

Bewertung von Resistenzfaktoren gegen den Maiszünsler (*Ostrinia nubilalis* Hbn.) in mitteleuropäischem Dent-Material

C. PAPST, M. BOHN, H.F. UTZ, A.E. MELCHINGER, D. KLEIN und J. EDER

Einleitung

Durch seine stetige Ausbreitung entwickelt sich der Maiszünsler (*Ostrinia nubilalis* Hbn.) zu einem Schädling von immer größer werdender Bedeutung (EDER, persönliche Mitteilung, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft 2003). Der Bohrfraß der Raupe in Stängel und Kolben führt zum Abknicken der Pflanze und im Extremfall auch zum Abbrechen der Kolben. Bei Körnermais konnten in Deutschland Ertragseinbußen von bis zu 30 dt/ha beobachtet werden (BOHN et al. 1998).

Eine Bekämpfung der Raupen kann durch Ausbringung von Pyrethroiden oder des Toxins des Bodenbakteriums *Bacillus thuringiensis* erfolgen. Daneben sind in den letzten zehn Jahren auch gentechnisch veränderte Maishybriden (*Bt*-Hybriden) entwickelt worden, die das Toxin des *B. thuringiensis* selbst produzieren (KOZIEL et al. 1993, ESTRUCH et al. 1997, ARCHER et al. 2000, MAGG et al. 2001). In Deutschland wurden diese Sorten aufgrund der andauernden Diskussion über mögliche Risiken der Gentechnik bisher nicht zum Anbau zugelassen. Im Gegensatz dazu stellt die natürliche Resistenz eine wesentlich umweltschonendere Methode der Maiszünslerbekämpfung dar. Dabei muss zwischen drei Resistenzmechanismen unterschieden werden: Nichtpräferenz, Toleranz und Antibiose. Nichtpräferenz bezeichnet die geringe Attraktivität der Maispflanze für den Falter. Tolerante Maisgenotypen werden vom Maiszünsler befallen, zeigen jedoch keine oder nur geringe Ertragseinbußen. Mit Antibiose sind Abwehrmechanismen der Pflanze gemeint, die für einen geringeren Befall sorgen.

Mehrere Autoren (BERGVINSON et al. 1994a, 1994b, BUENDGEN et al. 1990,

GROH et al. 1998) beschrieben, dass Qualitätseigenschaften wie die Verdaulichkeit der Pflanze bzw. der Lignin- und Phenolgehalt aber auch Blatt- und Stängelhärte eng mit der Resistenz zusammenhängen. Bisher wurden diese Untersuchungen meist in den USA oder in Mexiko an tropischem und subtropischem Material durchgeführt. Dort sind neben dem europäischen Maiszünsler auch verwandte *Diatraea*-Arten beheimatet, sodass nicht ausschließlich die Resistenz gegen den Maiszünsler untersucht wurde. Der Maiszünsler tritt in diesen Regionen im Gegensatz zu Mitteleuropa in zwei bis vier Generationen pro Jahr auf, daher wird zwischen der Resistenz gegen die erste und zweite Generation unterschieden. Das Schadbild der zweiten Larvengeneration entspricht dabei dem Befallsbild in Mitteleuropa (KREPS et al. 1997).

Ziel der vorliegenden Studie war es, den Zusammenhang zwischen Resistenz der Pflanze und Inhaltsstoffen bzw. Qualitätseigenschaften zu untersuchen. Hierzu wurden 10 resistente bzw. 10 anfällige F_{2,3}-Linien einer Population auf Stängel- und Blatthärte, Phenol- und DIMBOA-Gehalt (2,3-Dihydroxy-7-methoxy-(2H9-1,4-benzoxazin-3-(4H)-on) sowie Qualitätseigenschaften (z.B. Verdaulichkeitsmerkmale) untersucht. Die Analysen wurden zu vier verschiedenen Ernteterminen durchgeführt, um die Veränderung der genannten Merkmale während des Vegetationsverlaufs zu verfolgen. Nichtpräferenz und Toleranz konnten in den vorliegenden Versuchen nicht erfasst werden, da zum einen die Larven künstlich ausgebracht wurden und zum anderen eine Ertragsfeststellung und somit Bewertung der Vitalität bei den Linien mit großen statistischen Unsicherheiten verbunden war.

Material und Methoden

Pflanzenmaterial

Das Untersuchungsmaterial stammte aus einer Population von 230 F_{2,3}-Linien, die bereits 1995 an zwei Orten auf Resistenz gegen den Maiszünsler untersucht worden waren (BOHN et al. 2000). Aus diesen Linien wurden 20 Genotypen ausgewählt: jeweils fünf anfällige und fünf resistente Linien wurden nach dem Selektionsmerkmal Stängelbruch sowie fünf anfällige und fünf resistente Linien nach dem Merkmal Fraßganglänge ausgewählt. In *Tabelle 1* sind die Mittelwerte der Gruppen dargestellt.

Tabelle 1: Mittelwerte des Resistenzniveaus der Gruppen

Gruppe	Stängelbruch 1-9 Skala	Fraßganglänge cm
Resistent	1,61 [†]	2,34
Anfällig	4,78	9,90
Anfällig - Resistent	3,17	7,60

[†] Daten stammen aus Versuchen von 1995, durchgeführt an der Universität Hohenheim (BOHN et al. 2000).

