

Berichte über Landwirtschaft

Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft

Herausgegeben vom Bundesministerium für Ernährung,
Landwirtschaft und Verbraucherschutz

Kohlhammer

Ansätze für eine effizientere Nutzung des Phosphors auf der Basis experimenteller Befunde

Von WILHELM RÖMER, Göttingen

1 Kurzer historischer Abriss zur Phosphatdüngerproduktion

Bereits 1828 hat CARL SPRENGEL in den ersten universitären Vorlesungen zur Agrikulturchemie in Deutschland (Göttingen) den Phosphor (P) als unentbehrliches Nährelement charakterisiert (45). JUSTUS VON LIEBIG (31) hat dann mit seinem Buch: „Die organische Chemie in ihrer Anwendung auf Agricultur und Physiologie“ die Mineralstofftheorie in die Welt hinaus getragen. Er selbst hat Pflanzen mit Knochenmehlen gedüngt und am Misserfolg gelernt, dass die schwerlöslichen Ca-Phosphate der Knochen erst mit Mineralsäuren in Lösung gebracht werden müssen, bevor Pflanzen das Phosphat aufnehmen können.

Aus solchen Erkenntnissen entstanden dann 1843 in England und 1855 in Deutschland weltweit die ersten Superphosphatfabriken (vgl. 42). Die Förderung von Rohphosphaten für die Herstellung von Phosphatdüngern stieg dann kontinuierlich an, lag um 1900 aber weltweit noch deutlich unter 5 Mio. t (Abb. 1). Etwa um 1985 erreichte die jährliche weltweite Produktion ca. 160 Mio. t. Seitdem zeichnet sich eine Abnahme der Produktion ab, deren Prognose bis 2050 in der Abbildung 1 dargestellt wird (vgl. auch 56).

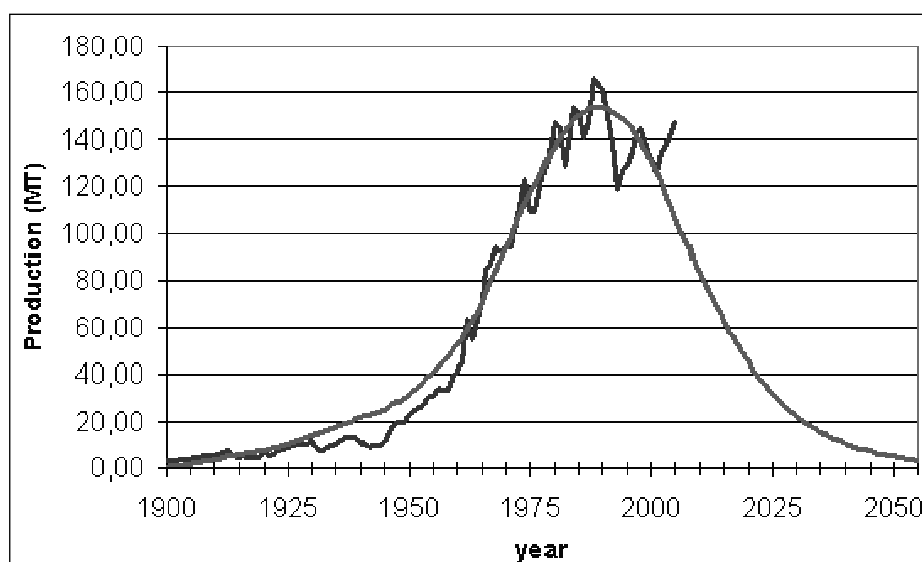


Abb. 1. Welt-Rohphosphatproduktion (gezackte Linie: Ist-Werte; durchgezogene Linie: Errechneter Kurvenverlauf)

Quelle: (nach 16)

Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die derzeitige jährliche Produktion der Länder mit nennenswerten Rohphosphatvorkommen und deren Reserven wieder. Im Mittel aller 16 zitierten Länder reichen die Vorräte, die bei den gegenwärtigen Bedingungen (Technologien, Kosten etc.) abgebaut werden können, noch ca. 120 Jahre.

