

## SCHWEFEL

*Schwefel-induzierte Resistenz (SIR)***Ein Dünger, der Pflanzen gesund erhält**

Dr. Elke Bloem, Dr. Silvia Haneklaus, Prof. Dr. mult. Ewald Schnug, Julius Kühn-Institut, Braunschweig



Kann eine gezielte Schwefeldüngung tatsächlich den Pilzbefall bei Raps mindern?

*Eine gezielte Schwefeldüngung kann die Resistenz verschiedener Nutzpflanzen gegenüber Pilzkrankheiten erhöhen.*

**D**ie fungizide Wirkung von Elementarschwefel auf Pilze, insbesondere auf Mehltau und Rost, ist bereits seit Beginn des 19. Jahrhunderts bekannt. Neben dieser wahrscheinlich direkten Toxizität des Elementarschwefels, hat die Versorgung mit dem Nährstoff Schwefel einen signifikanten Einfluss auf die natürliche Resistenz von Kulturpflanzen gegenüber Pilzen. Hierbei ist es möglich, dass eine Schwefelversorgung, die über den physiologischen Bedarf zum Erreichen der standortspezifischen Produktivität hinausgeht, den Befall mit pilzlichen Pathogenen reduzieren kann. Bereits in den 80er Jahren führte die Koinzidenz

von Schwefelmangel und dem vermehrten Auftreten pilzlicher Erkrankungen zu dieser Schlussfolgerung.

Zahlreiche Düngungsversuche zeigten seither, dass eine Sulfatdüngung zum Boden den Pathogenbefall bei verschiedenen Pflanzen signifikant reduzieren kann. Prof. Ewald Schnug vom Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde (JKI) prägte den Begriff der „Schwefel-induzierten Resistenz“ (SIR). In den folgenden Jahren fanden sich immer mehr Hinweise, die diese These belegten. Für zahlreiche Kulturen wurde ein solcher positiver Einfluss beschrieben (Tab. 1). Heute bleibt lediglich die Frage offen, ob eine gezielte Schwefeldüngung als kostengünstige und

## Schwefel sorgt für den richtigen Duft

Schwefelmangel hat viele Folgen. Er reduziert nicht nur den Ertrag, auch die Produktqualität bleibt oft auf der Strecke. Darüber hinaus zeigen sich zuweilen negative Auswirkungen auf die N-Ausnutzung der betroffenen Pflanzen. Die wohl spektakulärste Folge von Schwefelmangel sind wohl die Veränderungen in Blütenfarbe, -form und -größe bei Raps (s. auch LOP 1/2 2012).

Neuere Untersuchungsergebnisse, die mit einer elektronischen Nase aufgezeichnet wurden, haben jedoch gezeigt, dass sich auch der Duft von Blütenpflanzen mit der Schwefelversorgung signifikant verändert (Bloem et al.,

2010). Bislang wurden mehr als 700 verschiedene Metabolite in unterschiedlichen Düften entdeckt, allein beim Raps finden sich 34 verschiedene Verbindungen.

Bei Brassicaceen, wie Raps und Senf, ist vermutlich die Abnahme der schwefelhaltigen Glucosinolat-Abbauprodukte bei S-Mangel mit verantwortlich für die Veränderungen im Duftmuster. Aber auch bei glucosinolfreien Kulturen, wie z.B. Kamille, veränderte sich dieses. Welche chemischen Komponenten in diesem Falle verantwortlich sind und wie der Einfluss auf blütenbesuchende Insekten ist, ist noch ungeklärt.

Relevant sind diese Erkenntnisse auf jeden Fall, hängt doch der Duft einer Blü-

tenpflanze maßgeblich mit deren Attraktivität für blütenbesuchende Insekten zusammen. Somit beeinflusst die Schwefelversorgung vermutlich auch die Biodiversität im Feld. Düngungsversuche zu Raps haben beispielsweise ergeben, dass viele gängige Rapsschädlinge wie der Rapsglanzkäfer als Spezialisten, die an hohe Glucosinolatgehalte angepasst sind, durch eine gute Schwefelversorgung gefördert werden. Andererseits werden Generalisten, wie Vertreter der Blumen- und Taufiegen (*Delia platura*, *Scaptomyza flava*), entweder nicht oder negativ beeinflusst (Haneklaus et al., 2009).