Anlage und Durchführung der Versuche

Die Versuche wurden in den Jahren 2000 und 2001 in Freising durchgeführt. Als Versuchsanlage wurde eine unvollständige zweifaktorielle Blockanlage (5x4) mit den zwei Behandlungsstufen Nullparzelle und Maiszünslerparzelle gewählt. Alle Versuche wurden in zweifacher Wiederholung angelegt, jede Wiederholung umfasste fünf Blöcke, wobei die unvollständigen Blöcke jeweils vier Prüfglieder enthielten. Jede Parzelle bestand im Jahr 2000 aus zwei und im Jahr 2001 aus drei Einzelreihen mit je 25 Pflanzen und 0,75 cm Reihenabstand. Die Versuche wurden mit doppelter Saatstärke angelegt und nach dem Auflauf-

Autoren: Christine PAPST und Joachim EDER, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Vöttinger Straße 38, D-85354 FREISING-WEIHENSTEPHAN; M. BOHN, S-110 Turner Hall, Crop Science Department, University of Illinois, 1102 South Goodwin Avenue, URBANA, IL 61801, USA; H.F. UTZ, A.E. MELCHINGER und D. KLEIN, Institut für Pflanzenzüchtung und Saatgutforschung und Populationsgenetik, Universität Hohenheim, D-70593 STUTTGART



fen auf die erforderliche Pflanzenzahl von acht Pflanzen/m² vereinzelt.

Die Nullparzellen wurden gegen natürlichen Befall durch eine dreimalige Applikation mit Fastac SC® geschützt. Alle Pflanzen der Maiszünslerparzellen wurden mit frisch geschlüpften Raupen belegt, um einen gleichmäßigen Befall sicherzustellen. Der Zeitpunkt der Ausbringung erfolgte an drei Terminen im wöchentlichen Abstand ab Ende Juni und wurde mit dem natürlichen Flug des Maiszünslers abgestimmt. Insgesamt wurden etwa 60 Raupen pro Pflanze ausgebracht. Die Eigelege wurden vom Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) in Surgerès, Frankreich bezogen.

Erhebung der Versuchsdaten

Erntetermine und Aufbereitung

Die Untersuchungen wurden ausschließlich in den Nullparzellen vorgenommen, die Maiszünslerparzellen dienten nur zur Evaluierung des Resistenzniveaus. Effekte durch Fraßstätigkeit der Larven auf die zu untersuchenden Parameter wurden somit ausgeschlossen. Die Versuche wurden an vier verschiedenen Ernteterminen im monatlichen Abstand von Mitte Juli bis Mitte Oktober durchgeführt. An jedem Termin wurde stets eine Wiederholung an einem Tag vollständig geerntet und verarbeitet, die zweite Wiederholung wurde am folgenden Tag analysiert. Im Jahr 2000 wurden drei Pflanzen und im Jahr 2001 zehn Pflanzen je Prüfglied und Wiederholung geerntet. Gleich nach der Ernte wurden die entsprechenden Pflanzenteile für die Härtemessung separiert und in Wasser aufbewahrt. Die Messungen erfolgten spätestens fünf Stunden nach der Ernte, sodass ein starker Wasserverlust im Gewebe und somit eine Verfälschung der Messergebnisse weitgehend ausgeschlossen werden konnte. Für die Qualitätsanalysen an der Restpflanze (ohne Berücksichtigung des Kolbens) wurden die verbleibenden Pflanzenteile einer Parzelle als Mischprobe gehäckselt.

Resistenzigenschaften

Die Resistenz der Pflanze wurde anhand des Stängelbruchs mit Hilfe der Boniturskala von Hudon und Chiang (1991, 1 = intakte Pflanze, 9 = Bruch unterhalb des Kolbens oder abgefallener Kolben) be-

stimmt. Außerdem wurde vor der Ernte im Oktober an jeder Pflanze die Gesamtlänge aller Fraßgänge unterhalb des Kolbens im Stängel in cm gemessen.

Härtemessungen

Die Härtemessungen wurden mit einem Standard INSTRON-Gerät (Modell 4302) durchgeführt, das mit einer 100 N Ladezelle (INSTRON Static Load Cell 100 N UK 1045) ausgerüstet war. Die an der Ladezelle auftretende Kraft (in Newton) wurde während der gesamten Messung aufgezeichnet, für die statistischen Analysen wurde jedoch nur die Maximalkraft verwendet, die kurz vor dem Eindringen des Stempels in das Gewebe auftrat.

Die Blatthärtemessung wurde ausschließlich Mitte Juli durchgeführt. Dazu wurde an jeder geernteten Pflanze ein Blatt aus dem Blattquirl entnommen, das etwa zu 2/3 entfaltet war. Wie auch bei BERGVINSON et al. (1994a, 1994b) beschrieben, wurden die Messungen an der Unterseite der Blätter vorgenommen, jeweils 25 cm unterhalb der Blattspitze und in etwa 2 cm Entfernung zur Hauptblattader. An jedem Blatt wurden zwei Messungen auf beiden Seiten der Hauptader durchgeführt. Der konkave Stempel hatte einen Durchmesser von 0,8 mm und wurde mit einer Geschwindigkeit von 1 cm/min bewegt. Damit sich das Blatt während der Messung nicht verformte bzw. nach unten nachgab, wurde es per Hand mit einer Unterlegscheibe (Außendurchmesser 24 mm, Innendurchmesser 8 mm) fixiert (Abbildung 1).