Tabelle 1. Weltproduktion von Rohphosphat, die Weltreserve sowie die Basisreserve (in Mio. t)

	Weltproduktion		Reserve ¹⁾	Basisreserve ²⁾
	2005	2006		
United States	36,3	30,7	1 200	3 400
Australia	2,0	2,0	77	1 200
Brazil	6,1	5,5	260	370
Canada	1,0	1,0	25	200
China	30,4	32,0	6 600	13 000
Egypt	2,7	2,7	100	760
Israel	2,9	3,0	180	800
Jordan	6,2	6,4	900	1 700
Morocco and Western Sahara	25,2	25,3	5 700	21 000
Russia	11,0	11,0	200	1 000
Senegal	1,5	1,5	50	160
South Africa	2,6	2,6	1 500	2 500
Syria	3,5	3,6	100	800
Togo	1,2	1,2	30	60
Tunisia	8,0	8,4	100	600
Other countries	6,5	6,7	890	2 200
Welt insgesamt (rd.)	147,0	145,0	18 000	50 000

1) Reserve: Es ist der Teil der Basisreserve der ökonomisch abgebaut bzw. produziert werden kann zu den Bedingungen seiner Erfassung.

2) Basisreserve: Es ist der Teil der identifizierten Ressourcen, die minimalen spezifischen physikalischen und chemischen Kriterien in Bezug auf die gegenwärtige Bergbau- und die Produktionspraxis erfüllen und zwar einschließlich jener für die Qualität, Stärke und Tiefe.

Quelle: (nach 52)

In manchen Ländern sind die Vorräte aber deutlich früher erschöpft (z. B. in Russland in ca. 20 Jahren, in den USA in ca. 40 Jahren). Der Rückgang in den USA von 2005 bis 2006 ist bereits auf die Schließung (Erschöpfung) von Minen zurückzuführen. Die Gesamtvorräte, für die minimale Forderungen an die Qualität gestellt werden, sind natürlich viel größer (offenbar ca. 3-mal so groß). Aber ob und wie sie einmal genutzt werden können ist vorerst offen. Angesichts dieser Perspektive kommt also in einem historisch verhältnismäßig kurzen Zeitraum ein weiteres Nahrungsmittelproblem besonderer Art auf die Menschheit zu, denn Phosphor ist ein essenzielles Nährelement für Pflanzen, Tiere und Menschen. Es kann durch kein anderes chemisches Element ersetzt werden.

Bereits heute (2) leben auf der Erde ca. 6 730 Milliarden Menschen. Ihre Zahl wächst jährlich um 82 Millionen. Schon gegenwärtig sind 923 Millionen nicht ausreichend ernährt (19). Wenn auch sozialpolitische Gegebenheiten eine wesentliche Ursache für das Hungerproblem darstellen, so kann sich das Hungerproblem durch eine Verknappung von Nährstoffen insbesondere in der Pflanzenproduktion weiter verschärfen.

Fest steht bereits jetzt, dass die Preise für Rohphosphate bzw. P-Dünger weltweit deutlich gestiegen sind. Dem FERTECON Phosphate Report vom 31. Januar 2008 (20) ist zu entnehmen, dass die Preise für Tripelsuperphosphat (TSP) sowie Diammoniumphosphat (DAP) zwischen 1995 und 2004 nahezu konstant waren (150–200 US \$/t). Danach stiegen die Preise sowohl in Nord-Afrika als auch in den USA kontinuierlich auf 200–270 US \$/t und im Jahr 2008 (März) explosionsartig auf über 800 US \$/t an. Die Inlandpreise in Deutschland wuchsen für P-haltige Dünger adäquat.

Daraus ergibt sich zwangsweise die Aufgabe für die Landwirte, rationeller mit der Ressource Phosphatdünger umzugehen, denn 80% der Rohphosphate werden zu Mineraldünger und 5% zu Futterphosphaten verarbeitet und verbraucht (12). In diesem Zusammenhang stellt sich folglich die Frage, ob das derzeitige Phosphatdüngungssystem unter dem Eindruck der neuen Gegebenheiten noch optimal ist.

2 Phosphatdüngung in Deutschland

Zur allgemeinen Erinnerung sei gesagt, dass E. A. MITSCHERLICH „Das Gesetz des Minimums und das Gesetz des abnehmenden Bodenertrages“ 1909 veröffentlichte (32). In diesem fundamentalen Artikel wurde erstmals der mathematische, also naturwissenschaftlich exakte Zusammenhang zwischen Nährstoffangebot und Pflanzenertrag dargestellt. Die Abbildung 2 demonstriert diesen Zusammenhang für das Phosphatangebot (in P_2O_5) und den Haferertrag. Diese Ergebnisse wurden zur Basis der Bodenuntersuchung und Düngerbedarfsermittlung in den vergangenen Jahrzehnten.

