecken waren also besonders auf Zuckerrüben in den Bereichen des Feldes mit niedriger Temperatur vorzufinden (Abb. 3-74). Für die Korrelation mit dem Boden und mit der Temperatur bereits befallenen Bestandes traf das Gegenteil zu. *C. beticola* trat bevorzugt dort auf, wo die Bodentemperatur hoch war (Abb. 3-73, C). In Bereichen, in denen die Blattkrankheiten stärker vertreten waren, war die Temperatur am 21.09.2006 maximal ein halbes Grad höher als in den übrigen (Abb. 3-73, E). Zwar korrelierten die Befallsrisikogruppen wenig mit der Temperatur, bezüglich der Bodentemperatur waren sie aber am höchsten. Zonen hohen Befalls deckten sich mit denen hoher Temperatur (Abb. 3-71; Abb. 3-73, C).

Tab. 3-10 Korrelationskoeffizienten aus der Korrelation der Befallswerte der Pathogene *Cercospora beticola* (C), *Erysiphe betae* (E) und *Uromyces betae* (U) zu den einzelnen Boniturterminen, der Befallsrisikogruppen für jedes einzelne Pathogen¹ und für alle Pathogene zusammen² mit der Temperaturdifferenz (T_d), berechnet aus den Temperaturwerten an jeder Boniturstelle vom Standort Frankenforst am 4.07.2006, 18.07.2006, 17.08.2006 und 21.09.2006, sowie des durchschnittlichen Ranges aus den Temperaturdifferenzen vom 4.07. bis 17.08.2006.

Boniturtermin	T_d 5.05.2006			T_d 4.07.2006			T_d 18.07.2006			T_d 17.08.2006			T_d 21.09.2006			T_d -Rang (4.07.-17.08.2006)		
	C	E	U	C	E	U	C	E	U	C	E	U	C	E	U	C	E	U
10.08.2006	0,12			-0,17			-0,11			-0,20			0,33			-0,21		
18.08.2006	0,34			-0,19			-0,17			-0,25			0,18			-0,28		
29.08.2006	0,00	-0,02		0,00	-0,14		0,00	-0,20		0,00	-0,15		0,00	-0,04		0,00	-0,11	
12.09.2006	-0,04	0,27		-0,18	-0,22		-0,12	-0,39		-0,09	-0,48		0,09	0,05		-0,15	-0,40	
20.09.2006	0,32	0,27		-0,08	-0,08		-0,14	-0,24		-0,18	-0,42		-0,12	0,09		-0,14	-0,32	
6.10.2006	0,33	-0,07		-0,44	0,01		-0,59	-0,21		-0,66	-0,30		0,03	-0,21		-0,63	-0,20	
16.10.2006	0,30	0,01	0,32	-0,44	0,25	0,18	-0,53	0,09	0,20	-0,58	0,01	0,16	0,03	-0,26	-0,01	-0,57	0,11	0,17
Befallsrisiko ¹	0,50	0,20		0,35	-0,14		0,28	-0,32		0,09	-0,44		-0,19	-0,01		0,19	-0,35	
Befallsrisiko insgesamt ²		0,23			0,00			-0,19			-0,34			-0,02			-0,25	

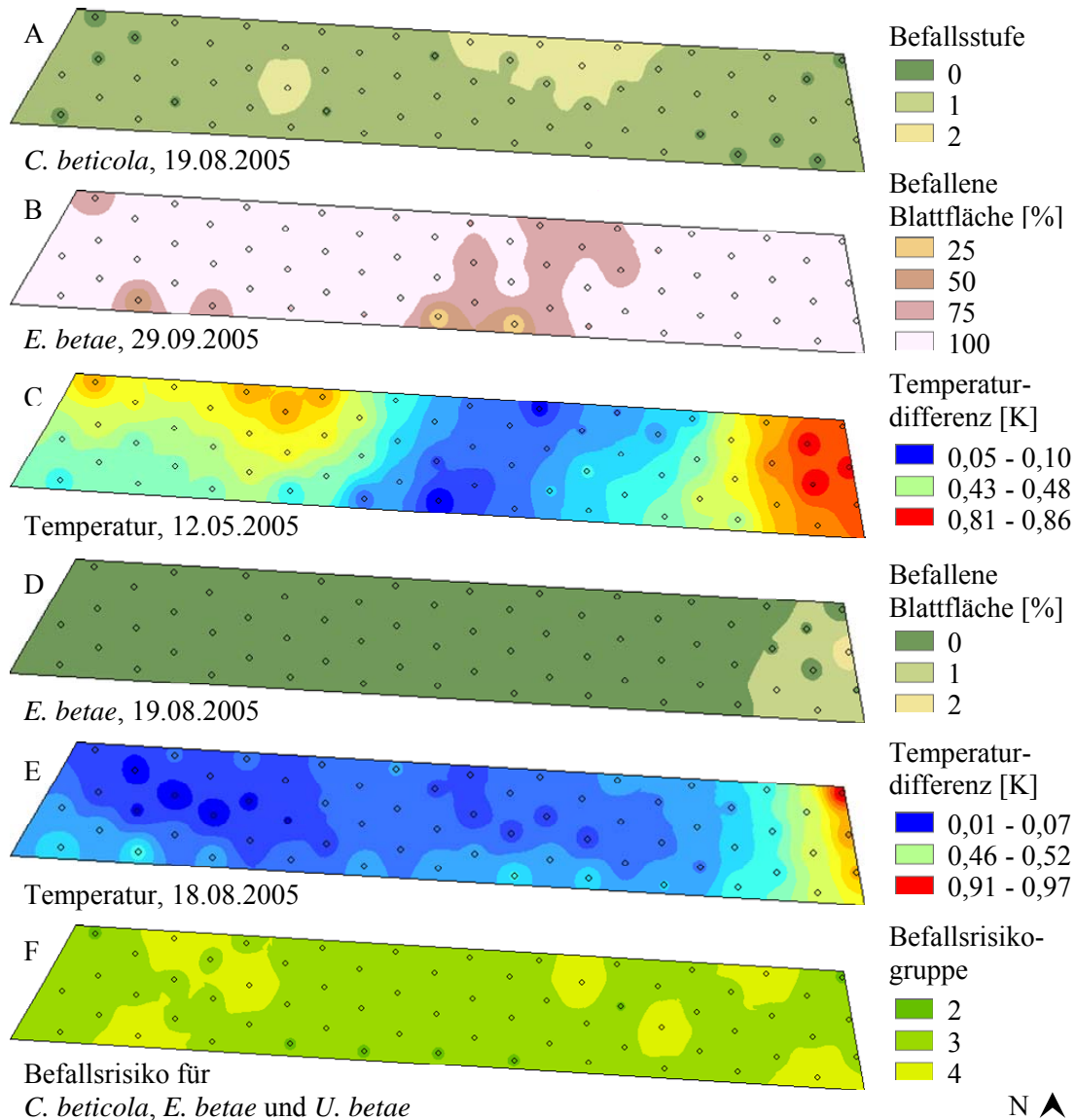


Abb. 3-72 Georeferenzierte Karten vom Standort Klein-Altendorf: Verbreitung der *Cercospora*-Blattfleckenkrankheit am 19.08.2005 (A), von Ephemem Mehltau am 29.8. (B) und 19.8.2005 (D), des durchschnittlichen Befallsrisikos für die Pathogene *Cercospora beticola*, *Erysiphe betae* und *Uromyces betae* (F), und die Oberflächentemperatur des Bodens am 12.05.2005 (C) und des Bestandes am 18.08.2005 (E) (Befallsrisikogruppen: 1 = kein Befall an jedem Boniturtermin, 8 = sehr starker Befall an jedem Boniturtermin).

Bei Ephemem Mehltau verliefen die Korrelationswerte gegenläufig. Hier waren sie zu Beginn des Befalls tendenziell höher als am Ende (Tab. 3-10, E). Insgesamt waren sie negativ, bezüglich der Temperatur des Bodens und des kranken Bestandes mitunter positiv. Auch bei *E. betae* korrelierten die Befallsrisikogruppen weniger stark mit der Temperatur als die Befallswerte einzelner Termine. Der höchste Koeffizient wurde mit der Korrelation des Befalls vom 12.09.2006 und der Oberflächentemperatur vom 17.08.2006 erreicht. (Abb. 3-73, B und D).

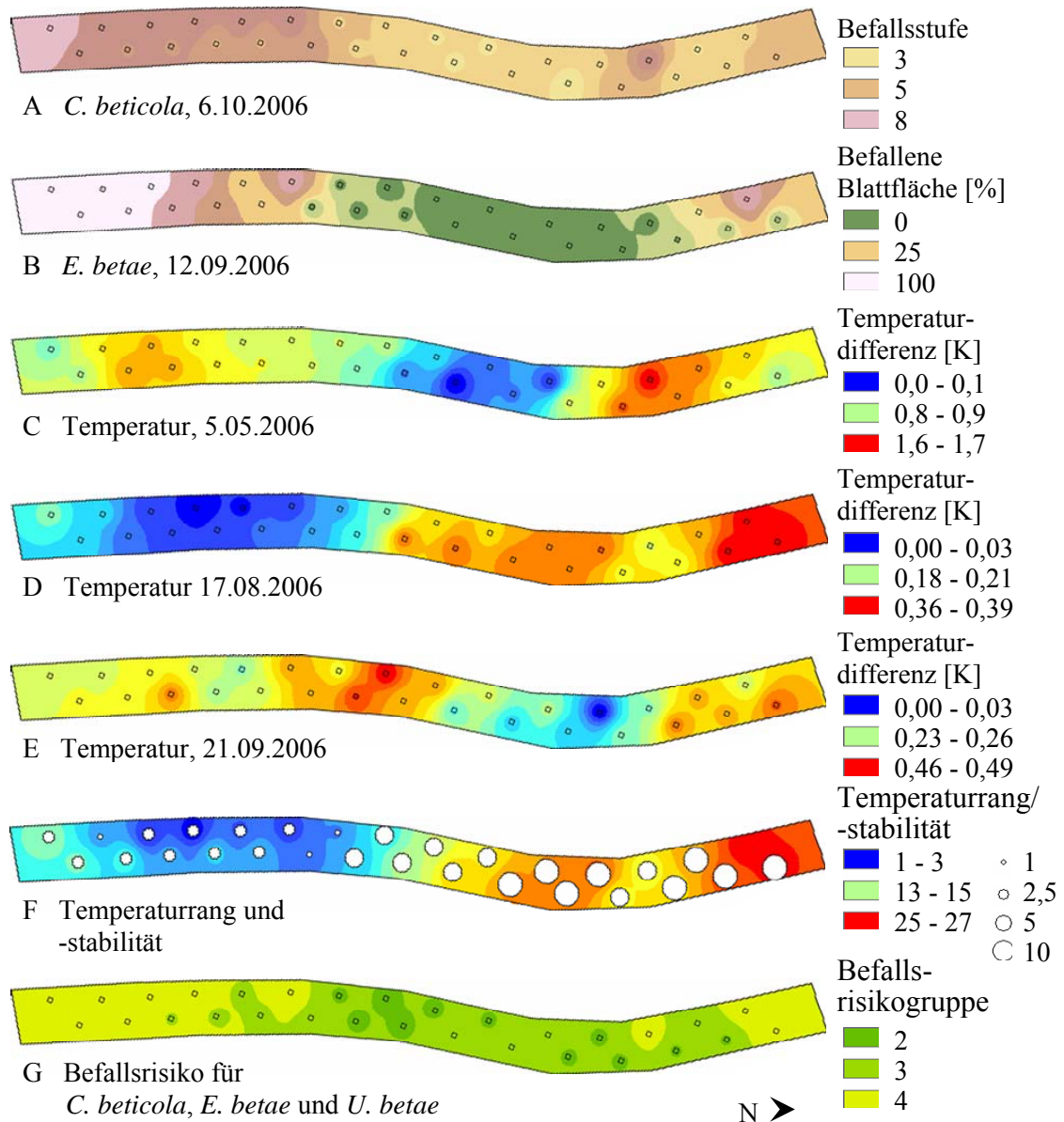


Abb. 3-73 Georeferenzierte Karten vom Standort Frankenforst: Verbreitung der *Cercospora*-Blattfleckenkrankheit am 6.10.2006 (A), von Ephememem Mehltau am 12.9.2006 (B), des durchschnittlichen Befallsrisikos für die Pathogene *Cercospora beticola*, *Erysiphe betae* und *Uromyces betae* (G), die Oberflächentemperatur des Bodens am 5.05.2006 (C), des Bestandes am 17.08. (D) und 21.09.2006 (E), und der Temperaturrang sowie die -stabilität (F), berechnet aus den Thermogrammen vom 4.07. bis 17.08.2006 (Temperaturstabilität: 1: stabil, 10: nicht stabil; Befallsrisikogruppen: 1 = kein Befall an jedem Boniturtermin, 8 = sehr starker Befall an jedem Boniturtermin).

Die Befallswerte von *U. betae* korrelierten nur sehr gering positiv mit der Temperatur vom 18.07.2006 und gering mit der Bodentemperatur (Tab. 3-10, U).

Feldbereiche, in welchen für die Zuckerrüben das Risiko an einer der drei Krankheiten zu erkranken besonders hoch war, korrelierten gering mit der Oberflächentemperatur des gesunden Bestandes (Tab. 3-10; Abb. 3-73, G).

Zwischen dem 4.07. und 17.08., als der Bestand nicht oder nur minimal von Blattkrankheiten betroffen war, hatte die südliche Kuppe durchgehend die geringsten Oberflächentemperaturen. Den höchsten Temperaturrang hatte die Kuppe im Norden, einen mittleren die Senke (Abb. 3-73, F). Die Temperatur vom 17.08. kam der Verteilung der Temperaturränge am nächsten, und somit ähnelten sich die Korrelationskoeffizienten beider. Grundsätzlich nahm die Temperaturstabilität mit steigendem Rang ab. So wies nur die südliche Kuppe konstante Temperaturen auf, im Bereich der Kuppe im Norden und der Senke kam es dagegen zu Temperaturschwankungen (Abb. 3-73, F).

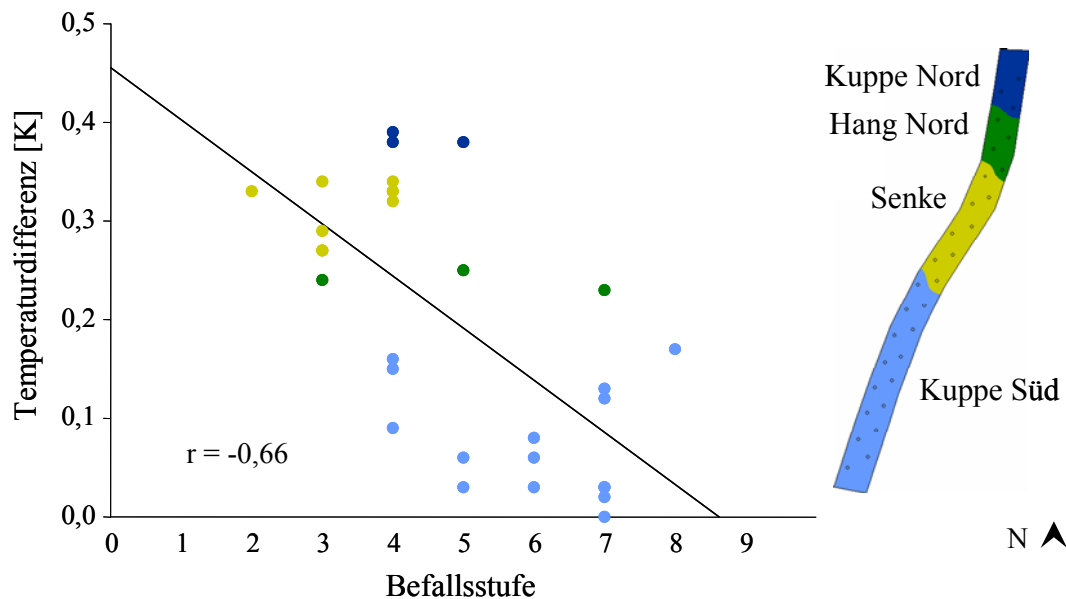


Abb. 3-74 Korrelation zwischen dem Befall mit *Cercospora beticola* am 6.10.2006 auf dem Versuchsfeld Frankenforst, und der Oberflächentemperatur des Bestandes zum 17.08.2006, sowie die Zugehörigkeit der einzelnen Korrelationswerte zu topographischen Merkmalen des Standortes.

Auch beim Versuchsfeld Dikopshof konnte zwischen dem Befall durch *C. beticola* und der Oberflächentemperatur des Bestandes ein stärkerer Zusammenhang festgestellt werden als mit der des Bodens (Tab. 3-11, C). Das Pathogen hatte besonders die Pflanzen in denjenigen Regionen infiziert, die zwischen Anfang Juli bis in den späten August stets die geringste Oberflächentemperatur hatten. Der maximale Korrelationskoeffizient von -0,71 wurde zwischen den Befallswerten vom 12.09.2006 und der Bestandestemperatur vom 18.07.2006 erreicht (Abb. 3-75, A und D). Bei der Zuordnung der Befallswerte einzelner Boniturstellen zu topographischen Gegebenheiten des Feldes ließ sich der Zusammenhang zwischen Befallsstärke, Temperatur und Topographie darstellen (Abb. 3-76).

Tab. 3-11 Korrelationskoeffizienten aus der Korrelation der Befallswerte der Pathogene *Cercospora beticola* (C) und *Erysiphe betae* (E) zu den einzelnen Boniturterminen, der Befallsrisikogruppen für jedes einzelne Pathogen¹ und für alle Pathogene zusammen² mit der Temperaturdifferenz (T_d), berechnet aus den Temperaturwerten an jeder Boniturstelle vom Standort Dikopshof am 4.07.2006, 18.07.2006, 17.08.2006 und 21.09.2006, sowie des durchschnittlichen Ranges aus den Temperaturdifferenzen vom 4.07. bis 17.08.2006 und der Bodenzahl.

Boniturtermin	T _d 5.05.2006		T _d 4.07.2006		T _d 18.07.2006		T _d 17.08.2006		T _d 21.09.2006		T _d -Rang		Bodenzahl	
	C	E	C	E	C	E	C	E	C	E	C	E	C	E
21.07.2006	0,09		-0,03		-0,03		0,04		0,10		-0,04		0,14	
1.08.2006	-0,13		-0,19		-0,23		-0,17		-0,21		-0,23		0,31	
16.08.2006	-0,34		-0,35		-0,39		-0,31		-0,20		-0,36		0,32	
29.08.2006	-0,37	0,14	-0,42	-0,26	-0,50	-0,25	-0,44	-0,12	-0,47	0,17	-0,44	-0,22	0,29	0,25
12.09.2006	-0,35	0,13	-0,63	-0,33	-0,71	-0,36	-0,57	-0,15	-0,26	0,18	-0,66	-0,33	0,61	0,56
20.09.2006	-0,34	0,10	-0,62	-0,11	-0,68	-0,16	-0,61	-0,07	-0,24	0,05	-0,66	-0,10	0,56	0,33
6.10.2006	0,00	0,16	0,00	0,07	0,00	0,07	0,00	0,11	0,00	0,03	0,00	0,11	0,00	0,05
Befallsrisiko ¹	-0,34	0,25	-0,62	-0,30	-0,70	-0,32	-0,58	-0,09	-0,24	0,20	-0,65	-0,26	0,56	0,55
Befallsrisiko insgesamt ²	0,06		-0,43		-0,49		-0,25		-0,06		-0,42		0,57	

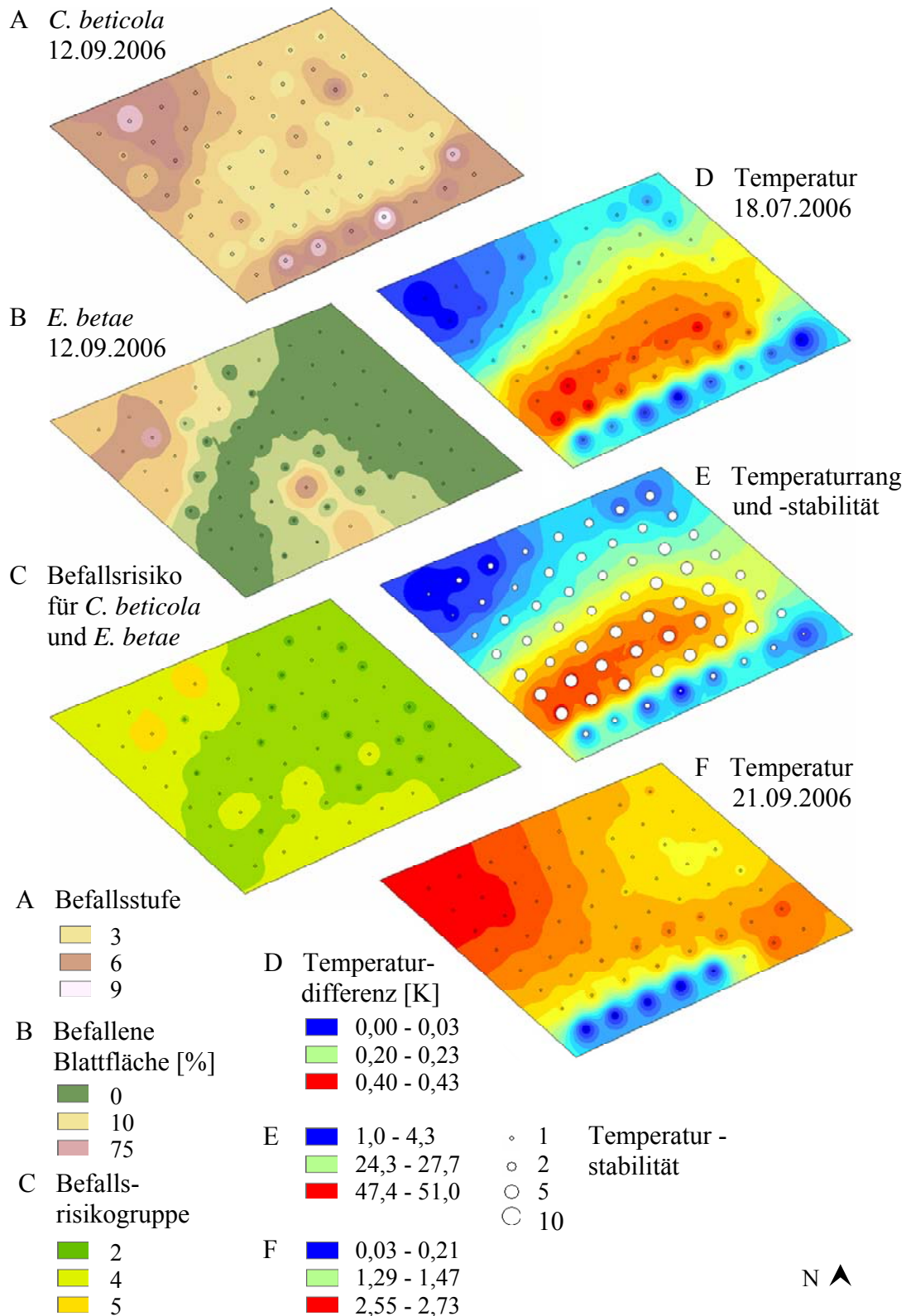


Abb. 3-75 Georeferenzierte Karten vom Standort Dikopshof: Verbreitung der *Cercospora*-Blattfleckenkrankheit und von Ephemem Mehltau am 12.09.2006 (A bzw. B), des durchschnittlichen Befallsrisikos für die Pathogene *Cercospora beticola* und *Erysiphe betae* (C), die Oberflächentemperatur des Bestandes am 18.07.(D) und 21.09.2006 (F), und der Temperaturrang sowie die -stabilität (E), berechnet aus den Thermogrammen vom 4.07. bis 17.08.2006 (Temperaturstabilität: 1: stabil, 10: nicht stabil; Befallsrisikogruppen: 1 = kein Befall an jedem Boniturtermin, 8 = sehr starker Befall an jedem Boniturtermin).