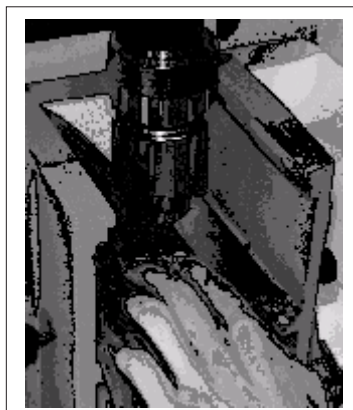


Abbildung 1: Blatthärtemessung mit einem Standard INSTRON Gerät; das Blatt wird mit einer Unterlegscheibe für die Messung fixiert

Die Messungen der Stängelhärte wurden an den verbleibenden drei Ernteterminen durchgeführt: Mitte August, Mitte September und Mitte Oktober. Die Messpunkte wurden jeweils mit den Fraßstellen der Larven während der Vegetationszeit abgestimmt. Somit erfolgte die Messung im August am Internodium unterhalb der Rispe, die darauf folgende Messung im September am Internodium direkt über dem Primärkolben und die Messung im Oktober am Internodium unterhalb des Primärkolbens. Als Messstempel wurde ein flacher Zylinder mit einem Durchmesser von 1,2 mm verwendet, der mit einer Geschwindigkeit von 10 cm/min bewegt und senkrecht auf die flache Seite des Stängel geführt wurde (Abbildung 2). Das Internodium wurde für die Messung in einer V-förmigen Edelstahlrinne festgehalten. An allen drei Terminen wurde auch der Durchmesser

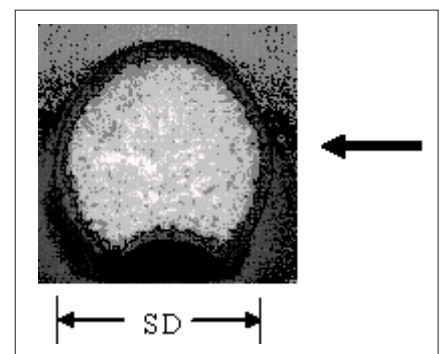


Abbildung 2: Messpunkt (Pfeil) für die Stängelhärtemessung und Stängeldurchmesser (SD) am Stängelquerschnitt

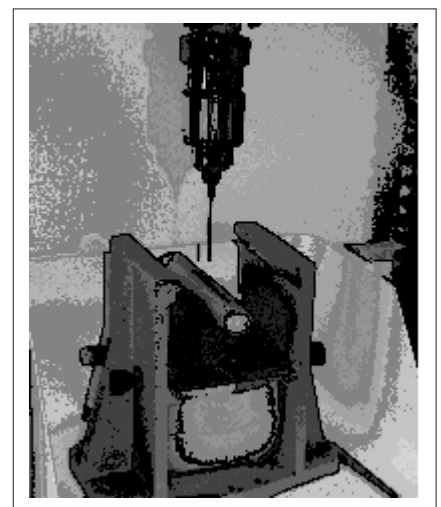


Abbildung 3: Messung der Stängelhärte mit einem Standard INSTRON-Gerät

des Stängels (SD) an der Messstelle erfasst. An jeder Einzelpflanze wurden zwei Messungen in einem Abstand von 2 cm zueinander durchgeführt, wobei mit dem Messstempel etwa 5 cm oberhalb des Internodiums eingestochen wurde (Abbildung 3).

Qualitätseigenschaften

Von jedem Genotyp wurde eine Mischprobe von etwa 1,5 kg des gehäckselten Materials genommen und bei 35° C getrocknet. Die Aufbereitung für die NIRS (Nah-Infrarot-Reflexions-Spektroskopie) - Analyse erfolgte nach der Methode von DEGENHARDT (1996). Es wurde der Trockensubstanzgehalt der Restpflanze (TS_{Rest} in %) bestimmt und mit Hilfe von NIRS die Qualitätseigenschaften Cellulaseverdaulichkeit der organischen Masse (CDOM) (DE BOEVER et al. 1986), Rohfasergehalt (RF) (WEENDER-Futtermittelanalyse, NAUMANN und BASSLER ohne Jahr), Rohprotein-gehalt (RP) (KJELDAHL 1883) und wasserlösliche Kohlenhydrate (WLK) (Luff-Schoorl 1929) in g/kg Trockenmasse ermittelt. Im Oktober war die Erfassung der WLK nicht mehr möglich. Die erforderliche NIRS-Kalibration wurde freundlicherweise von der KWS SAAT AG, Einbeck zu Verfügung gestellt.

DIMBOA- und Phenolsäure-Gehalte

DIMBOA wurde aus jungen noch nicht entfaltenen Blättern isoliert. Die Ernte der Blätter erfolgte Anfang Juli zum 2. Termin der Larvenausbringung. Das Blattmaterial wurde sofort in Stickstoff abgekühlt und bei -80 °C gelagert. Die Extraktion erfolgte aus dem frischen bzw. tiefgefrorenen Blattmaterial mit Ethylacetat (EtOAc). Die organische Phase wurde bei Raumtemperatur eingedampft, der Rückstand dann in Methanol (MeOH) gelöst und bis zur Analyse mit HPLC (High-pressure-liquid-chromatography) bei -20 °C gelagert.