Wirt	Krankheit	Pathogen
Getreide	Hexenbesenkrankheit	<i>Sclerophthora macrospora</i>
	Gelb- oder Streifenrost	<i>Puccinia striiformis</i>
	Echter Getreidemehltau	<i>Erisiphe graminis</i>
	Scharfer Augenfleck	<i>Rhizoctonia cerealis</i>
	Getreideschwarzrost	<i>Puccinia graminis</i>
Mais	Drechslera Blattfleckenkrankheit	<i>Bipolaris maydis</i>
Raps	Rapsschwärze	<i>Alternaria brassicae</i>
	Wurzelhals und Stängelfäule	<i>Leptosphaeria maculans</i>
	Graufleckenkrankheit	<i>Pyrenopeziza brassicae</i>
	Rapskrebs	<i>Sclerotinia sclerotiorum</i>
	Verticilliumwelke	<i>Verticillium dahliae</i>
Kartoffel	Schwarzbeinigkeit	<i>Erwinia carotovora</i>
	Kartoffelschorf	<i>Streptomyces scabies</i>
	Kraut und Knollenfäule	<i>Phytophthora infestans</i>
	Wurzeltöterkrankheit	<i>Rhizoctonia solani</i>
Zuckerrübe	Ramularia Blattflecken	<i>Ramularia beticola</i>
Tomate	Fusariumwelke	<i>Fusarium oxysporum</i>
	Verticilliumwelke	<i>Verticillium dahliae</i>

**Tab. 1:** Kulturen und Krankheiten, für die ein positiver Einfluss der Schwefelversorgung auf den Krankheitsbefall beschrieben wurde (Auszug aus Haneklaus et al., 2007).

umweltfreundliche Pflanzenschutzmaßnahme in der Praxis Potential hat.

### Zahlen und Potentiale

Wie stark dieser Einfluss ist, zeigen verschiedene Versuche. In Feldversuchen mit

Kartoffeln konnte gezeigt werden, dass eine Schwefeldüngung zum Boden einen signifikanten Effekt auf die Infektionsrate und Schwere des Befalls mit *Rhizoctonia solani* aufwies. Die Infektionsrate der Kartoffeln sank um 41 % und die Schwere des

Befalls um 29 %, wenn Schwefel im Form von Sulfat zum Boden gedüngt wurde.

In Gewächshausversuchen unter kontrollierten Bedingungen konnte ebenfalls ein positiver Effekt der Schwefelversorgung auf den Pathogenbefall verschiedener Kulturen gezeigt werden. So senkte eine Schwefeldüngung den Befall von Raps mit *Sclerotinia sclerotiorum* signifikant. Dasselbe galt in Bezug auf *Bipolaris maydis* bei Mais, *Rhizoctonia cerealis* bei Winterweizen und auf *Verticillium dahliae* bei Baumwolle.

Die Potentiale der Schwefel-induzierten Resistenz sind hoch. Als Reduktion des Befallsindex ausgedrückt, ist sie je nach Wirt/Pathogen-Beziehung für 5–50 % weniger Pilzbefall im Gefäßversuch sowie 17–35 % in Feldversuchen verantwortlich. Bei letzteren blieben allerdings manchmal auch die erwarteten Effekte aus. Es ist bis heute Thema der aktuellen Forschung, wie sich eine gesteigerte Pathogenresistenz konsequent durch Schwefeldüngung induzieren lässt. Die bislang erzielten Ergebnisse sind in verschiedenen Übersichtsbeiträgen zusammengetragen und diskutiert (z.B. Bloem et al., 2007; Haneklaus et al., 2007).

### —Viele Prozesse gleichzeitig

Ziel der Untersuchungen war es auch, den Einfluss einzelner schwefelhaltiger Stoffwechselprodukte (Metabolite) in der Pflanze auf deren Abwehrmechanismen zu quantifizieren.

Es kommen verschiedene Schwefel-Metabolite infrage, die eine fungizide Wirkung aufweisen. Unter anderem könnten sekundäre Inhaltsstoffe wie Phytoalexine oder Glucosinolate sowie das Antioxidans Glutathion für die Interaktion zwischen Schwefel und dem Pathogen verantwortlich sein. Aber auch die Freisetzung gasförmiger schwefelhaltiger Verbindungen, wie Schwefelwasserstoff ( $H_2S$ ), könnte dabei eine Rolle spielen.

Viele Verbindungen aus dem Schwefelmetabolismus der Pflanze werden von der Schwefelversorgung beeinflusst. Um herauszufinden, welche Metaboliten maßgeblich für die höhere Resistenz bei Pilzbefall verantwortlich sind, wurden

diese in Abhängigkeit von der Schwefelversorgung, aber auch von einer pilzlichen Infektion, untersucht (Tab. 2).

Die Gehalte aller untersuchten schwefelhaltigen Metabolite stiegen nach einer Düngung signifikant an.

Auch die Infektion mit pilzlichen Erregern spiegelte sich deutlich in den Gehalten wider. Pathogenbefall führte beispielsweise zu einem Anstieg der schwefelhaltigen Aminosäure Cystein. Diese zentrale Verbindung im Schwefelmetabolismus wurde offensichtlich infolge des Pathogenbefalls aktiviert.