So konnte der Bereich der Senke durch hohe Befallswerte ab 5 und Temperaturdifferenzen unter 2 K fast vollständig vom Hangbereich mit niedrigen Befallswerten unter 5 und Temperaturdifferenzen über 4 K abgegrenzt werden. Einzige Ausnahme stellt eine Boniturstelle mit einer Temperaturdifferenz von 3 K bei einem Befallswert von 8 dar (Abb. 3-76, *).

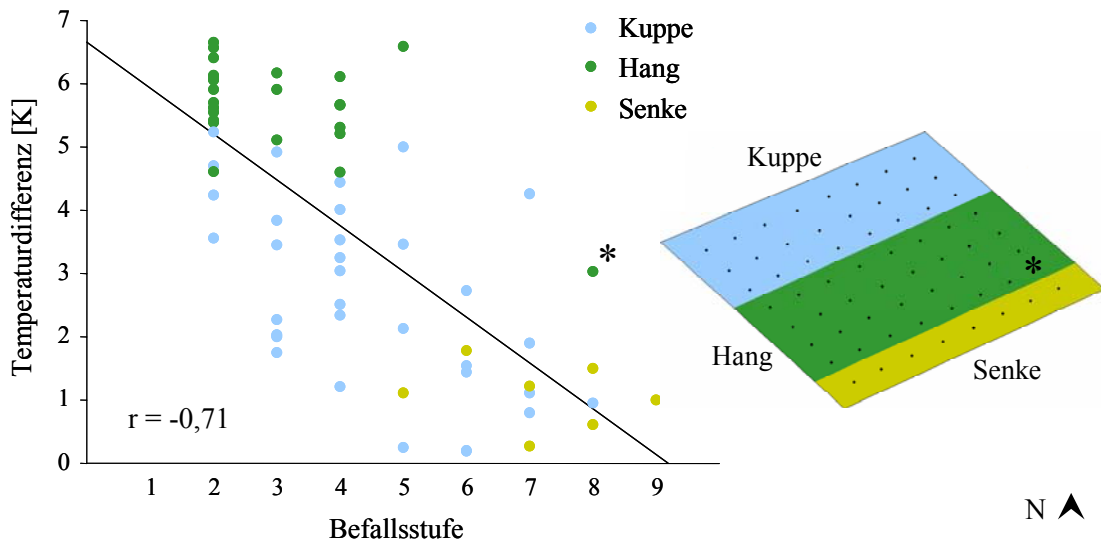


Abb. 3-76 Korrelation zwischen dem Befall mit *Cercospora beticola* am 12.9.2006 auf dem Versuchsfeld Dikopshof und der Oberflächentemperatur des Bestandes zum 18.07.2006, sowie die Zugehörigkeit der einzelnen Korrelationswerte zu topographischen Merkmalen des Standortes mit besonderer Hervorhebung der Boniturstelle 63 (*).

Wie beim Frankenforst nahm die Korrelation zwischen den Befallswerten des Pathogens und der Oberflächentemperatur des Bestandes mit steigendem Befall zu. Der Zusammenhang war zumindest bezüglich der Bestandestemperatur vom 4.07. und 18.07.2006 dann maximal, als die Krankheit mit den meisten Befallsstufen auftrat. Zonen, für welche ein hohes Befallsrisiko festgestellt worden sind (Abb. 3-71), deckten sich weitgehend mit den Bereichen des Feldes, die den geringsten Temperaturrang einnahmen (Abb. 3-75, E). Die Korrelation zwischen dem Befall und der Temperatur des bereits befallenen Bestandes am 21.09.2006 fiel sehr gering aus (Tab. 3-11, C; Abb. 3-75, F). Wie auch beim Versuchsfeld Frankenforst festgestellt, wurden die höchsten Koeffizienten bei der Korrelation mit der Oberflächentemperatur erreicht, die der durchschnittlichen Bestandestemperatur, ausgedrückt im Temperaturrang, am nächsten kam. Vor allem bei den ersten beiden Boniturterminen war die Korrelation zwischen der Bodenzahl an jeder Boniturstelle und dem Befall besser als die der

Temperaturen (Tab. 3-11, C). Hohe Befallswerte korrelierten mit hohen Bodenzahlen. Der Befall mit *E. betae* korrelierte durchweg schlechter mit den Temperaturwerten des Feldes als der mit *C. beticola* (Tab. 3-11, E). Keine oder nur eine sehr geringe Korrelation war zwischen dem Befall und der Oberflächentemperatur des Bodens beziehungsweise des kranken Bestandes vorhanden. Eine geringe Korrelation von -0,36 zwischen den Befallswerten vom 12.09.2006 und der Bestandestemperatur vom 18.07.2006 ließ sich zumindest anhand der Verbreitung der Krankheit in der kühleren Feldecke im Bereich der Kuppe bestätigen (Abb. 3-75, B und D). Im Gegensatz zu *C. beticola* waren auch wenige Pflanzen in der Hangregion sehr stark befallen. Auch an diesem Versuchsstandort konnte beobachtet werden, dass die Korrelation zwischen dem Befall und der Temperatur tendenziell zu Beginn des Auftretens von Echtem Mehltau besser war als am Ende der Vegetationsperiode. Der Befall am ersten und zweiten Boniturtermin korrelierte sehr viel besser mit den Bodenzahlen des Feldes, als mit den verschiedenen Temperaturen. Mit 0,56 war die Korrelation zwischen dem Befall am 12.09.2006 und den Bodenzahlen die höchste, die für das Pathogen erreicht wurde (Abb. 3-77). Bis auf eine Ausnahme, waren fast ausschließlich nur Pflanzen an den Boniturstellen im Feldbereich mit der Bodenzahl 81 auch über 25 % ihrer Blattfläche mit Echtem Mehltau befallen. Die Pflanzen im Feldbereich mit der geringsten Bodenzahl blieben dagegen überwiegend gesund.

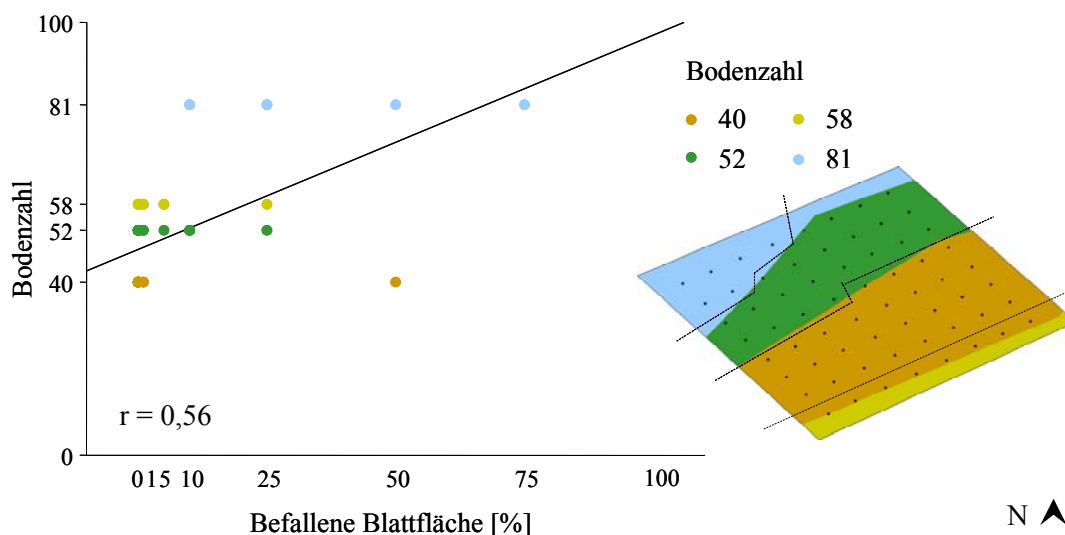


Abb. 3-77 Korrelation zwischen dem Befall mit *Erysiphe betae* am 12.9.2006 auf dem Versuchsfeld Dikopshof und der Bodenfruchtbarkeit dargestellt anhand der Bodenzahlen (Bodenzahl: 0 = minimale Bodenfruchtbarkeit, 100 = maximale Bodenfruchtbarkeit). Die gestrichelten Linien begrenzen die Boniturstellen auf die jeweiligen Bereiche der Bodenzahlen.

Die Korrelationen zwischen den Befallsrisikogruppen für das Pathogen und den Bodenzahlen wiesen mittlere Koeffizienten auf, bezüglich der Temperaturen des Feldes an den einzelnen Aufnahmetermen waren sie gering. Hinsichtlich der Oberflächentemperatur des Bodens und des kranken Bestandes hatten die Befallsrisikogruppen für *E. betae* sogar bessere Korrelationsergebnisse als bei den Befallswerten einzelner Boniturtermine.

Das Befallsrisiko für beide Blattkrankheiten stand beim Dikopshof in einem stärkeren Zusammenhang mit der Oberflächentemperatur des Feldes, als beim Frankenforst oder bei Klein-Altendorf. Dies galt vor allem für die Temperaturen vom 4.07. bis 17.08.2006, den Temperaturreng und die Bodenzahlen (Tab. 3-11; Abb. 3-75, C). Wie am Standort Frankenforst war die Temperatur in den Bereichen, die den niedrigsten Rang einnahmen am stabilsten. Temperaturschwankungen waren fast ausschließlich auf die Hangregion begrenzt und betrafen darüber hinaus nur in geringem Maße die nördliche Feldecke (Abb. 3-75, E).

4 DISKUSSION

Die Messungen der Temperatur des Blattapparates gesunder Zuckerrübenpflanzen ergaben, dass sie sich zwischen dem Keimblattstadium bis zum achten voll ausgebildeten Blatt im Verhältnis zur Lufttemperatur nicht signifikant änderte. MOYNIHAN et al. (1995) haben bei kälteempfindlichen Pflanzen eine aktive Wärmeentwicklung nach Kälteexposition nachgewiesen. Sie führen dies auf die Rolle der Alternativen Oxidase in der Respiration zurück. BREIDENBACH et al. (1997) betonen aber, dass die Erhöhung der Wärmeerzeugungsrate nicht ausreicht, um bei nicht-temperaturgenerierenden Pflanzen zu einer signifikanten Temperaturerhöhung von physiologischer Bedeutung zu führen. So wird eine aktive Erhöhung der Temperatur unabhängig von externen Einflüssen nur wenigen Pflanzen zugesprochen, wie zum Beispiel der Eidechsenwurz (*Sauromatum guttatum*) zur Zeit der Blüte (SKUBATZ et al., 1991). Die Temperatur von Pflanzen wird in der Regel von ihrer Verdunstung und externen Faktoren bestimmt. Faktoren, die zu einer Erhöhung der Blatttemperatur führen können sind beispielsweise eine erhöhte Sonneneinstrahlung, hohe Windgeschwindigkeiten bei geringer Einstrahlung, und große Blätter (GATES, 1973, GATES, 1980). Der Einfluss dieser Faktoren wurde in den Laborversuchen konstant gehalten oder weitestgehend eliminiert, daher konnte nur die Transpirationskühlung einen Effekt auf die Pflanzentemperatur haben. Dies zeigte sich in den Versuchen durch die geringere Temperatur des Blattapparates im Vergleich zur Lufttemperatur.

Da junge Pflanzen im Vergleich zu alten tendenziell kühler waren, wurde der Schwerpunkt weiterer Versuche auf die morphologischen Veränderungen des Blattapparates während der Pflanzenentwicklung gelegt. Die Temperatur eines sich entwickelnden Blattes nahm im Laufe seines Wachstums zu. Dass sich die absoluten Temperaturdifferenzen der Blätter eines Alters nicht immer gleich verhielten, mag darauf zurück zu führen sein, dass sich ein Wachstumsstadium trotz der Definition „... Blatt voll entfaltet“ nicht auf einen bestimmten Zeitpunkt eingrenzen ließ, der bei allen Pflanzen gleich war. So waren bei den ausgewählten Pflanzen teilweise minimale Wachstumsunterschiede vorhanden.

Bei Faktoren, die mit der Blattanatomie zusammenhängen, konnten komplexe Veränderungen festgestellt werden. Einer dieser externen Einflussfaktoren war die Einstrahlung. So waren die Blätter, welche sich näher an der Lichtquelle befanden, einer höheren Strahlungsstromdichte ausgesetzt als weiter entfernte oder beschattete. Im oberen Bereich des Blattapparates befinden sich stets die älteren Blätter einer Pflanze, und wie gezeigt wurde, auch die mit der größten Blattfläche.

Die Stellung der Blätter konnte zusammen mit ihrer Höhe eine Erhöhung der Temperatur bewirken. Die Fläche der Zuckerrübenblätter war aufgrund der waagrechten Ausrichtung dann am größten, wenn als sie innerhalb der Pflanze am höchsten standen. Nach dem Lambertschen Gesetz sind sie somit auch bezüglich ihrer Exposition einer höheren Strahlungsenergie ausgesetzt als schräg oder senkrecht stehende Blätter (HÄCKEL, 2005). Nach POOL und MCKAY (1916b) und MILFORD (1985a, 1985b) verläuft das Blattwachstum exponentiell, und jedes neu erscheinende Blatt wird größer als das vorherige. Nach GATES (1980) erwärmen sich große Blätter bei warmen, trockenen Bedingungen mit geringer Windbewegung stärker als kleine. Dies liegt an der höheren Grenzschichtdicke und somit am Diffusionswiderstand. Zudem wurde die Temperatur des gesamten Blattapparates über die durchschnittliche Temperatur der sichtbaren Blattfläche ermittelt. Damit nahm der Anteil eines Blattes an der ermittelten Gesamttemperatur ab, je weiter unten innerhalb der Pflanze es sich befand. Dann war nämlich dessen Fläche reduziert, weil es noch nicht voll entfaltet war und von den übrigen Blättern überdeckt wurde (BROWN und ROSENBERG, 1970). Dies traf auf die jüngsten und ältesten Blätter zu, welche auch bezüglich anderer morphologischer Merkmale tendenziell kühler waren als die Blätter mittleren Alters. Zusätzlich konnten sie sich aufgrund der Beschattung durch die darüber liegenden Blätter weniger erwärmen, beziehungsweise aufgrund geringerer Einstrahlungsenergie weniger transpirieren (BROWN und ROSENBERG, 1970).

Das Längenwachstum von Zuckerrübenblättern wechselt sich mit dem Breitenwachstum unabhängig von der Lufttemperatur oder dem Tag-/Nacht rhythmus ab (MILFORD et al., 1985a). Ursache ist die Zellteilung, die zu verschiedenen Zeiten in verschiedenen Bereichen des Blattes stattfindet. Dieser unregelmäßige Wachstumsprozess führt zur typischen Kräuselung bei Zuckerrübenblättern. Die Kräuselung, welche mit dem Alter des Blattes abnimmt, führt dazu, dass pro Raumeinheit mehr Blattgewebe vorhanden ist als bei nicht gekräuselten Blättern. BROWN und ROSENBERG (1970)

zeigten, dass bei jüngeren Blättern auch die Dichte an Stomata größer ist als bei älteren. Somit sind mehr Stomata vorhanden, durch die die Pflanze transpiriert und Transpirationskühlung bewirkt. Dieser Effekt ist möglicherweise größer, als dass durch die Blattkräuselung Luft mit einem hohen Wasserdampfgehalt über der Blattoberfläche zurückgehalten und somit die Verdunstungsrate reduziert wird. Die Kräuselung wirkt sich außerdem auf die Verteilung der Oberflächentemperatur innerhalb eines Blattes aus. CLARK und WIGLEY (1974) zeigten an Gurkenblättern, dass sich durch Erhebungen des Blattes unterschiedliche Temperaturzonen ausbilden können. Auch die räumliche Heterogenität der Transpiration könnte bei minimaler Grenzschicht eine Ursache für verschiedene Temperaturen auf Blattebene sein. JONES (1999) wies dies bei Gartenbohnen nach, auf deren Blättern es zu Temperaturunterschieden von $0,4 \text{ °C mm}^{-1}$ kam. LORENZ (1973) hingegen griff Untersuchungen von VAN HOYNINGEN-HUENE an Zuckerrübenpflanzen auf. Demnach seien die Haupteinflussfaktoren auf die Pflanzentemperatur die Strahlungsbilanz auf der einen, und der fühlbare und latente Wärmestrom auf der anderen Seite. Die jüngsten Blätter einer Pflanze seien bis zu 6 K kühler als die älteren, weil sie im Zentrum der Pflanze von den Nachbarblättern nahezu völlig beschattet würden. Die Ränder der älteren Blätter erführen Kühlung durch den Wind und seien daher wiederum etwas kühler als die Blattmitte. Diese hatte die höchste Temperatur aufgrund ihrer windgeschützten Lage, und weil sie die größte Fläche zur Aufnahme der Sonneneinstrahlung besitzt.

Die Intensität der Grünfärbung eines Blattes gibt einen Hinweis auf dessen Chlorophyllgehalt und seine Vitalität. Totes Gewebe ist aufgrund des Mangels an Energie und Wasser nicht zur Transpiration befähigt, daher fehlt hier die Transpirationskühlung. Demnach erwärmt sich bei sonst gleichen Bedingungen totes Blattgewebe verhältnismäßig mehr als lebendes. Da dunkle Oberflächen ein geringeres Reflexionsvermögen der Strahlung im sichtbaren Bereich besitzen als helle (HÄCKEL, 2005), können sich intensiv grün gefärbte Blätter theoretisch stärker erwärmen als durch Seneszenz vergilbte. Die Ergebnisse lassen aber vermuten, dass dieser Effekt einen geringeren Einfluss auf die Blatttemperatur hatte als die Höhe und Stellung der Blätter.