Die Ferulasäure und die p-Cumarsäure wurden aus etwas älteren bereits dunkelgrünen Blättern isoliert. Die Ernte erfolgte zeitgleich mit der Blattentnahme für DIMBOA. Die Blätter wurden gefriergetrocknet und anschließend fein vermahlen. In einem ersten Schritt wurden die löslichen Phenole aus der Trockensubstanz unter Zugabe von MeOH extrahiert. Aus dem verbleibenden Rück-

Tabelle 2: Gruppenmittelwerte und Grenzdifferenz (GD 5 %) für das Selektionsmerkmal Stängelbruch bzw. Fraßganglänge

Gruppe	Resistenzmerkmale	
	Stängelbruch 1-9 Skala	Fraßganglänge cm
Resistent	2,76	16,42
Anfällig	4,39	18,03
Anfällig - Resistent	1,63*	1,61
GD 5 %	0,55	4,35

* Signifikant bei P = 0,05.

stand wurden die zellwandgebundenen Phenole gewonnen. Die Extraktion erfolgte unter Zugabe von EtOAc. Nach dem Eindampfen wurden die Proben in MeOH aufgelöst und bis zur HPLC-Analyse bei -20° C aufbewahrt.

Statistische Auswertung

Die Messergebnisse und Boniturwerte von Einzelpflanzen wurden zu einem Parzellenmittelwert zusammengefasst. Die Daten der HPLC-Analyse für DIMBOA und die Phenole wurden logarithmiert. Da eine große Varianz zwischen den Umwelten festgestellt wurde und die 20 Linien nach bestimmten Kriterien ausgesucht worden waren, galten alle Faktoren als fixiert. Mittelwerte und Grenzdifferenzen (GD 5 %) wurden für beide Orte getrennt berechnet und in einer mehrfaktoriellen Analyse zusammengefasst. Resistenzfaktoren wurden dann als bedeutend eingestuft, wenn sich die Gruppen anfällig und resistent signifikant im F-Test voneinander unterscheiden. Die Verrechnung der Daten erfolgten mit dem Programm PLABSTAT (UTZ 2001).

Ergebnisse

Resistenzigenschaften

Die nach Stängelbruch selektierten Genotypen wiesen auch in den Versuchen

Tabelle 3: Gruppenmittelwerte und Grenzdifferenz (GD 5 %) für die Blatthärte und Stängelhärte sowie den Stängeldurchmesser

Gruppe	Blatthärte	Stängelhärte			Stängeldurchmesser		
	Juli	August	September	Oktober	August	September	Oktober
	N	N			cm		
Resistent	0,73	27,07	39,31	51,78	0,53	1,28	1,85
Anfällig	0,75	26,31	35,78	47,03	0,56	1,21	1,72
Anfällig - Resistent	-0,02	-0,76	-3,53*	-4,75*	0,03	-0,07	-0,13*
GD 5 %	0,09	1,37	2,44	4,73	0,04	0,08	0,10

* Signifikant bei P = 0,05.

von 2000 und 2001 einen signifikanten Unterschied zwischen der resistenten und anfälligen Gruppe auf. Dabei war die anfällige Gruppe um 1,63 Notenpunkte stärker befallen als die resistente Gruppe (Tabelle 2). Im Gegensatz dazu konnte bei den nach der Fraßganglänge selektierten Genotypen keine signifikante Differenz mehr zwischen den resistenten und anfälligen festgestellt werden. Die vorgenommene Gruppeneinteilung durch die Versuche von 1995 konnte somit durch die erneut durchgeführten Analysen nicht mehr bestätigt werden. Daher wurden die Ergebnisse dieser Genotypen für die folgenden Auswertungen nicht herangezogen.

Härtemessungen

Die Stängelhärte im September und Oktober sowie der Stängeldurchmesser im Oktober zeigten signifikante Unterschiede zwischen der resistenten und anfälligen Gruppe (Tabelle 3). Dabei waren die anfälligen $F_{2,3}$ -Linien durch eine niedrigere Stängelhärte und einen dünneren Stängel gekennzeichnet.

Qualitätseigenschaften

Für die Qualitätsmerkmale Verdaulichkeit (CDOM), Gehalt an Rohprotein (RP) und wasserlöslichen Kohlenhydraten (WLK) konnten an einigen Ernteterminen signifikante Gruppenunterschiede zwischen der anfälligen und resistenten Gruppe festgestellt werden (Tabelle 4). Die resistente Gruppe wies tendenziell eine niedrigere Verdaulichkeit und einen geringeren Gehalt an WLK auf. Der Rohfasergehalt (RF) war bei der resistenten Gruppe, außer im Oktober, höher und der Proteingehalt im September und Oktober geringer. Die Restpflanze erreichte im September und Oktober bei der anfälligen Gruppe einen niedrigeren Trockensubstanzgehalt (TS_{Rest}), d.h. die Abreife erfolgte später.