Die Freisetzung gasförmiger schwefelhaltiger Metabolite wie Schwefelwasserstoff ( $H_2S$ ) und Carbonylsulfid (COS) über die Spaltöffnungen der Blätter könnte eine wichtige Rolle in der Pathogenabwehr spielen. Schwefelwasserstoff, von vielen mit dem Geruch nach faulen Eiern in Verbindung gebracht, ist erst in sehr hohen Konzentrationen für den Menschen

toxisch. Viele Literaturhinweise bescheinigen ihm aber in wesentlich niedrigeren Mengen auch eine fungizide Wirkung. Die vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass Wein- und Sommerrapspflanzen nach einer Pilzinfektion viel mehr  $H_2S$  freisetzen als zuvor. Im Falle von COS findet sogar ein Wechsel von einer Aufnahme des Metabolits bei gesunden Pflanzen zu einer Freisetzung bei befallenen Pflanzen statt.

Einzig die Glutathionkonzentration sank im Fall einer Pilzinfektion. Vermutlich steht dies mit der Pathogenabwehr in direktem Zusammenhang.

Zusammenfassend gesagt: Viele Untersuchungen bescheinigen die positiven Effekte einer Schwefeldüngung auf den Pathogenbefall. Welche Veränderungen im Metabolismus aber konkret dafür verantwortlich sind, konnte noch nicht vollständig geklärt werden. Vermutlich wirken aber viele Prozesse, die für den Pilzbefall bedeutend sind, gleichzeitig (Tab. 2).

S-haltige Metabolite	Kultur/Organ	Anstieg mit S-Düngung je 10 kg S/ha
Cystein	WR zum Schossen/ Blatt	0.08 – 0.09 $\mu\text{mol/g TS}$
Cystein	Knoblauch zur Ernte/ Zehe	0.05 $\mu\text{mol/g TS}$
$\gamma$ -GC	WR zum Schossen/ Blatt	0.04 $\mu\text{mol/g TS}$
Glutathion	WR zum Schossen/ Blatt	0.07 – 1.76 $\mu\text{mol/g TS}$
Alliin	Knoblauch zur Ernte/ Zehe	1.20 $\text{mg/g TS}$
Glucosinolate	WR zur Ernte / Samen	0.60 $\mu\text{mol/g TS}$
	Kapuzinerkresse zur Blüte/ Blatt	4.30 $\mu\text{mol/g TS}$
H <sub>2</sub> S	WR zu Beginn der Blüte <sup>1</sup>	6.62 – 11.09 $\text{pg/g TS} \times \text{min}$
	WR zum Schossen <sup>2</sup>	7.90 $\text{pg/g TS} \times \text{min}$
COS	WR zum Schossen <sup>2</sup>	133.80 $\text{pg/g TS} \times \text{min}$
Maximaler Anstieg nach Infektion		
Cystein	WR zum Schossen infiziert mit <i>Pyrenopeziza brassicae</i> / Blatt	0.27 – 0.45 $\mu\text{mol/g TS}$
Glutathion	WR zum Schossen infiziert mit <i>Pyrenopeziza brassicae</i> / Blatt	-0.60 – -0.90 $\mu\text{mol/g TS}$
H <sub>2</sub> S	Wein (10-12 Blattstadium) infiziert mit <i>Uncinula necator</i>	140 $\text{pg/g TS} \times \text{min}$
H <sub>2</sub> S	SR zum Schossen infiziert mit <i>S. sclerotiorum</i>	1764 $\text{pg/g TS} \times \text{min}$
COS	SR zum Schossen infiziert mit <i>S. sclerotiorum</i>	1270 $\text{pg/g TS} \times \text{min}$

<sup>1</sup> Die Freisetzung von H<sub>2</sub>S wurde aus der intakten Pflanze im Feld bestimmt. <sup>2</sup> Die Freisetzung von H<sub>2</sub>S und COS wurde aus der intakten Pflanze im Gefäßversuch bestimmt; WR = Winterraps; SR = Sommerraps

**Tab. 2:** Einfluss der Schwefeldüngung und der Infektion mit pilzlichen Erregern auf die Gehalte an schwefelhaltigen Metaboliten in unterschiedlichen Kulturpflanzen.



### –Fazit

Die dargestellten Ergebnisse zeigen die Interaktionen zwischen Schwefelversorgung und Resistenz gegenüber Pathogenen. Sie verdeutlichen besonders, wie komplex die Mechanismen der Schwefel-induzierten Resistenz sind. Es ist eine Herausforderung diese aufzuklären und in Düngungsempfehlungen zu übersetzen. Besonders im organischen Landbau sind alternative Strategien gefragt, welche die Pflanzengesundheit ohne Chemie steigern. Hier hat die Schwefeldüngung als alternativer Pflanzenschutz ein großes Potential. Aber auch in der konventionellen Landwirtschaft könnte eine optimierte Schwefeldüngung zur Einsparung von Fungiziden beitragen. ■

Im Gefäßversuch werden unter anderem flüchtige gasförmige Schwefelverbindungen wie Schwefelwasserstoff oder Carbonylsulfid (COS) quantifiziert.