Verschiedene Wissenschaftler zeigten anhand von Modellen oder Experimenten einen negativen Zusammenhang zwischen der Transpiration und der Temperatur von Pflanzen oder einzelnen Blättern (INOUE et al., 1990, JONES, 1999, LINDENTHAL et al., 2005). In die Berechnung der Transpirationsrate gehen die Wasserdampfkonzentration

innerhalb und außerhalb des Pflanzengewebes, der Grenzschichtwiderstand und der Stomatawiderstand ein (TAIZ und ZEIGER, 2000). Nur der Stomatawiderstand ist direkt von der Pflanze kontrollierbar, indem die Poren durch die Schließzellen geschlossen oder geöffnet werden. Im Modell von INOUE (1990) war der Grenzschichtwiderstand gegenüber der Wasserdampfdiffusion kleiner als der Stomatawiderstand. MERLOT et al. (2002) schlossen daher aus ihren Versuchen, dass die Blatttemperatur hauptsächlich von der stomatären Leitfähigkeit, rechnerisch dem Kehrwert des Widerstands, abhängt. *Arabidopsis thaliana* Mutanten, unempfindlich gegenüber, beziehungsweise frei von Abscisinsäure, und daher nicht in der Lage ihre Stomata zu schließen, waren unter Wassermangelbedingungen ein Grad Celsius kühler als die Wildform. Auch JONES (1999) zeigte anhand des Iwanov-Effektes den Zusammenhang zwischen der Temperatur und dem Zustand der Stomata auf. Kurz nachdem Blätter von der Wasserzufuhr abgetrennt worden waren, öffneten sich deren Stomata und ihre Temperatur sank innerhalb von sieben Minuten auf fünf Grad Celsius unter die Lufttemperatur. Nach diesem ersten Effekt schlossen sich die Stomata dauerhaft und die Blätter erwärmten sich wieder. Die stomatäre Leitfähigkeit stieg zeitgleich mit der Abkühlung des Blattes auf fast das 40-fache. Stomata, die sich in den Bereichen eines Blattes befanden, welche mehr transpirierten und somit kühler waren, besaßen größere Poren. MERLOT et al. (2002) wiesen bei den *Thaliana*-Mutanten tendenziell größere Stomataöffnungen nach als beim Wildtyp. Mit Falschem Mehltau infizierte Gurkenblätter kühlten im Verhältnis zum gesunden Gewebe ab, sobald sich an der Infektionsstelle eine Chlorose bildete (LINDENTHAL et al., 2005). Die Stomata in den chlorotischen Blattbereichen hatten signifikant größere Poren als in den nekrotischen oder gesunden. BROWN und ROSENBERG (1970) wiesen einen Zusammenhang zwischen dem stomatären Widerstand und der Porenweite bei Zuckerrüben nach. Die durchschnittliche Größe der Poren auf der Blattoberseite der Zuckerrübenblätter änderte sich nicht mit dem Pflanzenwachstum. Ebenso kam es zu keiner signifikanten Änderung der Pflanzentemperatur. Der Unterschied in der Öffnungsweite der Stomata zwischen einzelnen Blättern verschiedenen physiologischen Alters nahm ab, je älter die Pflanze wurde. Möglicherweise verringerte sich so auch der Einfluss der Porengröße auf die gesamte Pflanzentemperatur, und andere Faktoren erlangten mehr Gewicht. Bei den einzelnen Blättern konnte hingegen zwischen der Zunahme der Porengröße mit dem Wachstum und einer Abnahme ihrer Temperatur im Verhältnis zur Umgebungstemperatur kein Zusammen-

hang festgestellt werden. Die jüngsten Blätter, welche bei den Zuckerrüben in der Regel die geringste Temperatur hatten, besaßen Stomata mit signifikant kleineren Poren als die älteren Blätter einer Pflanze. Dies ließe erwarten, dass sie eine geringere Transpirationsrate und somit eine geringere Temperatur besäßen. Hierbei ist aber noch nicht die Anzahl an Stomata berücksichtigt worden. Wie bei POOL und MCKAY (1916b) und BROWN und ROSENBERG (1970) war diese bei den jüngsten Blättern einer Pflanze immer signifikant größer als bei den Blättern höheren Alters. Außerdem nahm sie bei jedem Blatt im Laufe seines Wachstums ab. Auch POOL und MCKAY (1916b) stellten einen positiven Zusammenhang zwischen der Zunahme der Porengröße und dem Alter von Blättern fest, betonten aber, dass kleinere Stomata immer in einer größeren Anzahl vorhanden seien. BROWN und ROSENBERG (1970) berichteten zusätzlich, dass bei den jüngsten Blättern einer Pflanze nicht nur die Dichte der Stomata größer war als bei den älteren, sondern auch der stomatäre Widerstand, da dieser von der Porengröße abhängig sei. Zwar würde das wieder gegen eine höhere Transpiration der jüngsten Blätter sprechen, dennoch folgerten sie, dass der stomatäre Widerstand insgesamt nicht vom physiologischen Alter der Blätter abhängt. Da während des Blattwachstums die Größe der Stomata gleichermaßen zunimmt, wie ihre Dichte abnimmt, würden sich diese beiden Effekte kompensieren.

Die Blätter der verwendeten Zuckerrübensorten hatten einen Wassergehalt von mehr als 90 %. Die Abnahme des Wassergehaltes um durchschnittlich 5 % während des untersuchten Wachstums bei nahezu allen Blättern könnte durchaus ein Grund für die Erhöhung der Blatttemperatur sein. HÄCKEL (2005) schrieb Pflanzenorganen nur in geringem Maß die Eigenschaften der Wärmeleitfähigkeit oder -speicherung zu. Interessant war, dass das jüngste Blattpaar einer Pflanze stets den geringsten Wassergehalt hatte. Ein Teil des Wassergehaltes eines Zuckerrübenblattes entfällt auf die Blattadern. Diese sind bei jungen Blättern verhältnismäßig kleiner als bei älteren, in Proportion zu den Interkostalfeldern ist ihr Anteil bei den jüngeren Blättern aber recht hoch. Würde deren Wasserinhalt am meisten zum Wassergehalt eines Blattes beitragen, wäre dieser bei den jüngeren Blättern höher als bei den älteren. Möglicherweise enthalten sie aber am wenigsten Wasser von allen Blättern, weil ihre Transpiration und somit ihr Wasserverlust am höchsten ist. Photosynthese ist immer mit Wasserverlust verbunden (TAIZ und ZEIGER, 2000). BROWN und ROSENBERG (1970) schrieben aber zum einen die höchste photosynthetische Aktivität den Blättern mittleren physiologischen

Alters innerhalb einer Pflanze zu, zum anderen würde eine hohe Transpirationsrate immer eine hohe Wassernachlieferung und somit einen hohen Wassergehalt im Blatt zur Bedingung haben. Der Wassergehalt stellt also einen möglichen Einfluss auf die Blatttemperatur dar, da er im Laufe des Blattwachstums abnimmt. Auf der anderen Seite scheint der Effekt bei der Betrachtung der gesamten Pflanze nicht ausschlaggebend für die Temperaturverteilung zwischen den Blättern zu sein.

Wassermangel führte bei Zuckerrüben zu einem Anstieg der Blatttemperatur und zu einer Annäherung an die Lufttemperatur. Höhere Differenzen zwischen der Pflanzen- und der Umgebungstemperatur wurden an Pflanzen im Freiland beobachtet. GEBHARDT (1984) maß bis zu 10 K Temperaturunterschied zwischen Zuckerrüben, die in der Vegetationsperiode 1981 nicht, beziehungsweise zusätzlich bewässert wurden. O'TOOLE und HATFIELD (1983) und INOUE (1990) lösten bei Pflanzenarten Wassermangel aus, indem sie einen Teil der Wurzeln von den Pflanzen abtrennten, und stellten für Sorghum, Mais, Gartenbohne, Weizen und Baumwolle Temperaturdifferenzen zur Umgebungsluft von 2,5 bis 8,5 K fest. RASHID et al. (1999) nutzen die Thermographie, um zwölf Weizensorten auf Toleranz gegenüber Trockenheit zu untersuchen. Sorten, welche besonders empfindlich auf Trockenheit reagierten, hatten durchschnittlich höhere Temperaturen als die toleranten. Die Ursache für einen Anstieg der Temperatur bei Wassermangel wird im Allgemeinen auf eine verringerte Transpiration zurückgeführt. CLOVER et al. (1999) maßen eine Reduktion der Transpirationsrate um 8 % bei Zuckerrübenpflanzen, die aufgrund von Wassermangel bereits welkten. Schon SLAVIK (1958) stellte für abgetrennte Zuckerrübenblätter fest, dass sich für jedes weitere Prozent an Wasserdefizit pro Stunde die stomatäre Transpiration um 7 % verringerte. Das erklärt auch warum die Reaktion auf Wassermangel so rasch innerhalb von wenigen Tagen erfolgt ist. KRAMER (1937) bezog sich ebenfalls auf die Transpiration als Ursache für Symptome auf Wassermangel, setzt sie allerdings in ein Verhältnis zur Absorption. Erst eine Verschiebung des Gleichgewichts hin zur Transpiration führt zu Trockenstress. Dies spielt besonders im Freiland eine Rolle, da dort anders als im Gewächshaus, zusätzliche Einflussfaktoren wie die Sonneneinstrahlung, der Wind, die relative Feuchtigkeit und die Wärme der Luft auf den Wasserhaushalt der Pflanzen einwirken (KRÜGER und WIMMER, 1927, O'TOOLE und HATFIELD, 1983). Oft wird die Transpirationsrate über den Wasserdampfdruckgradienten ausgedrückt, und so mit der Differenz zwischen der Temperatur der Bestandesoberfläche und der

Luft in Verbindung gesetzt (O'TOOLE and HATFIELD, 1983, ALDERFASI und NIELSEN, 2001, ISODA und WANG, 2002). Je größer der Wasserdampfdruckgradient ist, desto größer ist die Temperaturdifferenz (ALDERFASI und NIELSEN, 2001). Das heißt, dass bei einem hohen Gradienten die Transpirationsrate über die geöffneten Stomata steigt und sich so der Bestand gegenüber der Lufttemperatur abkühlt. Durch eine Verringerung der Transpiration wird der Wasserfluss innerhalb der Pflanze reduziert, beziehungsweise völlig zum Stillstand gebracht. Für die Pflanzenwurzel bedeutet dies, dass der Wasserstrom osmotisch wird, also nur noch durch Konzentrationsunterschiede aufrechterhalten wird. Somit stellen die Zellmembranen einen erhöhten Transpirationswiderstand dar (STEUDLE, 2000). Das Wachstum der Seitenwurzeln ist bei Wassermangel reduziert (CLOVER et al., 1999). Insgesamt erreicht weniger Wasser die Blätter, und zusammen mit einer Verringerung der stomatären Leitfähigkeit stehen somit weder Wasser noch Kohlendioxid für die Photosynthese zur Verfügung, so dass die Blätter schließlich zu welken beginnen (CLOVER et al., 1999, INOUE, 1990). Das wiederum führt dazu, dass die Blätter schneller altern und sich die Blattfläche verringert. CLOVER et al. (1999) stellten eine Zunahme der Blattalterung, eine Reduktion in der Initiation neuer Blätter und eine bis zu 17 % reduzierte Blattfläche bei trocken-gestressten Zuckerrübenpflanzen fest. Obwohl die Pflanzen welkten, konnte er keinen Einfluss auf die Temperatur nachweisen. Auch die eigenen Versuche zeigten, dass die ältesten Blätter schneller alterten, sich insgesamt weniger Blätter gebildet hatten, und die Blattfläche trocken-gestresster Rüben reduziert war. Es war aber auch zu erkennen, dass sich die Pflanzen wieder vom Wassermangel erholten, neue Blätter bildeten, und am Ende des Experiments sogar eine geringere Temperatur aufwiesen als die Pflanzen unter bedarfsgerechter Bewässerung. KOZLOWSKI (1968) und CLOVER et al. (1999) stellten fest, dass die mit Wassermangel verbundene Abnahme an Blattfläche reversibel ist. Nach KOZLOWSKI (1968) sind es gerade „die am aktivsten wachsenden Teile nach einer Welke, die die größte Wachstumshemmung während einer Periode unter Wasserstress erlitten“. Da sich diese dann wieder erholen, könnte dies, verbunden mit der erhöhten photosynthetischen Aktivität und folglich erhöhten Transpirationsrate erklären, warum die ehemals trocken-gestressten Pflanzen eine geringere Temperatur hatten als die stressfreien.

Auch Staunässe führte zu einer Erhöhung der Blatttemperatur, bereits einen Tag nach Versuchsbeginn. Bei Staunässe sterben die Wurzeln unter anderem aufgrund von

Sauerstoffmangel ab, und können ihre Funktion der Wasser- und Nährstoffaufnahme nicht mehr erfüllen (TROUGHT und DREW, 1980, SCHMIDHALTER, pers. Mitteilung). Bei Staunässe kann der Sauerstoffgehalt des Bodens innerhalb von zwei bis drei Tagen auf unter zwei Prozent sinken (CANNELL et al., 1979). Bei Pflanzen unter Staunässe wurde vermehrt Ethylen in den Blättern gefunden, welches zu einer weiteren physiologischen Veränderung führen kann. Bei der Tomatensorte *Diageotropica* wuchsen die Blätter bei Staunässe anstatt horizontal aufrecht vom Stängel weg. Die gleiche Reaktion wurde durch zusätzliche Ethylengaben ausgelöst (JACKSON, 1985). Vor allem die älteren Blätter der Zuckerrübenpflanzen wiesen unter Staunässe dasselbe Verhalten auf. Vielleicht liegt hier die gleiche Ursache zugrunde. Zu den weiteren Symptomen, die bei Pflanzen unter Staunässe auftreten können und auch bei den Zuckerrüben beobachtet wurden, gehört eine verfrühte Seneszenz der älteren Blätter und ein verringerter Zuwachs an Frischmasse (CANNELL et al., 1979, TROUGHT und DREW, 1980).

Es wurde vermutet, dass Zuckerrüben besser an Trockenheit als an Staunässe angepasst sind, weil ihre Wildform aus der mediterranen Region mit semiaridem Klima stammt. Zudem setzte Trockenstress erst ein, nachdem das noch im Boden verbliebene Wasser aufgebraucht war, Stress durch Staunässe begann dagegen gleich mit der ersten Überbewässerung. Auf der anderen Seite endete der Trockenstress sofort nach der ersten Bewässerung am fünften Tag nach Versuchsbeginn, wohingegen sich die Pflanzen erst dann von der Staunässe erholen konnten, als der Boden abgetrocknet war. Praktisch bestand der Stress unter Staunässe viel früher als der Trockenstress, wonach die Temperatur der Pflanzen unter Staunässe bereits zu einem früheren Zeitpunkt als fünf Tage nach Versuchsbeginn zu einem Vergleich herangezogen werden müssten.

Die mikroskopischen Befunde zu *Cercospora beticola* deckten sich mit denen von FEINDT et al. (1981a) und SACCARDO (CHUPP, 1953). Während selbst keine Infektion durch den Erreger beobachtet werden konnte, stellte RATHAIAH (1976) Penetrationen sowohl mit als auch ohne Appressorium in geschlossene und offene Stomata fest. Er untersuchte die Penetration in Abhängigkeit von Blattnässe bei Tag und/oder Nacht. Damit in Zusammenhang stand auch die Inkubationszeit, welche bei nasser Blattfläche nachts und trockener tagsüber zwischen fünf Tagen, und bei umgekehrten Verhältnissen oder durchgehender Blattnässe sechs bis neun Tage andauern konnte. Da die Zuckerrübenblätter in den eigenen Versuchen nach der Inokulation nicht mehr befeuchtet wurden, lässt sich damit die längere Inkubationszeit von sechs bis zehn

Tagen erklären. Ebenso konnte er beobachten, dass die Blattflecken unter den zuerst aufgeführten Bedingungen größer waren und früher zusammenflossen. In den eigenen Untersuchungen waren die Blattflecken maximal drei Millimeter groß und befanden sich so im Rahmen der Beobachtungen anderer Autoren (CHUPP, 1953, FEINDT et al., 1981a, RATHAIAH, 1976). Die erste Temperaturveränderung nach der Infektion ging mit einer lokalen Verringerung um 0,4 K an der Stelle einher, an welcher sich tags darauf ein deutlich sichtbarer Blattfleck bildete. CHAERLE et al. (2004) konnten dies ebenfalls beobachten, allerdings erschien bei ihnen der Effekt aufgrund einer thermischen Auflösung von 1 K stärker, die Ausdehnung war größer, und der Blattfleck war bereits sichtbar. Auch beim hemibiotrophen Erreger des Apfelschorfes, *Venturia inaequalis*, wurde an Apfelsämlingen als erste thermische Reaktion auf eine Infektion eine lokale Verringerung der Blatttemperatur festgestellt (OERKE et al., 2005). Diese Abkühlung des Gewebes müsste zeitlich mit dem Einsenken der Epidermis, wie sie auch von FEINDT et al. (1981a) dokumentiert wurde, übereinstimmen. CHAERLE et al. (2004) machten ein durch pilzliche Toxine verursachtes Kollabieren der Mesophyllzellen und die Evaporation von Zellflüssigkeit in die stomatare Höhle für die Abkühlung verantwortlich. Auch FEINDT et al. (1981b) stellten Plasmolyse und Kollaps der betroffenen Zellen fest.

Zeitgleich war die Chlorophyllfluoreszenz des Gewebes bei hoher Anregungsintensität erhöht. Ein ähnlicher Effekt wurde von CHAERLE et al. (2004) für eine geringere Lichtintensität beschrieben und dadurch erklärt, dass das vom Pathogen betroffene Gewebe im Gegensatz zu dem umliegenden, nicht Licht-saturierten Gewebe hervortrete. Der durch den Befall reduzierte Chlorophyllgehalt des Gewebes verringere das Reabsorptionsvermögen des Gewebes für die Chlorophyllfluoreszenz. Ein anderer Erklärungsansatz wäre eine vorübergehende Erhöhung der Chlorophyllfluoreszenz aufgrund erhöhter Photosyntheseleistung von Gewebebereichen infolge erhöhtem Energiebedarfs. Die erste Reaktion in einer kompatiblen Interaktion zwischen Zuckerrübe und *C. beticola* ist an der Kontaktstelle zwischen Hyphe und Wirtszelle ein leichtes Abheben des Plasmalemmas von der Zellwand (FEINDT et al., 1981b). An dieser Stelle werden Kallose und andere Polysaccharide zur Zellwandverstärkung abgelagert. FEINDT et al. (1981b) diskutierten den Zusammenhang zwischen der Abwehrreaktion der Pflanze und einem intensivierten Stofftransport. Eine transiente Erhöhung der Photosyntheseleistung von befallenem Gewebe wurde vor allem für Befall mit bio-

tropen Pathogenen beschrieben (SCHOLES und ROLFE, 1996).

Zwischen dem Einsenken der Epidermis und dem ausdifferenzierten Blattfleck war ein Stadium erkennbar, in welchem die Form des endgültigen Blattfleckes zwar zu erkennen, die typische Färbung aber noch nicht vorhanden war. Auf diese Beobachtung passt am besten die Beschreibung von CUNNINGHAM (1928), nach welcher außerhalb des Zentrums der Infektionsstelle erneute meristematische Aktivität zu einer definierten, also stark zum umgebenden Gewebe abgegrenzten Wundnarbe führt.

Im weiteren Krankheitsverlauf fand die Ausdifferenzierung in ein Zentrum und einen Rand statt. Bei CHAERLE et al. (2004) konnte mit einer thermischen Auflösung von 2 K und einen Tag nach der anfänglichen Abkühlung der Infektionsstelle der Blattfleck in zwei Zonen unterschiedlicher Temperatur unterteilt werden. Das Zentrum war wärmer mit einer deutlich reduzierten Chlorophyllfluoreszenz, der Rand kühler mit einer höheren Chlorophyllfluoreszenz als das umgebende Gewebe. Die eigenen Ergebnisse waren ähnlich, nur war auch der Nekrosenrand wärmer als das gesunde Blattgewebe. Die verringerte Transpiration und die verringerte Chlorophyllfluoreszenz lassen sich auf die Zerstörung der Parenchym- und Epidermiszellen durch das Pathogen zurückführen, wie die mikroskopischen Befunde zeigten. Da sich in diesem Bereich nur noch Pilzhyphen und tote Wirtszellen befanden, war keine Photosynthese mehr möglich. Trocknen die toten Zellen dann ein, erwärmt sich das Zentrum noch stärker gegenüber dem übrigen Gewebe. Im Randgewebe wiesen FEINDT et al. (1981b) nur vereinzelte Hyphen nach. Da ein Kollaps der Zellen immer nur dem Zentrum eines Blattfleckes zugewiesen wird, kann davon ausgegangen werden, dass die Zellen im Rand ihre Funktionen beibehalten konnten, solange sie nicht direkt vom Pathogen betroffen waren. Die verschiedenen Ergebnisse sind Anlass, die Definition eines Blattfleckes neu zu überdenken. Der als Rand bezeichnete Bereich weist durch seine dunkelbraune Farbe auf nekrotisches Blattgewebe hin. Nun kann davon ausgegangen werden, dass sich in diesem Bereich sowohl bereits nekrotisierte als auch noch funktionsfähige Zellen befinden, wobei die nekrotisierten überwiegen. Ebenso nimmt der Anteil der Hyphen vom Rand des Blattfleckes zur Nekrosenmitte hin zu (FEINDT et al., 1981b). Es ist nicht klar festzustellen, welchem Bereich die niedrigere Temperatur des Randes bei CHAERLE et al. (2004) zuzuordnen ist. Es ist anzunehmen, dass es sich im Gegensatz zu den eigenen Untersuchungen um das Gewebe außerhalb des visuell sichtbaren Blattfleckes handelt. Dafür spräche die verringerte Temperatur, die auf eine erhöhte

Photosyntheserate hinweisen könnte.