Tabelle 4: Gruppenmittelwerte und Grenzdifferenz (GD 5 %) für die Qualitätsparameter Trockensubstanzgehalt der Restpflanze (TSRest), Cellulaseverdaulichkeit (CDOM), Rohfasergehalt (RF), Rohproteingehalt (RP) und Gehalt an wasserlöslichen Kohlenhydraten (WLK)

Gruppe	TS _{Rest}				CDOM				RF				RP				WLK			
	Juli	August	September	Oktober	Juli	August	September	Oktober	Juli	August	September	Oktober	Juli	August	September	Oktober	Juli	August	September	Oktober
	%				10 ⁻⁴ × g × 1 g ⁻¹				10 ⁻⁴ × g × 1 g ⁻¹				10 ⁻⁴ × g × 1 g ⁻¹				10 ⁻⁴ × g × 1 g ⁻¹			
Resistent	10,43	14,57	23,38	24,80	57,49	57,23	58,22	57,27	28,42	28,03	24,00	25,32	10,44	4,99	4,33	7,31	14,87	22,85	24,99	
Anfällig	10,99	14,72	23,37	27,45	59,07	59,24	60,17	59,31	28,11	27,32	25,38	24,57	10,28	7,14	4,59	7,70	14,39	24,01	25,43	
Anfällig-Resistent	0,34	0,15	-0,01	0,09	1,58*	2,01*	1,95*	2,04	-0,31*	-0,71*	-0,42	-0,75	-0,34	0,17	0,24	0,39	1,52*	1,14	0,44	
GD 5%	0,44	0,33	1,19	1,30	0,54	1,18	0,96	3,34	0,30	0,44	0,73	2,13	0,37	0,4	0,49	0,57	1,13	1,29	1,47	

* Signifikant bei P = 0,05.

Phenolsäuren und DIMBOA

Zwei wichtige zellwandgebundene Phenolsäuren, die einen Einfluss auf die Zellwandfestigkeit ausüben, sind die p-Cumarsäure und Ferulasäure. Die löslichen Phenolsäuren lagen bei einem Großteil der Analysen unter der Nachweisgrenze (Daten nicht gezeigt). Auch konnten die resistenten und anfälligen Genotypen anhand der Gehalte an gebundenen Phenolsäuren und DIMBOA nicht signifikant voneinander unterschieden werden (Tabelle 5). Tendenziell wurde jedoch in der anfälligen Gruppe ein niedrigerer DIMBOA-Gehalt nachgewiesen.

Diskussion

Die Ausbreitung des Maiszünslers in den letzten Jahren verlangt nach einer züchterischen Verbesserung der Resistenz. Im Gegensatz zu der monogen gesteuerten Bt-Resistenz, die leicht von dem Schadinsekt durchbrochen werden kann, bietet die natürliche Resistenz, die von mehreren Genen beeinflusst wird, den Pflanzen längerfristigen Schutz. Ziel der vorliegenden Studie war es, anhand bereits als resistent oder anfällig eingestufte Genotypen den Zusammenhang von ausgewählten Pflanzeigenschaften und der Maiszünsleresistenz zu bestimmen.

Tabelle 5: Logarithmierte Gruppenmittelwerte und Grenzdifferenz (GD 5 %) für die gebundenen Phenolsäuren p-Cumarsäure (p-CUM) und Ferulasäure (FER) sowie DIMBOA (DIM)

Gruppen	LN p-CUM ppm	LN FER ppm	LN DIM AE / g
Resistent	6,39	6,58	13,36
Anfällig	6,32	6,66	12,73
Anfällig - Resistent	-0,07	0,08	-0,63
GD 5%	0,66	0,71	0,88

Härtemessungen und Inhaltsstoffe

Da sich die frisch geschlüpften Larven im Wesentlichen von den Blättern und zum Teil auch Pollen ernähren, lag die Vermutung nahe, dass die Blatthärte einen signifikanten Einfluss auf die Überlebensrate der Maiszünslarven ausübt. In den USA und Mexiko, wo die erste Larvengeneration ausschließlich Schäden an den Blättern hervorruft, wurde eine Korrelation von Blatthärte aber auch Blattinhaltsstoffen wie DIMBOA und Phenolen mit der Resistenz festgestellt (BERGVINSON 1994b, 1997). Dieser Zusammenhang konnte durch die Erhebungen in der vorliegenden Studie nicht bestätigt werden. Es ist zu vermuten, dass in dem untersuchten Maismaterial die Blatthärte keinen signifikanten Beitrag zur Resistenz leistet. Ebenso konnte kein Zusammenhang zwischen den Blattinhaltsstoffen DIMBOA, den löslichen sowie gebundenen Phenolen p-Cumarsäure und Ferulasäure und der Resistenz gefunden werden. Vielmehr scheint in Mitteleuropa die Stängelhärte in Bezug auf die Resistenz in den Vordergrund zu rücken. Besonders die Messungen der Stängelhärte an Internodien über und unter dem Primärkolben im September und Oktober zeigten eine signifikante Beziehung zur Resistenz. VIERECK (1981) zeigte, dass die Stängelhärte vor allem einen Einfluss auf junge Larven hat, da sie länger auf härteren Stängeln verweilen, bis sie eine geeignete Einbohrstelle gefunden haben und in dieser Zeit Antagonisten und der Witterung stärker ausgesetzt sind. Dadurch sind dann weniger Larven im Stängel zu finden. Ein weiterer wichtiger Aspekt der Stängelhärte ist jedoch die erhöhte Bruchfestigkeit und somit Widerstandsfähigkeit der härteren Sorten im späte-

ren Vegetationsverlauf. Dies wurde auch durch neuere Studien von FLINT-GARCIA et al. (2002) und MARTIN et al. (2001) bestätigt. Des Weiteren stellte VIERECK (1981) fest, dass neben der Stängelhärte die Resistenz bzw. der Stängelbruch auch vom Stängeldurchmesser beeinflusst wird. Diese Annahme konnte auch durch unsere Versuche gestützt werden. Es ließ sich ein signifikanter Zusammenhang zwischen Stängeldurchmesser unter dem Primärkolben und Resistenz nachweisen. Im Schnitt zeigte die anfällige Gruppe einen um 7 % dünneren Stängeldurchmesser als die resistente Gruppe. Die Stabilität des Stängels und somit auch seine Bruchfestigkeit scheinen demzufolge mit wachsendem Stängeldurchmesser zu steigen.

Qualitätseigenschaften

Immer wieder wurde der Reife eine gewisse Bedeutung bei der Zünsleresistenz zugeschrieben (KREPS et al. 1998, BOHN et al. 2000, MAGG et al. 2001, PAPST et al. 2001). Diesen Untersuchungen zufolge ist eine späte Blüte bzw. eine späte Abreife und somit ein niedriger Trockensubstanzgehalt mit einem verbesserten Resistenzniveau kombiniert. In der vorliegenden Studie wurde nur zu Anfang des Messzeitraums (Juli und August) ein niedrigerer Trockensubstanzgehalt der resistenten Gruppe festgestellt, während zu späteren Zeitpunkten die anfällige Gruppe niedrigere Trockensubstanzgehalte aufwies. Die Gruppenunterschiede waren jedoch zu keinem Zeitpunkt signifikant.

BUENDGEN et al. (1990) und BUXTON et al. (1996) beschrieben einen signifikanten Zusammenhang zwischen Resistenz gegen den Maiszünslar und Silomaisqualität. Auch in unseren Versuchen war ein signifikanter Unterschied

zwischen den Gruppen anfällig und resistent für die Cellulaseverdaulichkeit (CDOM) im Zeitraum von Juli bis September zu finden. Demzufolge war die Verdaulichkeit bei der anfälligen Gruppe höher als bei der resistenten. Zwar war die Differenz nicht mehr signifikant, jedoch konnte auch noch im Oktober eine geringere Verdaulichkeit der resistenten Gruppe festgestellt werden.

In einem engem Zusammenhang mit der Verdaulichkeit steht der Rohfasergehalt. In unseren Versuchen konnte allerdings nur zu Beginn des Messzeitraums eine signifikante Beziehung zwischen dem Rohfasergehalt und der Resistenz gefunden werden. Tendenziell verfügte die resistente Gruppe über einen höheren Rohfasergehalt. Dies ist ein Hinweis auf die Antibiose der Pflanze. Ein hoher Rohfasergehalt bzw. eine niedrige Verdaulichkeit verhindern eine gute Larvenentwicklung aufgrund der erschwerten Nahrungsaufnahme, was zu Abwanderung oder Absterben führen kann.

Eine signifikante Beziehung zwischen Stängelbruch und Rohproteingehalt konnte in der vorliegenden Studie nicht nachgewiesen werden. Tendenziell wurde jedoch ein niedrigerer Proteinanteil bei der resistenten Gruppe gemessen. Auch BERGVINSON et al. (1997) stellten bei ihren Versuchen fest, dass Resistenz häufig mit einem niedrigeren Proteinanteil im Mark verbunden war. Sie führten dies darauf zurück, dass hohe Proteinmengen zu einer guten Entwicklung und einer hohen Überlebensrate führen.

Der Gehalt an wasserlöslichen Kohlenhydraten, also im Wesentlichen an Zucker, spielt gegen Ende der Vegetationszeit, wenn der größte Anteil aus dem Stängel als Stärke im Kolben eingelagert worden ist, nur eine untergeordnete Rolle. Die Studie zeigte, dass gerade zu Beginn des Messzeitraums, wenn viel Zucker produziert wird, große Gruppenunterschiede zwischen der resistenten und der anfälligen Gruppe vorlagen. Dies ließ sich in abgeschwächter Form ebenfalls bei der zweiten Analyse Mitte August nachweisen. Bei beiden Terminen war die anfällige Gruppe durch einen höheren Zuckergehalt gekennzeichnet. Da Zucker als Energielieferant für die Larven angesehen werden kann, ist anzuneh-

men, dass sich die Larven in den kohlenhydratreichen Pflanzen besser entwickeln können und somit auch ein höheres Schadpotential erreichen.