Dies könnte auch erklären, warum die Auswirkung auf die Chlorophyllfluoreszenz im Schwarzweiß-Bild eine größere Fläche einnahm als im Videobild. Da auch im Randgewebe die Zellen bereits geschädigt waren, wurde sowohl das Zentrum als auch der Rand als schwarze Fläche dargestellt. Erst durch die Verteilung der Pixel auf die entsprechenden Graubereiche konnte gesehen werden, dass der Rand des Blattfleckes zwar erhöhte, aber im Verhältnis zum gesunden Gewebe reduzierte Grauwerte besaß. Diese waren mit dem bloßen Auge nicht zu differenzieren, und wurden daher bei der Definition der Größe dem Zentrum zugewiesen. Auch eine methodische Abgrenzung war nicht möglich, da sich die Grauwerte zum gesunden Gewebe hin fließend erhöhten. Das heißt, dass die starke Differenzierung eines Blattfleckes, wie sie im sichtbaren Bereich vorhanden ist, so nicht existiert, wenn physiologische Parameter bildlich dargestellt werden. So lässt sich möglicherweise auch begründen, warum die thermische Ausdehnung des Zentrums größer war, als die visuelle. Da wie oben beschrieben der Randbereich einen Übergangsbereich zwischen totem und funktionsfähigem Wirtsgewebe darstellt, erstreckte sich die Verringerung der Transpiration auch auf den zum Zentrum angrenzenden Teil des Randes, was schließlich dazu führte, dass das Zentrum im Thermogramm größer, der Rand dagegen kleiner als das Pendant im Videobild erschien. Nur bei einigen Blattflecken konnte zusätzlich eine minimale Abkühlung außerhalb des Blattfleckes beobachtet werden. Dieser Bereich könnte den widerspiegeln, den CHAERLE et al. (2004) nachgewiesen haben. Dann würde er sich auch mit der Region hoher Chlorophyllfluoreszenz decken. In diesem Bereich ist die Nährstoffaufnahme durch das Pathogen am höchsten.

Blattflecken konnten auch insgesamt kühler sein als das grüne Blattgewebe. Es wurde vermutet, dass dies nur dann der Fall war, wenn der Pilz sporulierte. In diesem Fall würden verschiedene Aspekte für den Kühlungseffekt sprechen. Zum einen findet die Sporulation nur bei einer sehr hohen relativen Luftfeuchtigkeit von 96 bis 100% statt (BLEIHOLDER, 1971). Zum anderen ist sie dadurch gekennzeichnet, dass der Pilz Konidienträger bildet, welche sich in Büscheln außerhalb des Blattgewebes befinden. Somit können zwei Effekte wirken. Zwischen den Sporenbüscheln kann der Wasserdampf länger bestehen bleiben als auf der übrigen Blattoberfläche. Außerdem besitzen die Konidienträger und Konidien per se einen höheren Wassergehalt als es von totem Blattgewebe angenommen werden kann, in welchem sich ein Geflecht aus Pilzhyphen

befindet. Da *C. beticola* vor allem im Zentrum von Blattflecken Konidienträger bildet, erklärt dies, warum der Rand in diesem Fall wärmer war als das Zentrum.

Die durchschnittliche Blatttemperatur änderte sich trotz der Ausbildung von Symptomen nicht. *Cercospora*-Blattflecken bestehen aus einer wärmeren und einer kühleren Temperaturregion. Zwar waren sie in den eigenen Versuchen insgesamt wärmer, und eine kühlere Randzone wurde nur vereinzelt festgestellt, jedoch wirkte sich der Effekt von durchschnittlich drei Blattflecken mit einem Durchmesser von maximal drei Millimeter und einer Temperaturerhöhung von 1,2 K auf einer Blattfläche von 4 cm² minimal auf die Gesamttemperatur aus. Dies ist anders, wenn die befallene Blattfläche im Verhältnis zur photosynthetisch aktiven überwiegt. Obwohl auf gesunden Blättern Temperaturunterschiede von 1 K und mehr gemessen wurden, stieg die maximale Temperaturdifferenz im Krankheitsverlauf an, bis sie sich mit dem Beginn der Nekrotisierung der Blattflecken signifikant von der nicht inokulierten Blätter unterschied. Während bei der Berechnung der durchschnittlichen Blatttemperatur die Größe der Symptome miteinbezogen wird, spielt sie bei der maximalen Temperaturdifferenz keine Rolle. Aus diesem Grund kann theoretisch ein einziger Blattfleck mit einer signifikant höheren Temperatur über jeden anderen Blattbereich die maximale Temperaturdifferenz bestimmen.

Die mikroskopischen Untersuchungen zur Morphologie des Erregers *Erysiphe betae* bestätigten BLUMER (1967), BRAUN (1987) und DRANDAREVSKI (1969a). Die beiden letzteren und HAMACHER (1985) berichteten von kurzen Keimschläuchen. Das anfängliche Wachstum des Pilzes auf der Blattoberfläche geschieht sehr rasch. HAMACHER (1985) konnte bereits drei Stunden nach der Inokulation die Appressorienbildung beobachten. Während Penetrationen in seinen Versuchen immer nur durch die intakte Kutikula und Epidermiszellwand stattfanden, penetrierte der Pilz in den eigenen Untersuchungen auch durch die Poren der Stomata. Über einen Penetrationskeil dringt das Pathogen in die Pflanzenzelle ein, und stellt dort den direkten Kontakt zum Zellplasmalemma her (HAMACHER, 1985). Die Zytoplasmaaggregation unterhalb der Penetrationsstelle verschwindet meist innerhalb einer Stunde. Die ersten Konidienträger wurden ab dem vierten Tag nach Inokulation gebildet. In Versuchen von GORDON und DUNIWAY (1982a, 1982b) sporulierte das Pathogen sechs Tage nach Inokulation. Sie berichteten von einer Erhöhung der Diffusionsleitfähigkeit des Blattgewebes bezüglich Wasserdampf ab diesem Zeitpunkt in Zusammenhang mit einer Infektion. Außerdem

wiesen sie eine Störung in der Funktionsfähigkeit der Stomata nach, welche sich bei Dunkelheit nicht mehr schlossen. Dieses stomatäre Fehlverhalten wird auch durch Infektionen des Echten Mehltaus auf Erbse (*Erysiphe pisi*) verursacht (AYRES, 1976). LINDENTHAL et al. (2005) konnten das gleiche Verhalten im Krankheitsverlauf des ebenfalls obligat biotrophen Erregers *Pseudoperonospora cubensis* an Gurke nachweisen. In ihren Versuchen reduzierte sich die Blattemperatur präsymptomatisch um 0,8 K. HELLEBRAND et al. (2005) stellten um 0,2 bis 0,9 K niedrigere Temperaturen an Weizenpflanzen nach der Infektion mit dem Echten Mehltau (*Blumeria graminis*) fest. Die durchschnittliche Temperatur von Zuckerrübenblättern, welche mit *E. betae* befallen waren, nahm gegenüber nicht inokulierten um 0,62 K ab. Bis zum 13. Tag nach Inokulation war die Temperatur zwar immer noch geringer als die nicht inokulierter Blätter, diese Differenz war aber nicht mehr signifikant. Tatsächlich wiesen GORDON und DUNIWAY (1982b) nach, dass sich die Stomata infizierter Pflanzen zwar nachts nicht schlossen, dafür aber tagsüber die stomatäre Leitfähigkeit reduziert war, und befallene Rüben zehn Tage nach der Inokulation 55 % weniger Wasser verloren als gesunde. Sie zeigten, dass die Nettphotosyntheserate zeitlich nahezu linear nach der Inokulation abnahm, und machten dafür hauptsächlich eine Verminderung der Leitfähigkeit des Mesophylls und somit der Aufnahmefähigkeit von CO₂ verantwortlich. In geringerem Maße trugen dazu auch eine reduzierte stomatäre Leitfähigkeit und eine allmähliche Zunahme der Dunkelrespiration bei. Auch LINDENTHAL et al. (2005) wiesen eine Abnahme der Nettphotosyntheserate nach, und dass mit *P. cubensis* infizierte Gurkenblätter mit einer Temperaturzunahme reagierten. Im weiteren Verlauf der Pathogenese stieg auch die Temperatur der mit *B. graminis* befallenen Weizenpflanzen (HELLEBRAND et al., 2005). Die Zunahme der Temperatur lässt sich nicht nur mit einer Reduktion der Nettphotosyntheserate, sondern auch mit der Verschiebung des Gleichgewichts zwischen dieser und der Respirationsrate erklären (LINDENTHAL et al., 2005). Es besteht weiterhin die Frage, inwieweit sich das Pilzmyzel durch eine mögliche Vergrößerung der Grenzschichtdicke oder als Transpirationsbarriere auf eine Erhöhung der Temperatur auswirken könnte. GORDON und DUNIWAY (1982a) diskutierten, dass, so wie der Einfluss von Blatthaaren auf die Grenzschichtdicke sehr gering sei, dies auch auf das Pilzmyzel zutreffen müsse.

Zwischen Tag sieben und dreizehn nach Inokulation war die maximale Temperaturdifferenz befallener gegenüber gesunder Blätter signifikant erhöht. Bei einer thermi-

schen Momentaufnahme eines befallenen Blattes war sie 1 K höher als die eines nicht inokulierten, bei Versuchen von LINDENTHAL et al. (2005) stieg sie um 1,4 K über die nicht inokulierten Blätter. Im Gegensatz zu den Ergebnissen von LINDENTHAL et al. (2005) und denen zur *Cercospora*-Blattfleckenkrankheit war die Differenz zwischen beiden maximalen Temperaturdifferenzen aber nicht auf einen absoluten Anstieg der inokulierten Blätter zurückzuführen. Da Mehltaupusteln zu einer lokalen Verringerung der Blatttemperatur führten, wäre eine Erhöhung der maximalen Temperaturdifferenz zu erwarten gewesen. Stattdessen blieb sie über den gesamten Zeitraum relativ konstant mit einer leichten Abnahme am Ende. Denkbar ist, dass sie sich bei allen Blättern, inokulierten und nicht inokulierten, im Laufe des Versuches verringerte. Die zu Beginn noch jungen Blätter sind in der Regel stärker gekräuselt als ältere, und die Blattkräuslung von Zuckerrübenblättern fördert Temperaturheterogenitäten. Auf den inokulierten Blättern könnte sich eine Erhöhung der maximalen Temperaturdifferenz durch Pathogenbefall mit einer Verringerung aufgrund abnehmender Kräuslung dermaßen ausgleichen, dass sie konstant blieb oder weniger stark abnahm. Dies lässt sich nur unter der Annahme rekonstruieren, dass sowohl der Effekt der Krankheit als auch der Blattkräuslung auf die Temperatur von gleicher Größe ist.

Im Gegensatz dazu nahm die Differenz zwischen der Chlorophyllfluoreszenz inokulierter und nicht inokulierter Blätter während der Pathogenese, wenn auch nicht signifikant, so doch stetig zu. Eine Zunahme kurz nach der Infektion könnte mit einer vorübergehenden Zunahme der Photosynthese erklärt werden, wie sie für *Puccinia coronata*, den ebenfalls biotrophen Erreger des Haferkronenrostes, nachgewiesen wurde (SCHOLES und ROLFE, 1996). MAGYAROSY et al. (1975) untersuchten den Einfluss einer Infektion mit *E. betae* auf die Photosynthese auf physiologischer Ebene und stellten fest, dass durch die Infektion die Bildung von ATP in der nicht-zyklischen Photophosphorylierung in Chloroplasten um 20 bis 30 % reduziert wird. Ursache ist eine Hemmung des Elektronenflusses, die die CO₂-Assimilation erheblich reduziert. Die Lage und Funktion der Chloroplasten unterschieden sich von denen nicht inokulierter Blätter. Dies legt eine Störung der gesamten Photosynthese nahe. Es ist möglich, dass der Einfluss sowohl auf die Blatttemperatur als auch auf den Photosyntheseapparat im Vergleich zu *C. beticola* gering ausfiel, da *E. betae* als obligat biotrophes Pathogen von der Vitalität seines Wirtes abhängig ist und seine Hyphen ektoparasitisch ausbildet. Er tötet also zum einen das pflanzliche Gewebe nicht un-

mittelbar ab, wie dies bei *C. beticola* der Fall ist, zum anderen verteilen sich die Haustorien und damit der Eingriff in den Stofftransport der Zellen auf weite Bereiche der Epidermis, während das photosynthetisch aktive Mesophyll unbesiedelt bleibt.

Auch *Uromyces betae* zählt zu den obligat biotrophen Pathogenen, bildet aber wie *C. beticola* lokal konzentrierte Symptome in Form von Rostpusteln aus. Seine asexuelle Vermehrungsform, die Uredosporen, sind durch die dicke Zellwand, versehen mit kleinen Dornen und einer oder mehr Keimporen, gekennzeichnet. Die Uredosporen penetrierten durch die Poren der Stomata. Nach MENDGEN (1997) sind die Uredinales sowohl zur Penetration durch Spaltöffnungen als auch direkt durch die Epidermis befähigt. Das interzelluläre Hyphenwachstum und die Differenzierung von Haustorien zur Nährstoffversorgung des Pilzes konnten nicht beobachtet werden. 14 und 15 Tage nach der Inokulation erschienen die ersten Uredosporenlager auf der Blattoberfläche. Auffällig war, dass das Blattgewebe angrenzend zu den Uredosporenlagern unversehrt blieb und keine Pilzstrukturen enthielt. Laterales Wachstum trat bei Weizenbraunrost (*Puccinia triticina*) erst nach einem sehr langen Zeitraum von mehr als 20 Tagen in Form von einem zweiten Ring aus Uredosporenlagern auf (ALLEN, 1926). Dies konnte auch bei *U. betae* beobachtet werden. Die durchschnittliche Blattemperatur verringerte sich in einem Versuch um maximal 0,9 K, und erhöhte sich im anderen um 0,5 K gegenüber der nicht inokulierten Gewebes. In Versuchen von HELLEBRAND et al. (2005) lag die Temperaturdifferenz zwischen Weizenpflanzen, die mit Gelbrost (*Puccinia striiformis* West.) inokuliert waren, bei maximal $\pm 0,25$ K, und wurde auf Temperaturschwankungen der Raumluft zurückgeführt. In den eigenen Versuchen war beim ersten die Änderung der Temperatur den ganzen Zeitraum über signifikant, beim zweiten dann, als auch die ersten Symptome visuell sichtbar wurden. Einziger Unterschied zwischen beiden Versuchen war das physiologische Alter der Uredosporenlager. Eine Verringerung der Blattemperatur fand statt, wenn die Uredosporenlager einen ausgeprägten, deutlich sichtbaren Hof hatten.

BERRYMAN et al. (1991) zeigten, dass erst einen Tag vor der Sporulation von Uredosporenlagern von *Puccinia hordei*, dem Zwergrost auf Gerste, der Zellturgor unmittelbar an der Infektionsstelle auf 33 % des Drucks nicht inokulierten Gewebes abfiel. Dieser Effekt nahm von der Infektionsstelle hin zu den umliegenden Zellen ab, so dass Zellen von inokuliertem, symptomfreiem Gewebe nahezu einen gleich großen Turgor besaßen wie die von nicht inokuliertem. BERRYMAN et al. (1991) diskutierten, dass der

Druckunterschied zwischen dem Zentrum des Uredosporenlagers und dem umliegenden Gewebe von einem Unterschied im Wasserpotential herrühren könnte. Dieser würde durch die erhöhte Transpiration des Uredosporenlagers bewirkt. Zum Zeitpunkt der Sporulation kehrten sich die Turgorverhältnisse um: Im Zentrum des Uredosporenlagers war er im Gegensatz zu den umliegenden Zellen erhöht, wenn auch geringer als der des nicht inokulierten Gewebes. BERRYMAN et al. (1991) nahmen unter anderem als Ursache das Aufreißen der Epidermis an. Durch den verursachten Wasserverlust über dem Uredosporenlager würden mehr Wasser und Salze die Wirtszellen dort erreichen und den Turgor erhöhen. Die umliegenden Zellen dagegen erführen einen Turgorverlust, weil sie als Quelle für das Wasser und die Salze dienten. So konnten BERRYMAN et al. (1991) bereits zum Zeitpunkt der Sporulation eine Erhöhung der Transpiration messen. Dieser Effekt wäre eine mögliche Erklärung für eine potentielle Abnahme der durchschnittlichen Blattemperatur. Für diese Annahme spricht auch, dass sich die Temperatur mit dem Erscheinen der ersten sichtbaren Symptome veränderte. Uredosporenlager werden erst dann deutlich sichtbar, wenn die Epidermis aufreißt und die Uredosporen entlässt. Thermographische Untersuchungen zeigten, dass Infektionen, die in Zusammenhang mit der Verletzung des Wirtsgewebe stehen, zu einer Temperaturabnahme führen (LINDENTHAL et al., 2005). Die Temperaturabnahme ging nach der Inokulation mit *U. betae* jedoch nur sehr langsam voran, und erreichte ihr Maximum erst 20 Tage nach der Inokulation. Dies könnte dadurch zu erklären sein, dass nicht alle Uredosporenlager gleichzeitig sporulierten, und im Laufe der Krankheitsentwicklung immer neue Uredosporenlager gebildet wurden.

Beim zweiten Versuch waren die Uredosporenlager physiologisch bereits so alt, dass der Hof kaum sichtbar oder nicht mehr vorhanden war, und sich vier Tage nach Versuchsende Ringe aus weiteren Uredosporenlagern um die primären bildeten. In diesem Fall war über den gesamten Zeitraum eine tendenzielle Temperaturzunahme um maximal 0,5 K zu beobachten. Gleichzeitig nahm die maximale Temperaturdifferenz leicht auf 0,37 K über die der nicht inokulierten Blätter zu, während sie beim ersten Versuch unverändert blieb. Im weiteren Krankheitsverlauf verursachen Infektionen mit Rostpilzen eine Abnahme der Photosyntheserate und des Chlorophyllgehalts (MENDGEN, 1997). Es soll zusätzlich auch zu einer Erhöhung der Konzentrationen der Wachstumshormone Cytokinin, Auxin, und Ethylen und einer Zunahme des intermediären Metabolismus kommen, so dass das Gewebe in unmittelbarer Umgebung der

Pusteln immer noch grün bleibt, wenn die Blätter chlorotisch werden. Diese Besonderheit wird als „Grüne Inseln“ bezeichnet und ist ein typisches Symptom von Rostkrankheiten (MENDGEN, 1997). Dieses Phänomen konnte im Versuchszeitraum bei *U. betae* nicht beobachtet werden.

Die Uredosporenlager hatten eine um 1 K erhöhte Temperatur im Gegensatz zu nicht inokuliertem Gewebe. Es wird daher davon ausgegangen, dass sie sich erwärmten, weil sich die Uredosporen über dem zum übrigen Blattgewebe erhabenen Uredosporenlager sammelten. Anders als Sporen von *E. betae* sind Rostsporen für ein langes Überdauern auch unter widrigen Verhältnissen ausgelegt. Ihre dicke Wand schützt sie vor Austrocknung und ermöglicht sogar die Verbreitung zwischen Kontinenten (NAGAJARAN und SINGH, 1990).

Der Durchmesser einer Pustel war im Videobild gemessen größer als im Thermogramm. Da der Hof thermographisch nicht erfasst werden konnte, war die Ausdehnung der erhöhten Temperatur nur auf die des Uredosporenlagers zurück zu führen. So ließe sich auch der Größenunterschied erklären. Die Erwärmung der Uredosporen über die Lufttemperatur könnte verhältnismäßig kleiner sein als das Absenken der Temperatur durch die Transpiration der angrenzenden Zellen.

Die Chlorophyllfluoreszenz bei hoher Anregungsintensität war in der Region der Uredien verringert. Die Abnahme war ab dem Tag des Sichtbarwerdens des Sporenlagers zu beobachten. Dies wiesen KUCKENBERG et al. (2007) auch für Weizenbraunrost durch *Puccinia recondita* f. sp. tritici nach. Bei dem sie umgebenden Hof war eine leichte Zunahme sichtbar, bevor sich ein Uredosporenlager bildete. Nach CHAERLE et al. (2007) deutet eine erhöhte Chlorophyllfluoreszenz auf eine partielle Zerstörung des Photosyntheseapparates hin. Lichtenergie kann somit nicht für Prozesse der Photosynthese genutzt werden, sondern wird als Wärme und Fluoreszenz emittiert. Im weiteren Verlauf der Infektion führe die Zerstörung des Pflanzengewebes aufgrund des Chlorophyllabbaus zu einer Abnahme der Fluoreszenzemission. SHOLES und FARRAR (1986) konnten dagegen für den ebenfalls biotrophen Erreger Braunrost (*Puccinia hordei*) im Bereich der Pusteln eine um das doppelte erhöhte Photosyntheserate gegenüber nicht inokulierten Blättern feststellen. In diesem Fall würden hohe Chlorophyllfluoreszenzwerte wie die vor dem Entstehen eines Uredosporenlagers und im Bereich des Hofes auf eine hohe photosynthetische Leistung hindeuten. Aufgrund der in den eigenen Versuchen angewandten Methodik lässt sich nicht entscheiden,

welcher der Erklärungsansätze auf *U. betae* an Zuckerrüben zutrifft; dazu ist die Erfassung von Fluoreszenzkinetiken notwendig.