Möglichkeiten zur Verbesserung der Resistenz

In der Untersuchung wurden erstmals auch für mitteleuropäisches Material signifikante Zusammenhänge zwischen einigen Inhaltsstoffen bzw. Pflanzeigenschaften und der Resistenz gegen den Maiszünsler gefunden. Die Blatteigenschaften zeigten in dem untersuchten Material keinen deutlichen Zusammenhang mit der Resistenz, auch wenn sich die Larven in den ersten Entwicklungsstadien hauptsächlich von Blättern und Pollen ernähren. Allerdings kann von einer erhöhten Resistenz bei hoher Stängelfestigkeit und niedrigerer Verdaulichkeit ausgegangen werden. Zu beachten ist allerdings, dass der Wunsch nach einer niedrigen Verdaulichkeit grundsätzlich im Gegensatz zu diesem wichtigen Zuchtziel bei Silomais steht. Auch wenn der Schaden durch den Maiszünsler bisher hauptsächlich ein Problem der Körnermaisproduktion ist, muss davon ausgegangen werden, dass aufgrund der massiven Ausbreitung des Schädling zukünftig auch Silomaiserträge beeinträchtigt werden können. Daher kann die Verdaulichkeit bei der Züchtung neuer Sorten nicht völlig außer Acht gelassen werden. QTL-Studien haben gezeigt, dass Regionen, die für die Resistenz verantwortlich sind, gehäuft in der Nähe von Ligninsynthese-Genen liegen (BOHN et al. 2000, PAPST et al. 2001). Der Zusammenhang zwischen Ligninstruktur und Verdaulichkeit scheint neueren Erkenntnissen zur Folge durch das Verhältnis zweier Komponenten des Lignins, Guaiacyl und Syringyl, gegeben zu sein (BARRIERE et al. 2003), wobei dies nicht unbedingt einen Einfluss auf die Zellwandstärke bzw. Stängelhärte haben muss (ARGILLIER et al. 1996). Auch ALBRECHT et al. (1986) stellten fest, dass eine Selektion auf erhöhte Stängelhärte die Verdaulichkeit nicht negativ beeinflusste.

Hinsichtlich der Maiszünslerresistenz ist es wünschenswert, künftig auch indirekte Selektionsmerkmale neben aufwändigen Versuchen mit frisch geschlüpften Lar-

ven zu nutzen. Die Messung der Stängelhärte, die einen eindeutigen signifikanten Zusammenhang zur Resistenz aufwies, ist allerdings ebenso wie die Ausbringung von Larven mit einem hohen Zeitaufwand verbunden und bietet sich daher als einfaches und schnelles Selektionsmerkmal nicht uneingeschränkt an. Unter ökonomischen Aspekten würde eine Selektion per NIRS-Analyse die aussichtsreichste Methode darstellen. Weitere Referenzuntersuchungen unter Einbeziehung eines breiten Sorten- bzw. Linienspektrums wären für die Entwicklung einer Kalibration zur Bestimmung von Zellwandbestandteilen, Lignin und Verdaulichkeit hilfreich.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei den AssistentInnen K. FICKLER, S. GÖTZE und Ch. FESSL für die Mithilfe bei der Durchführung der Versuche und der aufwändigen Mess- und Analyseverfahren. Außerdem möchten wir uns bei der Fachhochschule Weihenstephan, Institut für Getränketechnologie für die tatkräftige Unterstützung bei den INSTRON Messungen bedanken. Die chemischen Analysen wären ohne die gute Zusammenarbeit mit der Technischen Universität München insbesondere Dr. M. FREY und Dr. S. GRÜN nicht möglich gewesen. Auch ihnen gilt unser Dank.

Literaturnachweis

- ALBRECHT, K.A., MARTIN, M.J., RUSSELL, W.A., WEDIN, W.F., BUXTON, D.R., (1986) Chemical and in vitro digestible dry matter composition of maize stalks after selection for stalk strength and stalk-rot resistance. *Crop Sci* 26:1051-1055
- ARCHER, T.L., SCHUSTER, G., PATRICK, C., CRONHOLM, G., BYNUM, E.D., MORRISON, W.P., (2000) Whorl and stalk damage by European and Southwestern corn borers to four events of *Bacillus thuringiensis* transgenic maize. *Crop Prot* 19:181-190
- ARGILLIER, O., BARRIÈRE, Y., LILA, M., JEANNETEAU, F., GÉLINET, K., MÉNANTEAU, V., (1996) Genotypic variation in phenolic components of cell-walls in relation to the digestibility of maize stalks. *Agronomie* 16:123-130
- BARRIÈRE, Y., GUILLET, C., GOFFNER, D., PICHON, M., (2003) Genetic variation and breeding strategies for improved cell wall digestibility in annual forage crops. A review. *Anim Res* 52:136