Die Größe des Uredosporenlagers im Videobild entsprach dem im Schwarzweiß-Bild, die des Hofes war geringfügig größer. In der Blattregion, in welcher sich Uredosporenlager von *P. triticina* bilden, werden die Epidermiszellen verdrängt und die des Parenchyms verdeckt. Außerdem ist das Gewebe durchdrungen von Pilzmyzel (ALLEN, 1926). Dies war in den stereomikroskopischen Bildern auch für *U. betae* erkennbar. Der Unterschied in der zwischen beiden Sensoren festgestellten Größe mag darauf beruhen, dass sich physiologische Veränderungen im Bereich des Hofes nicht so eindeutig auf einen bestimmten Radius eingrenzen lassen wie die Pilzstrukturen des Uredosporenlagers.

Während bei einer Infektion mit *C. beticola* Befallsstellen thermisch einen Tag und mittels Chlorophyllfluoreszenz vier Tage vor den Symptomen erfasst werden konnten, war dies bei *U. betae* erst vier beziehungsweise drei Tage danach möglich. Auch CHAERLE et al. (2004) zeigten, dass sowohl bei *C. beticola* als auch dem Tabakmosaikvirus Symptome zuerst anhand Chlorophyllfluoreszenz und erst dann thermographisch sichtbar waren. Ein deutlicher präsymptomatischer Nachweis war allerdings nur beim Tabakmosaikvirus möglich. Pusteln von Weizenbraunrost ließen sich vor ihrem Erscheinen nicht über die Chlorophyllfluoreszenz nachweisen, allerdings über eine minimale Erhöhung in der Grundfluoreszenz einen Tag vorher. Eine Infektion mit *B. graminis* konnte dagegen weder anhand der Grundfluoreszenz noch anhand der maximalen Chlorophyllfluoreszenz dargestellt werden KUCKENBERG et al. (2007).

Die Sensoren eignen sich demnach nur bedingt für eine präsymptomatische Detektion. Gerade die Chlorophyllfluoreszenz scheint bei perthotrophen Erregern erfolversprechender zu sein. Hier ist der Einfluss, den das Pathogen im Wirtsgewebe auf physiologische Parameter ausübt, stärker als bei biotrophen Erregern. Bei diesen stehen Veränderungen der Chlorophyllfluoreszenz und der Temperatur mehr in Zusammenhang mit dem Einfluss der von ihnen verursachten Krankheitssymptome auf den Wirt als mit dem der Infektion. Dies ist eine Voraussetzung für das Überleben dieser Pathogengruppe, da sie so ihre Wirte möglichst lange am Leben erhält.

GEBHARDT (1984) betonte die Notwendigkeit der Kenntnis des entsprechenden Feldes und der jeweiligen Bewirtschaftungspraxis bei der Anwendung der Thermographie. Daher wurden die Versuchsfelder eingehend auf ihre pflanzenbaulichen Voraus-

setzungen hin untersucht.

Bei den aufgrund von Bodenzahl, Topographie und Bodenarten als homogen eingestuften Feldern Poppelsdorf und Klein-Altendorf konnten thermographisch Temperaturmuster der Bodenoberfläche erkannt werden. Bei Klein-Altendorf standen niedrigere Temperaturen deutlicher, bei Poppelsdorf nur teilweise mit Bodenverdichtung in Zusammenhang. Da verdichteter Boden schlechter und langsamer abtrocknet als lockerer, ist er aufgrund der Verdunstung des Wassers kühler. DERKSEN (1974) zeigte, dass Unterschiede in der Bodentemperatur hauptsächlich Unterschiede in der Feuchtigkeit der Bodenoberfläche widerspiegeln. Sie können aber auch auf Unterschiede in der Bodenstruktur beruhen, welche wiederum durch Bodentypen charakterisiert sind.

Die Werte der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit lieferten die gleichen Muster wie die Thermogramme, wobei sie im Bereich niedriger Bodentemperaturen geringer waren als in den anderen Bereichen. In der Regel besteht eine hohe positive Korrelation zwischen ECa und dem Tonmineralgehalt (SUDDUTH et al., 2005, JOHNSON et al., 2001). SUDDUTH et al. (2005) konnten dagegen keine positive Korrelation mit dem Gehalt an Wasser oder Sand nachweisen. Also könnten die geringen Werte möglicherweise auf einen höheren Wassergehalt im Boden hinweisen. In der Tat war feuchter Boden im Thermogramm kühler als trockener. Dies erscheint umso plausibler, als für diese Felder auf Basis der Bodenkarten keine deutlichen kleinräumigen Unterschiede im Ton-, Sand-, oder Lehmgehalt vorhanden waren. Beim Dikopshof und Frankenforst verhielt es sich gegensätzlich. Die Feldbereiche, welche Bodenklassen mit feineren Bodenpartikeln, also Ton und Lehm, zugeordnet werden konnten, hatten die höchsten ECa-Werte. Sie waren auch die Bereiche mit der geringsten Oberflächentemperatur. MERTENS et al. (2008) stellten fest, dass Tongehalt und ECa am Frankenforst und dem Dikopshof eine enge Korrelation aufwiesen. FLEMING et al. (2004) berichteten vom positiven Zusammenhang zwischen Ton und Lehm-Gehalt im Boden und der pflanzenbaulichen Produktivität. Mittels des ECa-Signals konnten diese Bereiche innerhalb eines Feldes genau ausgewiesen werden. Ein Schluss vom Tongehalt auf das Pflanzenwachstum oder den Pathogenbefall wird dadurch erschwert, dass dieser nicht allein die Bodenfruchtbarkeit bestimmt. Während Poppelsdorf und Klein-Altendorf eben sind, spielten beim Frankenforst und Dikopshof die topographischen Gegebenheiten eine Rolle. So befanden sich beim Frankenforst Bereiche hohen Tongehalts vorwiegend an der niedrigsten Stelle des Feldes, in welche also Niederschläge von den umgebenden

Kuppen abfließen konnten. Das stärkere Wasserhaltevermögen des tonigen Bodens führte in Kombination mit Niederschlägen also tendenziell zu Staunässe. Dies wiederum erklärt, warum an diesem Standort das Zuckerrübenwachstum und die Vitalität der Pflanzen dort am besten waren, wo die Oberflächentemperatur des Bodens am höchsten war, nämlich auf beiden Kuppen. Umgekehrt war am Dikopshof die Kuppe weniger sandig als die übrigen Bereiche. In diesem Fall wies die Korrelation zwischen der niedrigen Oberflächentemperatur des Bodens und den hohen ECa-Werten tatsächlich auf günstigere ackerbauliche Bedingungen. Dies traf allerdings auch auf die Senke zu, von der wie beim Frankenforst eigentlich schlechtere Bedingungen für das Pflanzenwachstum zu erwarten gewesen wären. Nur war hier die Bodenzahl besser als am Hang, und die Bodendichte geringer als am Standort Frankenforst. Untersuchungen zum pflanzenverfügbaren Stickstoffgehalt im Boden und zum Pflanzenwachstum bestätigten, dass das EM38-Signal direkt einen Hinweis auf Bodenfruchtbarkeitsparameter geben kann (EIGENBERG et al., 2006, MERTENS et al., 2008). KITCHEN et al. (2003) zeigten, dass in einigen Versuchsjahren sowohl die ECa als auch die Topographie alleine einen besseren Nachweis auf die kleinräumige Variation des Ertrages von Mais und Sojabohne an drei verschiedenen Standorten bot. Deren Kombination konnte in einigen Fällen die Korrelation über die einzelnen Ergebnisse hinaus jedoch verbessern. Auch wenn anhand der ECa-Werte ohne die Kenntnis anderer Parameter keine einheitliche Aussage über die Bodenbeschaffenheit der Felder gemacht werden kann, so sind nach MERTENS et al. (2008) Erhebungen der ECa genauer als herkömmliche Bodenuntersuchungen und die Deutschen Bodenkarten. Im Vergleich zu üblichen Methoden zur Ermittlung von Bodeneigenschaften ist das EM38 darüber hinaus schneller, weniger aufwendig und kostengünstiger. Zwar waren die absoluten Werte der ECa nicht konsistent mit den absoluten Bodentemperaturen, aber die räumliche Verteilung der Werte innerhalb des Feldes stimmte weitgehend überein. Unterschiede lassen sich eventuell darauf zurückführen, dass bei der Thermographie nur die aktuelle Temperatur der obersten Bodenschicht gemessen wird, beim EM38 dagegen die ECa über eine Bodentiefe von 1,5 m.

Ebenso wie die Bodenparameter mit der Oberflächentemperatur des Bodens in Zusammenhang standen, wirkte sich der Bestand auf die gemessene Temperatur aus. In erster Linie erfasst die Thermographie das Mikroklima. DERKSEN (1974) bezeichnete die Vegetation als ein „Objekt mit geringer Wärmekapazität“. Aus diesem Grund würde

die Oberflächentemperatur eines Bestandes nur die kurzfristigen mikrometeorologischen Veränderungen wiedergeben, welche die relative Feuchtigkeit, die Strahlung und den Wärmetransport miteinbeziehen. Ohne oder mit geringem Pathogenbefall hatten die gut entwickelten Bestandesbereiche aller Versuchsfelder die geringste, die schlecht entwickelten die höchste Oberflächentemperatur. Auf den heterogenen Feldern Frankenforst und Dikopshof, auf welchen sich die Bodentemperatur im ECa-Signal widerspiegelte, tat dies auch die Bestandestemperatur. Insofern der Bestand keine Lücken hatte ist es unwahrscheinlich, dass die Bodentemperatur durch ihn hindurch gemessen wurde (DERKSEN, 1974).

In Poppelsdorf fand sich die Verteilung der Bestandestemperatur nicht in der des Bodens wieder. Dies spielte für die dort ausgeführten Versuche keine Rolle, bedeutet aber, dass sich auf homogen erscheinenden Flächen der Bestand auch heterogen entwickeln kann. Im Falle von Poppelsdorf ist dies möglicherweise auf den starken Befall mit der Rübenfäule zurückzuführen. Auch in Klein-Altendorf schien die über die Bodentemperatur und die ECa gemessene Unregelmäßigkeit im Boden zumindest keinen deutlich sichtbaren Einfluss auf das Wachstum der Zuckerrüben gehabt zu haben. Das Muster war in der Bestandestemperatur nicht wieder zu finden. Vor allem am Dikopshof zeigte sich, dass die Bestandestemperatur ein sehr genaues Instrument zur Messung der Bestandesdichte und -vitalität war. Selbst kleine Inseln besseren Wachses in der ansonsten schwachen Wachstumsregion am Hang wurden als kühlere Bereiche im Thermogramm dargestellt. Die relative Feuchte war dort hoch, wo die Bestandestemperatur niedrig war. Außerdem standen auf allen Standorten niedrige Bestandestemperaturen in Zusammenhang mit einer hohen Chlorophyllkonzentration. So wies eine niedrige Bestandestemperatur auf eine hohe Pflanzendichte und -vitalität. Die Dichte bewirkt ein langsames Abtrocknen, die Vitalität eine hohe Transpirationsrate. Gerade in den Bereichen mit den höchsten Bodenzahlen war das Pflanzenwachstum am besten. Die Nährstoffversorgung hat einen signifikanten Einfluss auf die Blattlänge von Zuckerrübenpflanzen, welche als Parameter für den Blattflächenindex gilt (TSIALTAS und MASLARIS, 2008). LENTHE et al. (2007) zeigten den Zusammenhang zwischen Nässe in Weizenbeständen aufgrund von Niederschlägen und der Bestandestemperatur auf. Erhebungen der Bestandesdichte deuteten außerdem darauf hin, dass niedrige Bestandestemperaturen in den Feldbereichen auftraten, in welchen die Pflanzen eine höhere Biomasse pro Fläche hatten. Obwohl Feuchtigkeit, beispiels-

weise als Tau, das Strahlungsgleichgewicht und möglicherweise auch den latenten Wärmestrom zwischen Boden, Bestand, und Lufttemperatur ändert, konnte PINTER (1986) im Wellenlängenbereich von 0,7 bis 1,1 μm keinen eindeutigen messbaren Einfluss auf die Oberflächentemperatur von Weizenpflanzen beobachten. Die Temperatur von Pflanzen wird also weniger stark von Tau als von ihrer Vitalität beeinflusst. Blätter, die sich in dem Alter befinden, in welchem ihre Photosyntheseleistung am höchsten ist, sind besser gegen externe Erwärmung geschützt als seneszente Blätter, die arm an Chlorophyll sind. SHABALA (1996) bezieht das auf ihre verbesserte Fähigkeit die Stomata zu öffnen, um die Transpirationsrate zu erhöhen. Anhand von Düngungsvarianten zeigten JACOBI und KÜHBAUCH (2005), dass Weizenpflanzen, die ausreichend mit Stickstoff versorgt waren, eine höhere Farbtintensität in einem multispektralen Falschfarbenbild hatten, als die Mangelvariante.

Die erhöhte Temperatur im Bereich des Hangs am Dikopshof und in der Senke am Frankenforst waren auf Trockenstress beziehungsweise Staunässe zurückzuführen. Wie in den Laborversuchen gezeigt, stagnierte das Pflanzenwachstum, die Zuckerrüben alterten schneller und ihre Temperatur erhöhte sich. Der Effekt der Temperaturerhöhung wird durch Sonneneinstrahlung verstärkt. Bei Baumwollpflanzen, die einen um 24 % verringerten Turgor in ihren Blättern aufwiesen, erhöhte sich die Temperatur um 3,6 °C, und bei zusätzlicher Sonneneinstrahlung um maximal 10 °C (WIEGAND und NAMKEN, 1966). Gerade bei dem nach Süden hin exponierten Hang am Dikopshof musste mit einer sehr starken Erwärmung der Zuckerrübenpflanzen gerechnet werden.

Gegen Ende September kehrten sich sowohl am Frankenforst als auch am Dikopshof die Temperaturverhältnisse um. Feldbereiche, die zu Beginn der Vegetationsperiode aufgrund des sehr guten Pflanzenwachstums kühler waren als andere, waren nun wärmer. Dies betraf vor allem auch die Bereiche, in denen sich *C. beticola* und *E. betae* besonders stark und mit hoher Intensität ausgebreitet hatten. Entweder der Echte Mehltau hatte eine Befallsstufe von 100 % oder *C. beticola* hatte die Pflanzen mit einer Befallshäufigkeit von mehr als fünf Blättern und bis zum Verlust von Blättern geschädigt. Möglicherweise hat dieser starke Befall von beiden Pathogenen zu einer so großen Reduktion der Photosyntheseleistung der Pflanzen und somit ihrer Transpiration geführt, dass sie im Verhältnis zu den anderen Bereichen wärmer erschienen. Am Dikopshof hatten die Zuckerrüben im Hangbereich so unter der

Trockenheit gelitten, dass sie weitgehend von Befall durch *C. beticola* verschont geblieben waren. Erst gegen Ende der Vegetationsperiode, als die Pflanzen an der Kuppe und am Hang schon stark durch beide Pathogene geschädigt waren, erholten sie sich und bildeten neue transpirationsstarke Pflanzen.

Obwohl in den Laborversuchen *Cercospora*-Blattflecken thermographisch einen Tag vorher detektiert werden konnten, und auch die anderen Pathogene signifikante Temperaturveränderungen oder Heterogenitäten in der Blattemperatur verursachten, war deren Erfassung im Feld selbst bei bereits vorhandenem Befall in einem frühen Krankheitsstadium nicht möglich. GATES (1980) beobachtete, dass selbst Pflanzen unter gleichen Umweltbedingungen unterschiedliche Blattemperaturen haben können. Sogar zwischen den Blättern einer einzigen Zuckerrübenpflanze können im Freiland Temperaturunterschiede von sechs Grad Celsius vorhanden sein (LORENZ, 1973). Es ist zu beachten, dass die Symptome der drei Blattkrankheiten auf sehr kleiner Fläche oft nur zu minimalen Veränderungen der Temperatur führten. Diese können im Freiland gerade im Anfangsstadium unter Umständen nicht detektiert werden, weil sich die Blätter gegenseitig überlappen. Außerdem wirken sich Symptome im Krankheitsverlauf sowohl in Form einer Temperaturzu- als auch -abnahme aus. Zeitgleicher Befall unterschiedlicher Pathogene mit entgegengesetzten Auswirkungen auf die Blattemperatur minimieren ihre Effekte gegenseitig. HELLEBRAND et al. (2005) waren bei dem Versuch, thermographisch den Befall mit *B. graminis* und *P. striiformis* West. an Weizenpflanzen im Freiland zu detektieren, mit pflanzenspezifischen Störgrößen auf die Temperatur konfrontiert. Sie bezweifelten den Nutzen, den ein ausschließlich auf einen Thermosensor gestütztes Detektionssystem im Pflanzenschutz erbringen kann, und empfahlen dessen Potential bei der Kombination mit anderen Sensoren zu prüfen. Bei Erregern, deren frühe Pathogenese einen geringen Effekt auf die Blattemperatur hat, oder einen limitierten Bereich der Pflanze betrifft, ist die Beobachtung einer größeren Fläche erfolgversprechend. Mit Parzellengrößen von sieben mal 50 Metern konnten SMITH et al. (1986) den Effekt von *Puccinia striiformis* (West.) auf die Blattemperatur von Weizen verfolgen. LINDENTHAL (2005) zeigte, dass *P. cubensis* resistente Gurkenpflanzen von nicht resistenten nach einer Inokulation im Freiland aufgrund einer 2 K geringeren Bestandestemperatur bei drei mal vier Meter großen Parzellen thermographisch unterschieden werden konnten. Trotzdem war es bei dieser Skala nicht möglich die verschieden anfälligen Sorten aufgrund der Bestandestempera-

turen zu unterscheiden.

Unbedeckter Boden, der je nach seinem Feuchtigkeitsgehalt oder seiner Zusammensetzung im Verhältnis zu den Pflanzen wärmer oder kühler sein kann, ist eine zusätzliche Störgröße (DERKSEN, 1974). Andere Krankheiten können die Temperatur der Pflanzen früher und stärker beeinflussen. Durch großflächige und tiefgehende Schädigung des Rübenkörpers wirkt sich beispielsweise die Rübenfäule ähnlich wie Stau-nässe negativ auf die Transpirationsfähigkeit der Pflanzen aus (ZENS et al., 2002). NICOLAS et al. (1991) konnten mittels einer Thermokamera sogar unterschiedlich starke Befallsintensitäten des Getreidenematoden *Heterodera avenae* Woll. an Winterweizen ermitteln. Um Objekte, deren Temperatur nicht relevant ist, aus den Thermogrammen zu entfernen, kann spezielle Software Abhilfe schaffen, welche Thermogramme mit Digitalbildern abgleicht (JONES, 2004). Hat beispielsweise der Hintergrund eine einheitlich höhere oder geringere Temperatur als die Pflanzen, lassen sich alle ihm zugehörigen Temperaturpunkte mittels Schwellenwerten eliminieren (GIULIANI und FLORE, 2000). Wenn der Hintergrund von einer ungleichmäßigen Temperatur ist, die der des zu erfassenden Objektes ähnelt oder gleichwertig ist, können durch den Abgleich der Thermogramme mit Digitalbildern die Pflanzenoberflächen bestimmt werden (JONES und LEINONEN, 2003).

Die Befallshäufigkeit und -stärke wurden in erster Linie vom Wetter während der Vegetationsperiode beeinflusst. So waren hohe Niederschlagsmengen und Temperaturen im Hochsommer der Infektion durch *C. beticola* förderlich. Gerade im integrierten Pflanzenschutz, in welchem der Einsatz von Fungiziden so gering wie möglich gehalten werden soll, ist der Zeitpunkt der Manifestation einer Krankheit auf dem Feld von besonderer Bedeutung. Prognosemodelle bauen vor allem auf der Analyse der Wetterfaktoren auf, welche einer Krankheit förderlich sind. Diese Faktoren sind insbesondere die Temperatur und die relative Luftfeuchtigkeit. In Modellen wird mit ihnen die Infektionswahrscheinlichkeit vorhergesagt (WOLF et al., 2004). WOLF et al. (2004) definierten den Epidemiebeginn der *Cercospora*-Blattfleckenkrankheit als den Zeitpunkt, an welchem 50 % der Pflanzen oder mehr mindestens einen Blattfleck an einem Blatt haben. Sie räumten ein, dass Prognosemodelle für *C. beticola* nicht in der Lage seien, den exakten Beginn einer Krankheit zu prognostizieren. Neben den Wetterfaktoren war der Zeitpunkt des Bestandesschluss aufgrund seines Einflusses auf das Mikroklima ein wesentlicher Anhaltspunkt für den Krankheitsbeginn (WOLF und

VERREET, 2005).

Die Autoren beschrieben ausführlich den Epidemieverlauf der *Cercospora*-Blattfleckenkrankheit, welcher mit den Beobachtungen auf den Standorten Klein-Altendorf, Dikopshof und Frankenforst übereinstimmt. Typisch war die rasche Ausbreitung der Krankheit auf alle Pflanzen im Bestand mit einer geringen Befallsstärke, welche anschließend stark zunahm. Auch VEREIJSEN et al. (2006) stellten zuerst einen Anstieg in der Befallshäufigkeit, gefolgt von einer Zunahme der Befallsstärke fest. Bei ihnen wurde die zweite Stufe bereits nach 60 % Befallshäufigkeit eingeleitet. Zwar wird bei *C. beticola* stets von einer raschen Ausbreitung auf alle Pflanzen ausgegangen, jedoch konnte beobachtet werden, dass die Krankheit bevorzugt von bestimmten Feldbereichen ausging und sich in diesen manifestierte. Auf den heterogenen Standorten Frankenforst und Dikopshof waren dies die Bereiche guten Rübenwachstums, bei Klein-Altendorf der Bereich des verdichteten Bodens. Wie bereits erwähnt, ist der Bestandesschluss ein wichtiger Aspekt für die epidemiologische Entwicklung des Erregers (WOLF und VERREET, 2005). Dies hängt damit zusammen, dass sich dadurch das Mikroklima so ändert, dass es die Infektion und Verbreitung begünstigt. Diverse Untersuchungen haben gezeigt, dass die Konidien von *C. beticola* erst ab einer relativen Luftfeuchte ab 95 bis 100 % keimen (POOL und MCKAY, 1916a, FEINDT et al., 1981a, WOLF et al., 2001). Die Untergrenze, ab welcher keine Konidienkeimung mehr stattfindet, wird bei 90 % (WOLF et al., 2001) oder 95 % angesetzt (FEINDT et al., 1981a). BLEIHOLDER (1971) beobachtete, dass bei Werten von 96 bis 100 % relativer Luftfeuchtigkeit und 30 °C auch die meisten Konidien pro Fläche Blattfleck gebildet werden. Des Weiteren ist die Blattnässedauer von Bedeutung. Diese führt ab drei Tagen zu einem Infektionserfolg über 50 % und erreicht ihr Maximum ab sieben Tagen (WOLF et al., 2001). Im Anschluss an die Jugendentwicklung und mit dem Bestandesschluss nimmt die Temperatur im Bestand um 1 °C ab. Aufgrund des geringeren Wasserhaltevermögens niedriger Temperatur steigt die relative Feuchtigkeit zwischen den Pflanzen um 5 % (WOLF et al., 2001). WOLF et al. (2001) fanden heraus, dass sich aufgrund dieser Bedingungen die Blattnässedauer nach Reihensschluss um 25 % verlängert. Beim Frankenforst und Dikopshof zeigte sich, dass die Zonen, in welchen der Bestand über alle Aufnahmezeitpunkte hinweg die geringste Oberflächentemperatur hatte, am stärksten befallen waren. Sie hatten das höchste Befallsrisiko innerhalb des Feldes und waren die Zonen, in welchen sich die Krankheit mani-

festierte. Für die Standorte Frankenforst und Dikopshof könnten diese Ergebnisse auch dafür sprechen, dass die Primärinfektion von Bereichen ausging, in welchen die Bestandestemperaturen geringer waren als in den anderen. KHAN et al. (2008) stellten fest, dass lediglich die Tiefe, in welcher ein Pathogen im Boden überdauerte, und die Dauer einen Einfluss auf sein Überleben außerhalb der Vegetationsperiode hatten. Da für Klein-Altendorf davon ausgegangen werden kann, dass Blattreste von Zuckerrüben mit pilzlichem Pseudostroma sich an jeder Stelle des Feldes gleichmäßig tief und gleich lange im Boden befunden haben, sollte dies kein Grund für die bevorzugte primäre Infektion in einem Feldbereich darstellen. *C. beticola* hatte theoretisch an jedem Punkt im Feld die gleich günstigen Bedingungen für eine erfolgreiche Infektion vorgefunden. Dennoch ist auffällig, dass sich das Pathogen bevorzugt dort ausgebreitet hat, wo durch die ECa- und die Temperaturmessung eine Unregelmäßigkeit des Bodens aufgedeckt wurde. Als Verbreitungsmechanismen kommen für die Konidien verschiedene Möglichkeiten in Betracht. Hauptsächlich sollen Konidien durch Regenspritzer und Wind über kurze Distanzen verbreitet werden (POOL und MCKAY, 1916a, KHAN et al., 2008). Aufgrund des häufigen Kontakts und der frühen Überlappung von Blättern benachbarter Zuckerrüben hängt die Befallsstärke einer Pflanze räumlich stark von der ihrer Nachbarpflanzen ab (VEREIJSEN et al., 2006). Diese Art der Verbreitung lässt sich für Klein-Altendorf vermuten, aber nicht eindeutig bestätigen.

Der Antagonismus zwischen den beiden Pathogenen *C. beticola* und *E. betae* spricht dafür, dass der Befall mit *C. beticola* in Klein-Altendorf geringer war als auf den beiden anderen Feldern. Nach WOLF (2002) wird in erster Linie durch die Schädigung der Blattfläche durch *Cercospora*-Blattflecken dem Echten Mehltau die Nahrungsgrundlage entzogen. Wenn die Wetterbedingungen aber für *E. betae* günstig sind, und eine frühzeitige Infektion stattfindet, kann dies auch umgekehrt der Fall sein.

Ob in Klein-Altendorf die Infektion mit Echem Mehltau tatsächlich früher im Jahr begonnen hat als auf den beiden anderen Standorten, kann nicht gesagt werden, da die Krankheitsbonituren 2005 und 2006 zu anderen Terminen stattgefunden haben. Nach WOLF (2002) ist mit einem Erstauftreten von *E. betae* erst ab Ende Juli zu rechnen. Jedoch war der Befall in Klein-Altendorf stärker als von *C. beticola*. Die Temperaturen und die geringen Niederschläge waren der Verbreitung von *E. betae* förderlich. DRANDAREVSKI (1969b) zeigte, dass eine wassergesättigte Atmosphäre die Konidien-

produktion hemmt. Bei einer Verringerung der relativen Luftfeuchtigkeit um 30 % stieg die Kondienproduktion um das doppelte an. Außerdem waren Kondien, welche bei ca. 30 bis 40 % relativer Luftfeuchtigkeit gebildet wurden, keimfähiger als solche, die unter feuchteren Bedingungen entstanden. Beide Entwicklungsstadien werden von Temperaturen um 30 °C begünstigt. Eine hohe Temperaturdifferenz innerhalb eines Tages beeinflusst sowohl die Konidienproduktion als auch die Keimrate positiv (DRANDAREVSKI, 1969b). Vor allem gegen Ende des Hochsommers und zu Beginn des Herbstes sind hohe Tages- und tiefe Nachttemperaturen vorhanden. Zwar waren die Niederschläge zwischen Anfang Juli und Ende Oktober am Standort Klein-Altendorf im Verhältnis zum Frankenforst höher, und die durchschnittliche Temperatur etwa zwei Grad niedriger, die Rüben wuchsen aber gleichmäßiger und besser. Zudem war das Feld eben und windexponiert, welches für ein windverbreitetes Pathogen ein Vorteil darstellt (DRANDAREVSKI, 1969b). *E. betae* breitete sich an allen Standorten stärker vertikal, also durch eine Zunahme der prozentual befallenen Blattfläche einer Pflanze, als horizontal, also durch eine Infektion aller Pflanzen des Bestandes, aus. Bei günstigen Bedingungen ist der Krankheitsfortschritt so stark, dass der Übergang von einer zur nächsten Phase sehr kurz ist. Am Dikopshof waren sogar am Hang einige Pflanzen stark befallen. WOLF (2002) erklärt dies durch die inhomogenen genetischen Voraussetzungen des Sortenmaterials bezüglich der Resistenzeigenschaften. Er schloss aus, dass dieses typische Verbreitungsmuster mit der epidemiologischen Verbreitung des Pathogens begründet werden kann. Auf der anderen Seite haben sich die Zuckerrüben im Hangbereich gerade dann wieder von der Sommertrockenheit erholt und neue Blätter gebildet, als die Wetterbedingungen für den Aufbau einer Population von *E. betae* günstig waren. Diese dienten im Gegensatz zu den durch *C. beticola* geschädigten Blättern *E. betae* als Nahrungsquelle.

Am Frankenforst und Dikopshof nahm der Befall gegen Ende der Vegetationsperiode wieder ab. WOLF (2002) stellte an einem seiner Versuchsstandorte ebenfalls einen rückläufigen Befall mit Echtem Mehltau fest, und bezog dies auf die bereits beschriebene Konkurrenz mit *C. beticola*. Bei Verwendung einer Sorte mit hoher Resistenz gegenüber *C. beticola* konnte sich *E. betae* weitgehend ungehindert entwickeln.

Generell gelten dieselben Beobachtungen für den ebenfalls obligat biotrophen Erreger *U. betae*. Der Befall auf dem Frankenforst war äußerst gering und wurde erst am letzten Boniturtermin festgestellt. In Klein-Altendorf fand die Erstinfektion bereits einen

Monat früher statt, und der Befall war verhältnismäßig hoch. Hierfür mögen die gleichen Gründe gegolten haben, wie für *E. betae*: ein geringer Befall mit *C. beticola*, ein sehr gutes Rübenwachstum und ein ebenes und windexponiertes Feld. Rostsporen sind so gut an den Transport durch den Wind angepasst sind, dass sie tausende von Kilometer transportiert werden können (BULLER, 1958, NAGAJARAN und SINGH, 1990, MENDGEN, 1997, PETERSON und KOSTA, 2005). Nach ZADOKS und VAN DEN BOSCH (1994) sind sowohl *E. betae* als auch die Getreide- und Bohnenroste den Pathogenen zuzuordnen, welche sich in Form von zeitlich und räumlich begrenzten Befallsherden verbreiten. Die Autoren unterteilten Pathosysteme in Gruppen, die Epidemien nullter, erster und zweiter Ordnung verursachen. Die Roste fielen in die nullter Ordnung, für welche ein Befallsherd typisch sei, der mit einer einzigen Spore beginnt, die zu einer Pustel führt, und nach polyzyklischer Vermehrung durchschnittlich zwischen 0,5 bis 2 Meter Durchmesser erreicht. Der primäre Befallsherd besteht aus einer Gruppe kranker Pflanzen um die Inokulumquelle. Diese Beschreibung trifft sehr gut auf die Befallsrisikokarte von *U. betae* für den Standort Klein-Altendorf zu. Hier ist eine Vielzahl kleiner Primärherde denkbar, welche sich bereits ausgedehnt haben. JOHNSON et al. (2003) beobachtete das gleiche Ausbreitungsmuster bei *Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary an Kartoffeln. Gerade durch die kleinen, regelmäßig verteilten Befallsinseln unterscheidet sich *U. betae* von den tendenziell größeren Gruppen von mit *E. betae* befallenen Pflanzen. Den Echten Mehltau an Zuckerrübe ordneten ZADOKS und VAN DEN BOSCH (1994) den Pathogenen zu, die zu Epidemien erster Ordnung führen. Im Gegensatz zu den Befallsherden der Epidemien nullter Ordnung wird denen erster Ordnung eine gewisse räumliche und zeitliche Dynamik zugeschrieben. Je nach den Umweltbedingungen können sie stagnieren, verschwinden, oder sich erweitern. Von einem primären Befallsherd können Sekundärherde ausgehen, welche sich in einer Größenordnung von einem einzigen Feld oder 1000 Kilometer erstrecken.

Die unterschiedliche Verbreitungsdynamik zwischen der *Cercospora*-Blattfleckenkrankheit und dem Echten Mehltau erklärt auch, warum sie verschiedenen gute Korrelationswerte mit den Bestandestemperaturen erzielten. So wurde eine bessere Korrelation stets dann erreicht, wenn das Vorkommen der Krankheit am heterogensten, also die Anzahl der Befallsgruppen am größten war.

Am besten korrelierten die *Cercospora*-Blattfleckenkrankheit und der Echten Mehltau mit der Temperatur des gesunden Bestandes nach Bestandesschluss. WOLF et al.

(2001) schlugen vor, Prognosen für die *Cercospora*-Blattfleckenkrankheit auf Basis der stündlichen Werte der Blattnässedauer zum Zeitpunkt des Reihenschlusses zu kalkulieren. Die eigenen Ergebnisse haben gezeigt, dass auch zu einem späteren Zeitpunkt, jedoch stets vor den ersten pathogenbedingten Schädigungen der Zuckerrübenpflanzen, die Temperaturwerte eines Bestandes eine geeignete Basis für die Prognose der räumlichen Verbreitung innerhalb eines Feldes sind. Es ist anzunehmen, dass die Korrelationswerte für die Temperatur vom Bestand Mitte August am Frankenforst beziehungsweise Mitte Juli am Dikopshof deswegen so hoch waren, weil sie den durchschnittlichen Bestandestemperaturen aller Aufnahmetermine am ähnlichsten waren. Zwar kann für heterogene Felder und für *C. beticola* die Empfehlung gegeben werden, zum Zeitpunkt des Reihenschlusses thermographische Aufnahmen des Bestandes zu machen, jedoch eignen sich die ermittelten Temperaturränge generell besser für die Erhebung von Befallsrisikozonen.

Ähnliches gilt für die Korrelation mit den Befallswerten aus einzelnen Boniturterminen. Zwar wurden mit diesen die besten Ergebnisse erzielt, aber in der Regel ist nicht bekannt, wie sich ein Pathogen räumlich und zeitlich verbreiten wird, und welcher Zeitpunkt zur Befallserhebung am meisten geeignet ist. Aus diesem Grund ist unter Umständen die Befallsrisikogruppe für das jeweilige Pathogen heranzuziehen.

Das Befallsmuster von Echtem Mehltau würde sehr gut mit der Temperatur des gesunden Bestandes korrelieren, wäre die nördliche Kuppe nicht der wärmste Bereich des Feldes zum Aufnahmezeitpunkt gewesen. Hier spielen zwei Faktoren eine Rolle. Zum einen die südliche Exposition, die dazu führte, dass dieser Feldbereich am stärksten erwärmt wurde. Zum anderen die Inhomogenität des Bestandes auf kleiner Skala. Durch das unregelmäßige Pflanzenwachstum bedingt, wurde auch der kiesige Boden thermographisch erfasst. Dies zeigt auch, dass gerade die kühleren Bereiche eines Feldes für die guten Korrelationsergebnisse verantwortlich sind. Da es auch die Bereiche sind, welche am Dikopshof und am Frankenforst die geringste Temperaturvariabilität während der Vegetationsperiode aufwiesen, sind sie zuverlässige Indikatoren für Befallsrisikozonen.

Für *E. betae* lässt sich die Thermographie zur Bestimmung von Risikozonen trotz guter Korrelationsergebnisse für Klein-Altendorf und den Frankenforst nur begrenzt einsetzen. Da sich *E. betae* am Dikopshof auch auf dem Hang ausbreitete, erreichten die Korrelationskoeffizienten zwischen den Temperaturwerten des gesunden Bestan-

des und den Befallswerten nur geringe Werte. In diesem Fall ist die Bodenzahl ein besser geeigneter Maßstab. Dies wirft die Frage auf, ob Bodenkarten daher nicht für die Bestimmung von Risikozonen ausreichen. Herkömmliche Bodenkarten haben aber meist eine geringe räumliche Auflösung, und Veränderungen des Bodens wie Bodenverdichtung im Bereich des Vorgewendes oder Abtragung und Anreicherung von Boden werden nicht regelmäßig aktualisiert. Topographische Merkmale können in einem stärkeren Zusammenhang mit Bodenparametern wie dem Gehalt an Ton und organischer Substanz oder Pflanzennährstoffen stehen als diese mit dem Ertrag. Dies stellten PILESJÖ et al. (2005) zumindest für Sommergerste und Hafer fest und konnten aufgrund der topographischen Karten Managementzonen innerhalb des Feldes abgrenzen. Managementzonen können besser bestimmt werden, wenn alle verfügbaren Faktoren in die Berechnung miteinbezogen werden. MIAO et al. (2005) kombinierten die Informationen zum Boden und der Topographie mit den Ertragszahlen der vergangenen Jahre und erhielten so eine bessere Unterteilung in Managementzonen als mit der räumlichen oder zeitlichen Variabilität alleine.

Es gibt grundsätzliche Überlegungen, die bei der Fragestellung nach thermographischer Erfassbarkeit von Blattkrankheiten der Zuckerrübe, bedacht werden müssen.

Zwar hat die Arbeit gezeigt, dass aufgrund der speziellen Anforderungen der Pathogene an die Bedingungen ihres Lebensraumes, Feldbereiche bevorzugter Ausbreitung aufgrund der Temperatur eingegrenzt werden können, jedoch konnten die Pathogene selbst nicht im Feld mittels Thermographie unterschieden werden. Dies wäre insofern von Bedeutung, wenn die Krankheiten bevorzugt verschiedene Bereiche eines Feldes befallen würden. Auch wenn dies bei Klein-Altendorf ansatzweise so war, überschneiden sich in der Regel die Befallsregionen der Krankheiten.

Da *C. beticola* innerhalb kurzer Zeit das gesamte Feld gleichmäßig befällt, und das Primärinokulum stets von Pflanzenresten im Boden ausgeht, ist die Frage, ob nicht ohnehin das gesamte Feld behandelt werden müsste. Es hat sich aber gezeigt, dass das Pathogen vornehmlich zuerst in den Bereichen auftauchte, welche seiner weiteren Entwicklung förderlich waren. Die gleiche Frage gilt auch für *E. betae*. Das Pathogen manifestiert sich zwar in bestimmten Feldbereichen, kann durch seine biotrophe Lebensweise und die Windverbreitung seiner Sporen aber auch auf Teilflächen existieren, beziehungsweise verbreitet werden, auf denen sich nur wenige gute entwickelte Pflanzen befinden. Es müsste daher geprüft werden, ob eine teilflächen-

spezifische Behandlung über Risikozonen das Erstauftreten verzögert, und ob der Krankheitsdruck durch die Prävention von Sekundärinfektionen insgesamt gemindert werden kann.

Zuckerrüben werden in der Regel nur an den besten Standorten, welche sich durch eine hohe Bodenqualität auszeichnen, angebaut. Dies schließt Bodenunterschiede weitgehend aus. Inwiefern sollte ein präziser Pflanzenschutz Sinn machen, wenn also gar keine Heterogenitäten vorhanden sind? Während die Anzahl an landwirtschaftlichen Betrieben in Deutschland stetig abnimmt, steigt deren genutzte Fläche (ANONYM, 2008b). Damit werden zukünftig innerhalb eines Feldes Heterogenitäten des Bodens, der Topographie, und somit im Pflanzenwachstum mehr vorhanden sein. Folglich werden sich unter Umständen Befallsflächen von Pathogenen mit unterschiedlichen Ansprüchen an ihre Umgebung und Formen der Verbreitung in Zukunft nicht mehr vollständig überschneiden. Außerdem konnte anhand des Standortes Klein-Altendorf gezeigt werden, dass auch scheinbar homogene Flächen unterschiedlich stark befallen werden. Des Weiteren spielt die Skala eine Rolle, aufgrund welcher Heterogenitäten beurteilt werden. Selbst bei einem so kleinräumigen Maßstab wie dem Versuchsfeld Poppelsdorf konnten sowohl im Pflanzenwachstum als auch in der bevorzugten Ausbreitung der Pathogene deutliche Unterschiede entdeckt werden. Dies spricht für eine Anwendung des präzisierten Pflanzenschutzes auch bei kleinen Feldern.

Um diese Technik in der Praxis einzusetzen, müsste geprüft werden, ob sich die Ergebnisse auch ohne Kenntnis der tatsächlichen Beschaffenheit des Bodens und des Bestandes anwenden lassen. Außerdem besteht die Frage, ob der Aufnahmezeitpunkt der Bestandestemperatur mit den besten Korrelationsergebnissen, auch auf anderen Standorten, in anderen Jahren oder auf andere Feldfrüchte anzuwenden ist und ob für jedes Szenario andere Aufnahmezeitpunkte sinnvoll sind, oder ob es einen bestimmten Zeitraum gibt, in dem zu jeder Zeit eine Aufnahme des Bestandes gemacht werden kann. In Praxisversuchen ist zu testen, wie die ermittelten Risikozonen sinnvoll definiert werden können, und ob eine räumlich begrenzte Fungizidbehandlung tatsächlich zu einer Krankheits-, beziehungsweise Schadensbegrenzung führt. Des Weiteren müsste die Technik auch über mehrere Jahre zuverlässig sein. Im Idealfall sollte eine Überfliegung pro Schlag oder Bestand ausreichen, um die Kosten zu minimieren. Sollten diese Untersuchungen positiv ausfallen, könnten Karten erstellt werden, die Spritzbereiche für die Pathogene ausweisen, die an einem Standort

überwiegend vorkommen und einer Behandlung bedürfen. Die Begrenzung dieser Zonen innerhalb eines Feldes sollte in Abhängigkeit vom vorhersagbaren Witterungsverlauf innerhalb eines Jahres variabel sein.

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Mit dieser Arbeit sollte aufgezeigt werden, inwiefern sich die digitale Infrarotthermographie zur Detektion der *Cercospora*-Blattfleckenkrankheit, des Echten Mehltaus und des Rübenrostes auf der Zuckerrübe eignet und im präzisen Pflanzenschutz angewendet werden kann.