- BERGVINSON DJ, ARNASON JT, HAMILTON RI, MIHM JA, JEWELL DC (1994a) Determining leaf toughness and its role in maize resistance to the European corn borer (*Lepidoptera*: Pyralidae). *J Econ Ent* 87:1743-1748
- BERGVINSON, D.J., ARNASON, J.T., MIHM, J.A., JEWELL, D.C. (1994b) Phytochemical basis for multiple borer resistance in maize. In: *Insect Resistant Maize: Recent Advances and Utilization*. Proceedings of the international symposium. Mexico, D.F. CIMMYT, CIMMYT
- BERGVINSON, D.J., ARNASON, J.T., HAMILTON, R.I. (1997) Phytochemical changes during recurrent selection for resistance to the European corn borer. *Crop Sci* 37:1567-1572
- BOHN, M., KREPS, R., KLEIN, D., MELCHINGER, A.E. (1998) Wann lohnt die Zünslerbekämpfung? Resistenzniveau, Ertragsreduktion und ökonomische Schadensschwelle des europäischen Maiszünslers. *Mais* 26:150-152
- BOHN, M., SCHULZ, B., KREPS, R., KLEIN, D., MELCHINGER, A.E. (2000) QTL mapping for resistance against the European corn borer (*Ostrinia nubilalis* H.) in early maturing European dent germplasm. *Theor Appl Genet* 101:907-917
- DE BOEVER, J.L., COTTYN, B.G., WAINMAN, F.W., VANACKER, J.M. (1986) The use of an enzymatic technique to predict digestibility, metabolizable and net energy of compound feedstuffs for ruminants. *Anim. Feed Sci Technol* 14:203-214
- BUENDGEN, M.R., COORS, J.G., GROMBACHER, A.W., RUSSELL, W.A. (1990) European corn borer resistance and cell wall composition of three maize populations. *Crop Sci* 30:505-510
- BUXTON, D., REDFEARN, D., JUNG, H., MERTENS, D. (1996) Improving forage-quality-related characteristics of maize. pp 23-28. In: *Proceedings with dairy and forage industries*. U.S. Dairy forage research center, Madison, WI.
- ESTRUCH, J.J., CAROZZI, N.B., DESAI, N., WARREN, G.W., DUCK, N.B., KOZIEL, M.G. (1997) The expression of a synthetic CryIA(b) gene in transgenic maize confers resistance to European corn borer. In: *Insect Resistant Maize, Recent Advances and Utilization*. Proc. Int. Symp. on Methodologies for Developing Host Plant Resistance to maize Insects, 27 Nov.-3 Dec., 1994, 172-174. Cimmyt, Mexico DF.
- FLINT-GARCIA, S., MCMULLEN, M., DARRAH, L., HIBBARD, B. (2002) Phenotypic and marker-assisted selection for stalk strength and second-generation European corn borer resistance. *Maize Genetic Conference Abstracts* 44: P157
- GROH, S., KHAIRALLAH, M.M., GONZÁLEZ-DE-LÉON, D., WILLCOX, M., JIANG, C., HOISINGTON, D.A., MELCHINGER, A.E., (1998) Comparison of QTLs mapped in RILs and their test-cross progenies of tropical maize for insect resistance and agronomic traits. *Plant Breeding* 117:193-202
- KJELDHAL, J., (1883) Neue Methode zur Bestimmung des Stickstoffs in organischen Körpern. *Z Anal Chem* 22:366-382
- KOZIEL, M.G., BELAND, G.L., BOWMAN, C., CAROZZI, N.B., CRENSHAW, R., CROSSLAND, L., DAWSON, J., DESAI, N., HILL, M., KADWELL S., LAUNIS, K., LEWIS, K., MADDOX, D., MCPHERSON, K., MEGHJI, M.R., MERLIN, E., RHODES, R., WARREN G.W., WRIGHT, M., EVOLA, S.V., (1993) Field performance of elite transgenic maize plants expressing an insecticidal protein derived from *Bacillus thuringiensis*. *Biotechnology* 11:194-200.
- KREPS, R.C., GUMBER, R.K., SCHULZ, B., KLEIN, D., MELCHINGER, A.E., (1998) Genetic variation in testcrosses of European maize inbreds for resistance to the European corn borer and relations to line per se performance. *Plant Breeding* 117:319-327
- KREPS, R.C., GUMBER, R.K., SCHULZ, B., KLEIN, D., MELCHINGER, A.E., (1997) Züchterisch-genetische Untersuchungen zur Zünsler-Resistenz im Europäischen Maiszuchtmaterial. 48. Arbeitstagung der Arbeitsgemeinschaft der Saatzuchtleiter, S. 61-68.
- LUFF, G., SCHOORL, W., (1929) *Chem Weekbl* 26, 130
- MAGG, T., MELCHINGER, A.E., KLEIN, D., BOHN, M., (2001) Comparison of Bt maize hybrids with their non-transgenic counterparts and commercial varieties for resistance to European corn borer and for agronomic traits. *Plant Breeding* 120:397-403
- MARTIN, S., HIBBARD, B., DARRAH, L., (2001) Effect of stalk strength as measured by rind penetrometer resistance on European corn borer damage and yield. http://iapreview.ars.usda.gov/research/publications/publications.htm?SEQ_NO__115=121444&pf=1
- NAUMANN, C., BASSLER, R., Die chemische Untersuchung von Futtermitteln. Loseblatt-Ausgabe, Handbuch der landwirtschaftlichen Versuchs- und Untersuchungsmethodik 3. VDLUFA-Verlag, Darmstadt
- PAPST, C., MELCHINGER, A.E., EDER, J., SCHULZ, B., KLEIN, D., BOHN, M., (2001) QTL mapping for resistance to European corn borer (*Ostrinia nubilalis* Hb.) in early maturing European dent maize (*Zea mays* L.) germplasm and comparison of genomic regions for resistance across two populations of F3 families. *Maydica* 46:195-205
- UTZ, H.F., (2001) PLABSTAT Version 2P. A computer program for statistical analyses of plant breeding experiments. Institute of Plant Breeding Seed Science, and Population Genetics. Univ. of Hohenheim, Stuttgart, Germany
- VIERECK, A., (1981) Der Einfluss der Gewebehärte auf die Resistenz von Maisgenotypen gegen den Maiszünsler *Ostrinia nubilalis* Hbn. Dissertation Stuttgart-Hohenheim, Germany