Zuerst wurde die Oberflächentemperatur des Blattapparates gesunder Zuckerrübenpflanzen und ihre Abhängigkeit von abiotischen Stressfaktoren untersucht. Aufbauend auf mikroskopischen Beobachtungen wurden die Auswirkungen einer Infektion und der Ausbreitung der Pathogene im Gewebe auf die Oberflächentemperatur und die Chlorophyllfluoreszenz der Blätter gemessen. Der Schwerpunkt lag auf der Frage, inwieweit pathogenspezifische Unterschiede vorhanden waren, und ob ein Befall vor sichtbaren Symptomen nachgewiesen werden konnte. Anschließend wurde die Infrarotthermographie im Freiland getestet. Es sollte geklärt werden, ob sich die Krankheiten auf einer kleinräumigen Skala über die Veränderung der Bestandestemperatur aufzeigen ließen, und ob Feldbereiche identifiziert werden konnten, die aufgrund der Temperatur des Bodens oder des Bestandes besonders günstig für die Etablierung der Krankheiten waren. Hierzu wurde die zeitliche und räumliche Ausbreitung der Krankheiten im Feld beschrieben.

- Die absolute Temperatur einer Zuckerrübenpflanze änderte sich nicht während ihres Wachstums. Tendenziell waren jüngere Pflanzen kühler als ältere. Die Temperatur von Blättern nahm im Laufe ihrer Entwicklung zu.
- Die Höhe eines Blattes, seine Stellung, Größe, Farbintensität und Kräuselung veränderten sich während des Wachstums und wirkten sich auf die Temperatur aus.
- Die durchschnittliche Anzahl der Stomata und die Größe ihrer Poren veränderten sich im Laufe des Wachstums nicht. Bei den einzelnen Blättern nahm die Anzahl je Flächeneinheit mit zunehmendem Alter um etwa die Hälfte ab, die Poren wurden größer. Das älteste Blattpaar einer Pflanze besaß die wenigsten Stomata mit den größten Poren, das jüngste die meisten mit den kleinsten Poren. Beide Merkmale

unterschieden sich zwischen den Blättern verschiedenen Alters signifikant.

- Während des Wachstums verringerte sich der durchschnittliche Wassergehalt aller Blätter einer Pflanze von 95 auf etwa 90 %. Das jüngste Blatt einer Pflanze besaß etwa 1 % weniger Wasser als das älteste.
- Bei Wassermangel stieg die Pflanzentemperatur im Verhältnis zu nicht gestressten Pflanzen allmählich um 1,5 K, bei Staunässe abrupt am ersten Tag nach Versuchsbeginn um 1 K fast bis auf das Niveau der Lufttemperatur an. Die Temperatur sank nach Ende des Stresses bei Pflanzen mit Wassermangel schneller als bei solchen unter Staunässe. Symptome waren Blattwelke, Vergilbung, und langsames Wachstum. Staunässe hatte einen stärkeren Effekt auf die Pflanzen als Wassermangel.
- Die durchschnittliche Blattemperatur veränderte sich nicht durch die *Cercospora*-Blattfleckenkrankheit. Die Maximale Temperaturdifferenz (MTD) stieg jedoch an, und unterschied sich ab dem Zeitpunkt der Nekrotisierung des Blattfleckes von der nicht inokulierten Pflanzen. Blattflecken waren durch ein Zentrum mit 1,2 K, und einen umgebenden Ring mit 0,7 K höherer Temperatur als nicht inokuliertes Blattgewebe gekennzeichnet. Vor ihrem Erscheinen kühlte sich das Gewebe lokal um etwa 0,4 K ab. Sie waren unter Umständen auch kühler als das umgebende Gewebe, wobei der Rand wärmer war als das Zentrum. Die Veränderung der Temperatur erstreckte sich auf eine etwa 1 mm größere Fläche als der visuell sichtbare Blattfleck.
- Die Entstehung von Blattflecken ging mit einer lokalen Erhöhung der Chlorophyllfluoreszenz einher. Diese verringerte sich daraufhin im Zentrum des Blattfleckes. Der Unterschied zu nicht inokuliertem Gewebe war signifikant, sobald ein sichtbarer Blattfleck erschien. Die Verringerung der Chlorophyllfluoreszenz erstreckte sich auf die visuell sichtbare Fläche des gesamten Blattfleckes.
- Durch Echten Mehltau verringerte sich die Blattemperatur um bis zu 0,6 K 5 dpl. Zu diesem Zeitpunkt erschienen Konidienträger auf der Blattoberfläche. Die MTD inokulierter Blätter war signifikant größer, als die Pusteln visuell sichtbar wurden. Im Thermogramm waren Pusteln begrenzte Bereiche niedriger Temperatur.
- Die Chlorophyllfluoreszenz befallener Blätter war höher als die nicht befallener. Die Unterschiede waren nicht signifikant.

- Wenn Uredosporenlager jung waren und einen ausgeprägten Hof besaßen nahm die Blattemperatur um maximal 0,9 K ab. Die MTD änderte sich nicht. Bei älteren Uredien mit kaum sichtbarem Hof stieg die Temperatur um maximal 0,5 K, und die MTD auf 0,37 K über die nicht inokulierten Blätter an. Die Temperaturänderung ging mit dem Erscheinen der Symptome einher. Pusteln waren etwa 1 K wärmer als das übrige Gewebe. Der Hof war circa 0,2 K kühler als das Uredosporenlager, und unterschied sich kaum vom umgebenden Blattgewebe. Im Videobild waren Pusteln größer als ihre Auswirkung auf die Temperatur im Thermogramm.
- Durch Uredien verringerte sich die Chlorophyllfluoreszenz im Verhältnis zu nicht inokuliertem Gewebe, ihr Hof führte zu einer geringen Erhöhung. Die Größe des Uredosporenlagers im Schwarzweiß-Bild entsprach der im Videobild.
- Symptome von *C. beticola* ließen sich thermisch einen Tag, und über die Chlorophyllfluoreszenz vier Tage früher als mit dem bloßen Auge nachweisen. Rostpusteln konnten thermisch erst vier, mit Chlorophyllfluoreszenz drei Tage nach Erscheinen im Videobild detektiert werden.
- Bei den homogenen Standorten Poppelsdorf und Klein-Altendorf hatte Boden mit kühler Oberflächentemperatur eine geringe elektrische Leitfähigkeit (ECa), bei den heterogenen Standorten Frankenforst und Dikopshof eine hohe.
- Während sich in Klein-Altendorf der Bestand homogen entwickelte, variierte das Rübenwachstum in Poppelsdorf. Am Frankenforst wuchsen die Rüben im Bereich hoher Bodentemperaturen am besten, beim Dikopshof im Bereich niedriger. An allen Standorten stand gutes Rübenwachstum im Zusammenhang mit niedrigen Bestandestemperaturen, schlechtes mit hohen. Standortspezifische Muster in der Temperaturverteilung blieben die ganze Vegetationsperiode über erhalten.
- *C. beticola* trat in Klein-Altendorf, am Frankenforst und Dikopshof zuerst auf. Die Befallshäufigkeit nahm exponentiell auf 100 % zu, die Befallsstärke lag bis auf Klein-Altendorf zwischen 7 und 9. In Klein-Altendorf war die Befallshäufigkeit und -stärke von *E. betae* am höchsten (≈ 100 %), gefolgt von Frankenforst (100 bzw. 65 %) und Dikopshof (< 40 % bzw. ≈ 10 %). Eine Befallshäufigkeit von 80 % mit einer Befallsstärke von weniger als 10 % erreichte *U. betae* in Klein-Altendorf.
- Die langsame und gleichmäßige Ausbreitung der *Cercospora*-Blattfleckenkrankheit war gekennzeichnet durch wenige Befallsstufen innerhalb des Feldes und einen

geringen Unterschied in der Befallsstärke zwischen benachbarten Boniturstellen. An den heterogenen Standorten trat sie zuerst in Bereichen hoher Bodenqualität und guten Pflanzenwachstums auf und manifestierte sich dort, in Klein-Altendorf im Bereich verdichteten Bodens. Echter Mehltau verbreitete sich tendenziell inselartig vor allem in Bereichen guten Bodens und Pflanzenwachstums. Typisch waren viele Befallsstufen von Epidemiebeginn an und ein großer Unterschied in der Befallsstärke benachbarter Boniturstellen. Befallsinseln von *U. betae* waren kleiner und regelmäßiger über das Feld verteilt.

- Mit *C. beticola* und *E. betae* befallene und nicht befallene Parzellen sowie Teilbereiche unterschiedlicher Befallsintensität konnten am Standort Poppelsdorf über die Oberflächentemperatur nicht zuverlässig unterschieden werden. In diesem kleinräumigen Maßstab wirkten freie Bodenfläche, Blattvergilbung oder Symptome anderer Pathogene als Störgrößen.
 - Auf dem Standort Klein-Altendorf war das Befallsrisiko durch *C. beticola* und *U. betae* aufgrund der geringen Befallsstärke niedrig (Risikogruppe 2), *E. betae* erreichte einen Wert von 4,8. Am Frankenforst war das Befallsrisiko für *C. beticola* 3,3, für *E. betae* 4,7, der Befall mit *U. betae* war mit 1,2 vernachlässigbar. Für *C. beticola* war die Befallsrisikogruppe am Dikopshof 4,1, für *E. betae* nur 1,8.
 - In Klein-Altendorf korrelierten die Befallswerte der einzelnen Boniturtermine und die Befallsrisikogruppen für *C. beticola* und *E. betae* besser mit der Temperatur des Bodens ($r = -0,38$ bzw. $-0,29$ und $r = 0,49$) als mit der des Bestandes ($r = 0,28$ bzw. $0,14$ und $r = 0,50$ bzw. $0,27$). Höhere Koeffizienten wurden bei *C. beticola* mit den Befallswerten früher Termine, bei *E. betae* mit denen später Termine erreicht.
- An den heterogenen Standorten Frankenforst und Dikopshof korrelierten die Befallswerte beider Pathogene stärker mit der Oberflächentemperatur des Bestandes als mit der des Bodens. Im Gegensatz zu Klein-Altendorf nahmen für *C. beticola* die Koeffizienten mit steigendem Befall zu, und für *E. betae* ab. Der Befall korrelierte mit der Temperatur des gesunden Bestandes negativ, mit der Bodentemperatur tendenziell positiv. Die höchsten Koeffizienten wurden in der Regel zwischen spätem Befall mit vielen Befallsstufen und der Temperatur des gesunden Bestandes erreicht. Diese Bestandestemperaturen waren der von allen Aufnahmetermeninen des gesunden Bestandes ermittelten durchschnittlichen Temperatur am ähnlichsten. Die

maximalen Koeffizienten betragen am Frankenforst -0,66 für *C. beticola* beziehungsweise -0,48 für *E. betae* und am Dikopshof -0,71 für *C. beticola* beziehungsweise 0,56 für *E. betae* mit den Bodenzahlen.

- Die Befallsrisikogruppen korrelierten bei *C. beticola* am Frankenforst stärker mit der Temperatur des Bodens, und bei *E. betae* am Dikopshof zusätzlich stärker mit der des kranken Bestandes, als der Befall einzelner Boniturtermine.
- An den beiden heterogenen Standorten ließen sich anhand der Oberflächentemperatur des gesunden Bestandes die Befallsregionen für *C. beticola* und *E. betae* nahezu eindeutig Feldregionen zuordnen, die durch topographische Merkmale abgegrenzt werden konnten.

Die Temperatur von Zuckerrübenpflanzen unterliegt pflanzenspezifischen, abiotischen und biotischen Einflussfaktoren. Zu den biotischen gehören unter anderem der Befall mit den Erregern *C. beticola*, *E. betae* und *U. betae*. Untersuchungen der Blattemperatur und der photosynthetischen Effektivität haben gezeigt, dass sich die Pathogene in Abhängigkeit ihres Entwicklungsstadium durch die Störung der Zellaktivität, des Wasserhaushaltes der Zelle und die Zerstörung der photosynthetisch aktiven Blattfläche auf eine Erhöhung oder Verringerung der Blattemperatur und der Chlorophyllfluoreszenz auswirkten. Die genaue Zuordnung der einzelnen Stadien in der Pathogenese zu bestimmten Temperaturveränderungen bedarf vor allem bei *E. betae* zusätzlicher Untersuchungen. Die Vielfalt an Störgrößen im Freiland machte eine frühzeitige direkte Detektion der *Cercospora*-Blattfleckenkrankheit und des Echten Mehltaus über die Temperatur der Pflanzen schwierig. Krankheiten, die schon frühzeitig einen stärkeren Einfluss auf die Photosynthese der Pflanzen haben, wie zum Beispiel die bodenbürtige Rübenfäule, ließen sich möglicherweise besser erkennen.

Mit dieser Arbeit konnten die Verbreitungsmuster der drei Krankheiten an verschiedenen Standorten und in verschiedenen Jahren aufgezeigt und in ihrer Eigenschaft bezüglich Homogenität beziehungsweise Heterogenität über Parameter dargestellt werden. Sie hat außerdem gezeigt, dass das Potential der Thermographie in der Definition von Risikozonen im Feld liegt. Faktoren, die das Auftreten und die räumliche Verbreitung der Pathogene bestimmen, lassen sich sehr gut und teilweise besser als mit herkömmlichen Methoden, über die Temperatur eingrenzen. So ist eine Prognose der Verbreitung der Krankheiten im Rahmen des Präzisen Pflanzenschutzes möglich.

6 LITERATURVERZEICHNIS

- AGRIOS, G. N. (1997). *Plant Pathology*. Academic Press, San Diego.
- ALDERFASI, A. A., NIELSEN, D. C. (2001). Use of crop water stress index for monitoring water status and scheduling irrigation in wheat. *Agricultural Water Management* 47: 69-75.
- ALLEN, R. F. (1926). A cytological study of *puccinia triticina* physiologic form 11 on little club wheat. *Journal of Agricultural Research* 33: 201-222.
- AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY (1978). Symposium on remote sensing for vegetation damage assessment. Seattle, Washington, USA.
- ANESIADIS, T., KARAOGLANIDIS, G. S., TZAVELLA-KLONARI, K. (2003). Protective, curative and eradicator activity of the strobilurin fungicide azoxystrobin against *Cercospora beticola* and *Erysiphe betae*. *Journal of Phytopathology* 151: 647-651.
- ANONYM (1952). Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen. Bodenkarte auf der Grundlage der Bodenschätzung im Maßstab 1:5000 (BK5), Blatt Dikopshof. Bonn-Bad Godesberg.
- ANONYM (1998). United States Department of Agriculture, Economic Research Service. Precision Agriculture: Information technology for improved resource use. *Agricultural Outlook* 19-23.
- ANONYM (2008a). Landwirtschaftlicher Informationsdienst Zuckerrübe. Übersicht Pflanzenschutzmittel - Fungizide. [Online]. Verfügbar: http://www.liz-online.de/gi/ps/psm/psm_fungizide.pdf [25.11.2008].
- ANONYM (2008b). Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. [Online]. Verfügbar: http://www.bmelv-statistik.de/fileadmin/sites/010_Jahrbuch/Stat_Jb_2008.pdf [17.11.2008].
- AYRES, P. 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.
- BERRYMAN, C. A., EAMUS, D., FARRAR, J. F. (1991). Variations in epidermal cell turgor of rust-infected barley seedlings. *New Phytologist* 119: 535-540.
- BLEIHOLDER, H. (1971). Beiträge zur Epidemiologie von *Cercospora beticola* Sacc. an Zuckerrübe. Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität, Bonn.

- BLEIHOLDER, H., WELTZIEN, H. C. (1972). Beiträge zur Epidemiologie von *Cercospora beticola* Sacc. an Zuckerrübe. III. Geopathologische Untersuchungen. Phytopathologische Zeitschrift 73: 93-114.
- BLUMER, S. (1967). Echte Mehltäupilze (*Erysiphaceae*). Gustav Fischer Verlag, Jena.
- BRAUN, U. (1987). A monography of the *Erysiphales* (powdery mildew). Gebrüder Bornträger Verlagsbuchhandlung, Berlin.
- 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.
- BROWN, K. W., ROSENBERG, N. J. (1970). Influence of leaf age, illumination, and upper and lower surface differences on stomatal resistance of sugar beet (*Beta vulgaris*) leaves. Agronomy Journal 62: 20-24.
- BRUZZESE, E., HASAN, S. (1983). A whole leaf clearing and staining technique for host specificity studies of rust fungi. Plant Pathology 32: 335-338.
- BÜNEMANN, E. K., SCHWENKE, G. D., VAN ZWIETEN, L. (2006). Impact of agricultural inputs on soil organisms - a review. Australian Journal of Soil Research 44: 379-406.
- CANNELL, R. Q., GALES, K., SNAYDON, R.W., SUHAIL, B. A. (1979). Effects of short-term waterlogging on the growth and yield of peas (*Pisum sativum*). Annals of Applied Biology 93 (3): 327-335.
- CHAERLE, L., VAN DER STRAETEN, D. (2001). Seeing is believing: imaging techniques to monitor plant health. Biochimica et Biophysica Acta 1519: 153-166.
- CHAERLE, L., HAGENBEEK, D., DE BRUYNE, E., VALCKE, R., VAN DER STRAETEN, D. (2004). Thermal and chlorophyll-fluorescence imaging distinguish plant-pathogen interactions at an early stage. Plant Cell Physiology 45: 887-896.
- CHAERLE, L., HAGENBEEK, D., VANROBAEYS, X., VAN DER STRAETEN, D. (2007). Early detection and biotic stress in *Phaseolus vulgaris*. International Journal of Remote Sensing 28: 3479-3492.
- CHUPP, C. (1953). A monograph of the fungus genus *Cercospora*. Ithaca, New York.
- CLARK, J. A., WIGLEY, G. (1974). Heat and mass transfer from real and model leaves. In: DE VRIES, D. A., AFGAN, N. H. (Hrsg.): Advances in Thermal Engineering. Vol. 1. Heat and Mass Transfer in the Biosphere. Part 1. Transfer Processes in the Plant Environment. Scripta Book Company, Washington. 413-422.
- CLOVER, G. R. G., SMITH, H. G., AZAM-ALI, S. N., JAGGARD, K. W. (1999). The effects of drought on sugar beet growth in isolation and in combination with beet yellow virus infection. Journal of Agricultural Science 133: 251-261.

- CUNNINGHAM, H. S. (1928) A study of the histologic changes induced in leaves by certain leaf-spotting fungi. *Phytopathology* 18: 717-751.
- DAUB, M. E. (1982). Cercosporin, a photosensitizing toxin from *Cercospora* species. *Phytopathology* 72: 370-374.
- DERKSEN, W. J. (1974). Thermal infrared pictures and the mapping of microclimate. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 22: 119-132.
- DRANDAREVSKI, C. A. (1969a). Untersuchungen über den echten Rübenmehltau *Erysiphe betae* (Vanha) Weltzien. I. Morphologie und Taxonomie des Pilzes. *Phytopathologische Zeitschrift* 65: 54-68.
- DRANDAREVSKI, C. A. (1969b). Untersuchungen über den echten Rübenmehltau *Erysiphe betae* (Vanha) Weltzien. II. Biologie und Klimaabhängigkeit des Pilzes. *Phytopathologische Zeitschrift* 65: 124-154.
- EHLERT, D., ADAMEK, R. (2005). Crop variability and resulting management effects. In: STAFFORD, J. V. (Hrsg.): *Precision Agriculture '05*. Academic Publishers, Wageningen. 193-200.
- EIGENBERG, R. A., NIENABER, J. A., WOODBURY, B. L., FERGUSON, R. B. (2006). Soil conductivity as a measure of soil and crop status - a four-year summary. *Soil Science Society of America Journal* 70: 1600-1611.
- FEINDT, F., MENDGEN, K., HEITEFUSS, R. (1981a). Der Einfluss der Spaltöffnungsweite und des Blattalters auf den Infektionserfolg von *Cercospora beticola* bei Zuckerrüben (*Beta vulgaris* L.) unterschiedlicher Anfälligkeit. *Phytopathologische Zeitschrift* 101: 281-297.
- FEINDT, F., MENDGEN, K., HEITEFUSS, R. (1981b). Feinstruktur unterschiedlicher Zellwandreaktionen im Blattparenchym anfälliger und resistenter Rüben (*Beta vulgaris* L.) nach Infektion durch *Cercospora beticola* Sacc. *Phytopathologische Zeitschrift* 101: 248-264.
- FLEMING, K. L., HEERMANN, D. F., WESTFALL, D. G. (2004). Evaluating soil color with farmer input and apparent soil electrical conductivity for management zone delineation. *Soil Science Society of America Journal* 96: 1581-1587.
- FRIEDMAN, S.P. (2005). Soil properties influencing apparent electrical conductivity: a review. *Computers and Electronics in Agriculture* 46: 45-70.
- FRIESLAND, H., SCHRÖDTER, H. (1988). The analysis of weather factors in epidemiology. In: KRANZ, J., ROTEM, J. (Hrsg.): *Experimental Techniques in Plant Disease Epidemiology*. Springer-Verlag, Heidelberg. 115-134.
- FULTON, J. P., SHAW, J. N., SULLIVAN, D., DOUGHERTY, M. P., BRODBECK, C. (2008). Use of remote sensed thermal imagery for in-season stress detection and site-specific management of cotton. *Research Report Series* 32: 26-27.

- GATES, D. M. (1973). I. Plant temperatures and energy budget. In: PRECHT, H., CHRISTOPHERSEN, J., HENSEL, H., LARCHER, W. (Hrsg.): Temperature and Life. Springer-Verlag, Berlin. 87-101.
- GATES, D. M. (1980). Biophysical Ecology. Springer-Verlag, New York Inc.
- GÄUMANN, E. (1959). Die Rostpilze Mitteleuropas mit besonderer Berücksichtigung der Schweiz. Band XII. Buchdruckerei Bächler & Co., Bern.
- GEBHARDT, A. (1984). Beurteilung des Wasserversorgungszustandes von Pflanzenbeständen mittels Thermographie. Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde 28: 231-237.
- GIULIANI, R., FLORE, J. A. (2000). Potential use of infra-red thermometry for the detection of water stress in apple trees. Acta Horticulturae 537: 383-392.
- GORDON, T. R., DUNIWAY, J. M. (1982a). Photosynthesis in powdery mildewed sugar beet leaves. Phytopathology 72: 718-723.
- GORDON, T. R., DUNIWAY, J. M. (1982b). Stomatal behaviour and water relations in sugar beet leaves infected by *Erysiphe polygoni*. Phytopathology 72: 723-726.
- GRANT, O. M., TRONINA, L., JONES, H. G., CHAVES, M. M. (2006). Exploring thermal imaging variables for the detection of stress responses in grapevine under different irrigation regimes. Journal of Experimental Botany 58: 815-825.
- HÄCKEL, H. (2005). Meteorologie. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.
- HAMACHER, J. (1985). Untersuchungen zu Resistenzmechanismen von Zuckerrüben gegenüber dem Echten Mehltau, *Erysiphe betae* (Van.) Weltzien. Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität, Bonn.
- HASHIMOTO, Y. (1990). Leaf temperature based on image processing. In: HASHIMOTO, Y., NONAMI, H., KRAMER, P. J., STRAIN, B. R. (Hrsg.): Measurement Techniques in Plant Science. Academic Press, San Diego. 373-386.
- HELLEBRAND, H. J., DAMMER, K.-H., BEUCHE, H., HERPPICH, W. B., FLATH, K. (2005). Infrarotbildverfahren im Pflanzenschutz. Agrartechnische Forschung 11: 35-42.
- HINFRAY, N., PORCHER, J.-M., BRION, F. (2006). Inhibition of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) P450 aromatase activities in brain and ovarian microsomes by various environmental substances. Comparative Biochemistry and Physiology. Part C: Toxicology and Pharmacology 144: 252-262.
- HOFFMANN, G. M., SCHMUTTERER, H. (1983). Parasitäre Krankheiten und Schädlinge an landwirtschaftlichen Kulturpflanzen. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.
- INOUE, Y. (1990). Remote detection of physiological depression in crop plants with infrared thermal imagery. Japanese Journal of Crop Science 59: 762-768.
- INOUE, Y., KIMBALL, B. A., JACKSON, R.D., PINTER JR., P. J., REGINATO, R.J. (1990).

- Remote estimation of leaf transpiration rate and stomatal resistance based on infrared thermometry. *Agricultural and Forest Meteorology* 51: 21-33.
- ISODA, A., WANG, P. (2002). Leaf temperature and transpiration of field grown cotton and soybean under arid and humid conditions. *Plant Production Science* 5: 224-228.
- JACKSON, M. B. (1985). Ethylene and responses of plants to soil waterlogging and submergence. *Annual Review of Plant Physiology* 36: 145-174.
- JACOBI, J., KÜHBAUCH, W. (2005). Site-specific identification of fungal infection and nitrogen deficiency in wheat crop using remote sensing. In: STAFFORD, J. V. (Hrsg.): *Precision Agriculture '05*. Academic Publishers, Wageningen. 73-80.
- JOHNSON, C. K., DORAN, J. W., DUKE, H. R., WIENHOLD, B. J., ESKRIDGE, K. M., SHANAHAN, J. F. (2001). Field-scale electrical conductivity mapping for delineating soil condition. *Soil Science Society of America Journal* 65: 1829-1837.
- JOHNSON, D. A., ALLDREDGE, J. R., HAMM, P. B., FRAZIER, B. E. (2003). Aerial photography used for spatial pattern analysis of late blight infection in irrigated potato circles. *Phytopathology* 93: 805-812.
- JONES, H. G. (1999). Use of thermography for quantitative studies of spatial and temporal variation of stomatal conductance over leaf surfaces. *Plant, Cell and Environment* 22: 1043-1055.
- JONES, H. G., LEINONEN, I. (2003). Thermal imaging for the study of plant water relations. *Journal of Agricultural Meteorology* 59: 205-217.
- JONES, H. G. (2004). Application of thermal imaging and infrared sensing in plant physiology and ecophysiology. *Advances in Botanical Research* 41: 107-163.
- KAHN, J., DEL RIO, L. E., NELSON, R., RIVERA-VARAS, V., SECOR, G. A., KAHN, M. F. R. (2008). Survival, dispersal, and primary infection site for *Cercospora beticola* in sugar beet. *Plant Disease* 92: 741-745.
- KITCHEN, N. R., DRUMMOND, S. T., LUND, E. D., SUDDUTH, K. A., BUCHLEITER, G. W. (2003). Soil electrical conductivity and topography related to yield for three contrasting soil-crop systems. *Agronomy Journal* 95: 483-495.
- KOZLOWSKI, T. T. (1968). II. Plant water consumption and response. In: KOZLOWSKI, J. J. (Hrsg.): *Water Deficit and Plant Growth*. Academic Press, New York. 182.
- KRAMER, P. J. (1937). The relationship between rate of transpiration and rate of absorption of water in plants. *American Journal of Botany* 24: 10-15.
- KRANZ, J., HOLZ, F. (1993). Basics of decision-making and planning for integrated pest management (IPM). *Feldafing: Deutsches Seminar für Ländliche Entwicklung*.

- KRÜGER, W., WIMMER, G. (1927). Ernährungsverhältnisse, Anbau, Düngung und Krankheiten der Zuckerrübe. Mitteilungen der Anhaltischen Versuchsstation Bernburg. Buchdruckerei Schwarzenberger, Bernburg. 225-229.
- KUCKENBERG, J., TARTACHNYK, I., SCHMITZ-EIBERGER, M., NOGA, G. (2007). Early detection of leaf rust and powdery mildew infections on wheat leaves by PAM fluorescence imaging. In: STAFFORD, J. V. (Hrsg.): Precision Agriculture '07. Academic Publishers, Wageningen. 515-521.
- LENTHE, J.-H. (2005). Erfassung befallsrelevanter Klimafaktoren in Weizenbeständen mit Hilfe digitaler Infrarot-Thermographie. Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.
- LENTHE, J.-H., OERKE, E.-C., DEHNE, H.W. (2007). Digital infrared thermography for monitoring canopy health of wheat. Precision Agriculture 8: 15-26.
- LINDENTHAL, M. (2005). Visualisierung der Krankheitsentwicklung von Falschem Mehltau an Gurken durch *Pseudoperonospora cubensis* mittels Thermographie. Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.
- LINDENTHAL, M., STEINER, U., DEHNE, H.-W., OERKE, E.-C. (2005). Effect of downy mildew development on transpiration of cucumber leaves visualized by digital infrared thermography. Phytopathology 95: 233-240.
- LORENZ, D. (1973). Die radiometrische Messung der Boden- und Wasseroberflächen-temperatur und ihre Anwendung insbesondere auf dem Gebiet der Meteorologie. Zeitschrift für Geophysik 39: 627-701.
- MAGYAROSY, A. C., SCHÜRMAN, P., BUCHANAN, B. B. (1976). Effect of powdery mildew infection on photosynthesis by leaves and chloroplasts of sugar beets. Plant Physiology 57: 486-489.
- MARSH, J. (2006). Perspective sugar - the political economy of a product. Journal of the Science of Food and Agriculture 86: 2516-2522.
- MEIER, U. (1997). Growth Stages of Plants, BBCH Monograph. Blackwell Wissenschafts-Verlag, Berlin.
- MENDGEN, K. (1997). The Uredinales. In: CARROLL, G. C., TUDZYNSKI, P. (Hrsg.): The Mycota. V. Part B. Plant Relationships. Springer-Verlag, Berlin. 79-94.
- 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. The Plant Journal 30: 601-609.
- MERTENS, F.M., PÄTZOLD, S., WELP, G. (2008). Spatial heterogeneity of soil properties and its mapping with apparent electrical conductivity. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 171: 146-154.

- MIAO, Y., MULLA, D. J., ROBERT, P. C. (2005). Combining soil-landscape and spatial-temporal variability of yield information to delineate site-specific management zones. In: STAFFORD, J. V. (Hrsg.): Precision Agriculture `05. Academic Publishers, Wageningen. 811-818.
- MILFORD, G. F. J., POCOCK, T. O., RILEY, J. (1985a). An analysis of leaf growth in sugar beet. I. Leaf appearance and expansion in relation to temperature under controlled conditions. *Annals of Applied Biology* 106: 163-172.
- MILFORD, G. F. J., POCOCK, T. O., RILEY, J., MESSEM, A. B. (1985b). An analysis of leaf growth in sugar beet. III. Leaf expansion in field crops. *Annals of Applied Biology* 106: 187-203.
- MOYNIHAN, M. R., ORDENTLICH, A., RASKIN, I. (1995). Chilling-induced heat evolution in plants. *Plant Physiology* 108: 995-999.
- MUBEEN, F., SHIEKH, M. A., IGBAL, T., KHAN, Q. M., MALIK, K. A., HAFEEZ, F. Y. (2006). In vitro investigations to explore the toxicity of fungicides for plant growth promoting rhizobacteria. *Pakistan Journal of Botany* 38: 1261-1269.
- NAGAJARAN, S., SINGH, D. V. (1990). Long-distance dispersion of rust pathogens. *Annual Review of Phytopathology* 28: 139-153.
- NELSON, M. R., ORUM, T. V., JAIME-GARCIA, R., NADEEM (1999). Applications of geographic information systems and geostatistics in plant disease epidemiology and management. *Plant Disease* 83: 308-319.
- NICOLAS, H., RIVOAL, R., DUCHESNE, J., LILI, Z. (1991). Detection of *Heterodera avenae* infestations on winter wheat by radiothermometry. *Revue de Nématologie* 14: 285-290.
- NILSSON, H. E. (1991). Hand-held radiometry and IR-thermography of plant diseases in field plot experiments. *International Journal of Remote Sensing* 12: 545-557.
- OERKE, E.-C., DEHNE, H.-W. (2004). Safeguarding production - losses in major crops and the role of crop protection. *Crop Protection* 23: 275-285.
- OERKE, E.-C., LINDENTHAL, M., FRÖHLING, P., STEINER, U. (2005). Digital infrared thermography for the assessment of leaf pathogens. In: STAFFORD, J. V. (Hrsg.): Precision Agriculture `05. Academic Publishers, Wageningen. 91-98.
- O'TOOLE, J. C., HATFIELD, J. L. (1983). Effect of wind on crop water stress index derived by infrared thermometry. *Agronomy Journal* 75: 811-817.
- PERÉZ-COLL, C. S., HERKOVITS, J. (2006). Synergistic effects of copper and butylic ester of 2,4-Dichlorophenoxyacetic acid (Esternon Ultra) on amphibian embryos. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 3: 343-347.
- PETERSON, G. L., KOSTA, K. L. (2005). Soybean rust: too close for comfort. *Plant Disease* 89: 663.

- PFEIFFER, E.-M., SAUER S., ENGEL, E. (2005). Bodenschätzung und Bodenbewertung. Nutzung und Erhebung von Bodenschätzungsdaten. Verlag Chmielorz, Wiesbaden.
- PILESJÖ, P., THYLEN, L., PERSSON, A. (2005). Topographical data for delineation of agricultural management zones. In: STAFFORD, J. V. (Hrsg.): Precision Agriculture '05. Academic Publishers, Wageningen. 819-826.
- PILLING, E. D., EARL, M., JOSEPH, R. S. I. (1996). Azoxystrobin: Fate and effects in the terrestrial environment. Brighton Crop Protection Conference: Pests and Diseases. Vols. 1-3: 315-322.
- PINTER, JR., P. J. (1986). Effect of dew on canopy reflectance and temperature. Remote Sensing of Environment 19: 187-205.
- POOL, V. W., MCKAY, M. B. (1916a). Climatic conditions as related to *Cercospora beticola*. Journal of Agricultural Research 6: 21-64.
- POOL, V., W., MCKAY, M. B. (1916b). Relation of stomatal movement to infection by *Cercospora beticola*. Journal of Agricultural Research 5: 1011-1042.
- 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. Journal of Agronomy and Crop Science 182: 231-237.
- RATHAIAH, Y. (1976). Infection of sugarbeet by *Cercospora beticola* in relation to stomatal condition. Phytopathology 66: 737-740.
- RELYEA, R., HOVERMAN, J. (2006). Assessing the ecology in ecotoxicology: a review and synthesis in freshwater systems. Ecology Letters 9: 1157-1171.
- RIECKMANN, W., STECK, U. (1995). Krankheiten und Schädlinge der Zuckerrübe. Verlag Thomas Mann, Gelsenkirchen.
- SCHOLES, J. D., FARRAR, J. F. (1986). Increased rates of photosynthesis in localized regions of a barley leaf infected with brown rust. New Phytologist 104: 601-612.
- SCHOLES, J. D., ROLFE, S. A. (1996). Photosynthesis in localised regions of oat leaves infected with crown rust (*Puccinia coronata*): quantitative imaging of chlorophyll fluorescence. Planta 199: 573-582.
- SCOTT, K. J., CHAKRAVORTY, A. K. (1982). The rust fungi. Academic Press, London.
- SHABALA, S. N. (1996). Leaf temperature kinetics measure plant adaption to extreme high temperatures. Australian Journal of Plant Physiology 23: 445-452.
- SKUBATZ, H., NELSON, T. A., MEEUSE, B. J. D., BENDICH, A. J. (1991). Heat production in the voodoo lily (*Sauromatum guttatum*) as monitored by infrared thermography. Plant Physiology 95: 1084-1088.
- SLAVIK, R. (1958). The influence of water deficit on transpiration. Physiologia

Plantarum 11: 524-536.

- 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 and foliage temperature of wheat. *Field Crop Research* 14: 39-51.
- STEUDLE, E. (2000). Water uptake by roots: effects of water deficit. *Journal of Experimental Botany* 51: 1531-1542.
- SUDDUTH, K. A., KITCHEN, N. R., WIEBOLD, W. J., BATCHELOR, W. D., BOLLERO, G. A., BULLOCK, D. G., CLAY, D. E., PALM, H. L., PIERCE, F. J., SCHULER, R. T., THELEN, K. D. (2005). Relating apparent electrical conductivity to soil properties across the north-central USA. *Computers and Electronics in Agriculture* 46: 263-283.
- TAIZ, L., ZEIGER, E. (2000). *Physiologie der Pflanzen*. Spektrum Akademischer Verlag, Berlin.
- TANNER, C. B. (1963). Plant temperatures. *Agronomy Journal* 55: 210-211.
- TARTACHNYK, I., RADEMACHER, I., KÜHBAUCH, W. (2005). Discrimination between nitrogen deficiency and fungal infection of winter wheat by laser induced fluorescence. In: STAFFORD, J. V. (Hrsg.): *Precision Agriculture '07*. Academic Publishers, Wageningen. 65-72.
- TROUGHT, M. C. T., DREW, M. C. (1980). The development of waterlogging damage in young wheat plants in anaerobic solution cultures. *Journal of Experimental Botany* 31: 1573-1585.
- TSIALTAS, J. T., MASLARIS, N. (2008). Nitrogen fertilization effects in leaf morphology and evaluation of leaf area and leaf area index prediction models in sugar beet. *Photosynthetica* 46: 346-350.
- VAN DER PLANK, J. E. (1963). Dynamics of epidemics of plant disease. *Science* 147: 120 - 124.
- VEREIJSEN, J., SCHNEIDER, J. H. M., STEIN, A., JEGER, M. J. (2006). Spatial pattern of *Cerospora* leaf spot of sugar beet in fields in long- and recently established areas. *European Journal of Plant Pathology* 116: 187-198.
- WELTZIEN, H. C., AHRENS, W. (1977). Sind Ertragssteigerungen durch Bekämpfung des echten Mehltaus der Zuckerrübe (*Erysiphe betae*) möglich? *Zucker* 30: 288-291.
- WELTZIEN, H. C. (1978). Geographical distribution of powdery mildews. In: SPENCER, D. M. (Hrsg.): *The powdery mildews*. Academic Press, New York. 39-49.
- WEST, J. S., BRAVO, C., OBERTI, R., LEMAIRE, D., MOSHOU, D., MCCARTNEY, H. A. (2003). The potential of optical canopy measurement for targeted control of field crop diseases. *Annual Review of Phytopathology* 41: 593-614.

- WIEGAND, C. L., NAMKEN, L. N. (1966). Influences of plant moisture stress, solar radiation, and air temperature on cotton leaf temperatures. *Agronomy Journal* 58: 582-586.
- WOLF, P. F. J., WEIS, F. J., VERREET, J.-A. (1995). Grundlagen einer integrierten Bekämpfung von *Cercospora beticola* in Zuckerrüben. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz* 102: 574-585.
- WOLF, P. F. J., VERREET, J. A. (1997). Epidemiologische Entwicklung von *Cercospora beticola* (Sacc.) in Zuckerrüben. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz* 106: 545-556.
- WOLF, P. F. J., KRAFT, R., VERREET, J.-A. (1998). Schadrelevanz von *Cercospora beticola* (Sacc.) in Zuckerrüben als Grundlage einer Verlustprognose. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz* 105: 462-474.
- WOLF, P. F. J., HEINDL, M., VERREET, J.-A. (2001). Zum Einfluss des Bestandesklimas auf die Prädisposition der Zuckerrübe gegenüber Infektionen von *Cercospora beticola* (Sacc.). *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz* 108: 578-592.
- WOLF, P. F. J., VERREET, J.-A. (2001). Welches Fungizid in Zuckerrüben? *Zuckerrübe* 50: 114-146.
- WOLF, P. F. J. (2002). Über die Integration von Bekämpfungsmaßnahmen gegen pilzliche Blattkrankheiten der Zuckerrübe: IPS-Modell Zuckerrübe. Habilitationsschrift, Shaker Verlag, Aachen.
- WOLF, P. F. J., KLIMK, H., VERREET, J.- A. (2004). A concept in integrated pest management (IPM) of fungal leaf diseases of cereals and sugar beets. *Emerging Concepts in Plant Health Management*. 69-102.
- WOLF, P. F. J., VERREET, J. A. (2005). Factors affecting the onset of *Cercospora* leaf spot epidemics in sugar beet and establishment of disease-monitoring thresholds. *Phytopathology* 95: 269-274.
- WOLLNY, J., DAMMER, K.-H., HAU, B., VOLK, T., WISCHKE, T. (2007). Site-specific disease control on wheat by combining the CROP-meter with the decision support system proPlant. In: STAFFORD, J. V. (Hrsg.): *Precision Agriculture '07*. Academic Publishers, Wageningen. 783-789.
- ZADOKS, J. C., VAN DEN BOSCH, F. (1994). On the spread of plant disease: a theory on foci. *Annual Review of Phytopathology* 32: 503-521.
- ZENS, I., STEINER, U., DEHNE, H.-W. (2002). Auftreten, Charakterisierung und Kontrolle des Erregers der Rübenfäule, *Rhizoctonia solani*, in Nordrhein-Westfalen. Landwirtschaftliche Fakultät der Universität Bonn, Schriftenreihe des Lehr- und Forschungsschwerpunktes „Umweltverträgliche und Standortgerechte Landwirtschaft“.

DANKSAGUNG

An dieser Stelle möchte ich all jenen danken, die mich in meiner Arbeit unterstützt haben. Mein besonderer Dank gilt:

Meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. Dehne für sein Vertrauen und die damit verbundene Überlassung dieses Themas.

Herrn Prof. Dr. Kühbauch für sein Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Koreferats.

Meinen Betreuern Frau PD Dr. Steiner für die vielen Ideen und Herrn PD Dr. Oerke für sein wissenschaftliches Engagement, seine Geduld und Bereitschaft immer Hilfe zu leisten.

Frau Prof. Dr. Van Der Straeten und ihrem wissenschaftlichen Mitarbeiter und meinem Kollegen Dr. Laury Chaerle der Universität Gent für ihre Zusammenarbeit in einem gemeinsamen Projekt, ohne welches ein Teil dieser Arbeit nicht zustande gekommen wäre. Ich danke auch für die herzliche Aufnahme und den kollegialen Umgang an ihrem Institut.

Allen Kollegiaten des Graduiertenkollegs für ihre wissenschaftliche und freundschaftliche Unterstützung, vor allem Dr. Franz-Michael Mertens.

Den Angestellten der Versuchsgüter der Universität Bonn für ihre Hilfe bei meinen Feldversuchen und ihre Freundlichkeit.

Allen Doktoranden und Mitarbeitern des Instituts für Pflanzenkrankheiten, die mich während meiner vier Jahre in Bonn als Freunde begleitet haben.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Unterstützung meiner Arbeit im Rahmen des Graduiertenkollegs 722.

Meiner Familie, die immer für mich da war, auch wenn die Dinge einmal nicht so liefen wie sie sollten.

Den größten Dank verdient mein Freund, Verlobter und Ehemann Norbert Heinrich, welcher mir nicht nur in wissenschaftlichen Fragen sondern auch in allen anderen Dingen des Lebens in der Zeit der Promotion zur Seite stand und mich uneingeschränkt unterstützte.