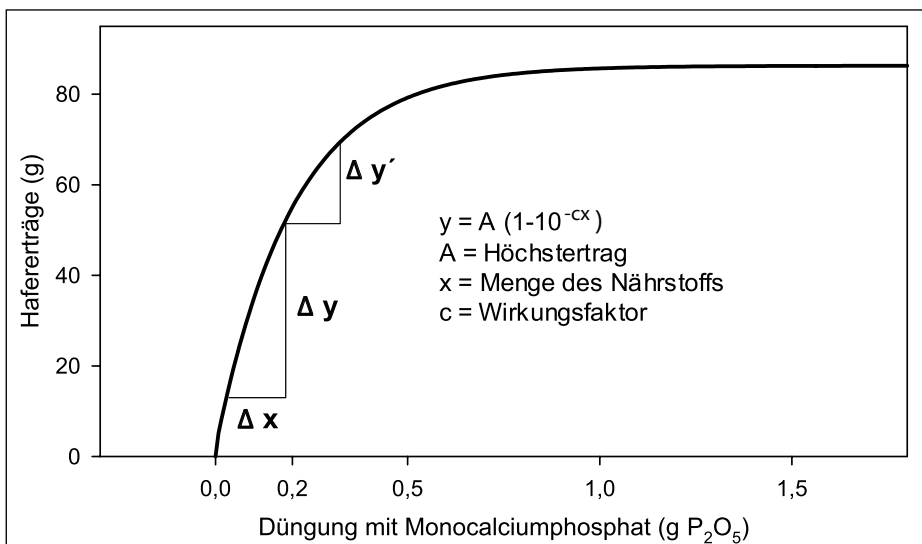


Abb. 2. Abhängigkeit des Haferertrages (Korn, Stroh, Wurzeln) von der Phosphatgabe im Gefäßversuch mit Quarzsand

Quelle: (auszugsweise nach 32)

Daraus ergibt sich die Frage, ob es der Agrikulturchemie/Pflanzenernährung in den vergangenen nun fast 100 Jahren gelungen ist, ein optimales P-Düngungssystem zu erarbeiten. Der vorläufig letzte Stand der Düngungsempfehlungen ergibt sich aus dem VDLUFA-Standpunkt zur Phosphordüngung von 1997 (vgl. 27). Dementsprechend werden alle Böden nach ihren leichtlöslichen, sprich lactatlöslichen P-Gehalten, in die Gehaltsklassen A bis E eingestuft.

Die Definition und Düngungsempfehlung gibt Tabelle 2 wieder.

Tabelle 2. Definition der P-Gehaltsklassen für den leichtlöslichen (pflanzenverfügbaren) Phosphor im Boden und P-Düngungsempfehlungen

Gehaltsklasse (GK)	Kurzdefinition
A	<p><u>Sehr niedriger Gehalt</u> Düngungsempfehlung: stark erhöhte Düngung gegenüber der Empfehlung in GK „C“ Düngewirkung auf Ertrag hoher Mehrertrag auf Boden Gehalt im Boden steigt deutlich an</p>
B	<p><u>Niedriger Gehalt</u> Düngungsempfehlung: erhöhte Düngung gegenüber der Empfehlung in GK „C“ Düngewirkung auf Ertrag mittlerer Mehrertrag auf Boden Gehalt im Boden steigt an</p>
C	<p><u>Anzustrebender Gehalt</u> Düngungsempfehlung: Erhaltungsdüngung in der Regel nach P-Abfuhr Düngewirkung auf Ertrag geringer Mehrertrag auf Boden Gehalt im Boden bleibt erhalten</p>
D	<p><u>Hoher Gehalt</u> Düngungsempfehlung: verminderte Düngung gegenüber der Empfehlung in GK „C“ Düngewirkung auf Ertrag Mehrertrag meist nur bei Blattfrüchten auf Boden Gehalt im Boden nimmt ab</p>
E	<p><u>Sehr hoher Gehalt</u> Düngungsempfehlung: keine Düngung Düngewirkung auf Ertrag keine auf Boden Gehalt im Boden nimmt ab</p>

Quelle: (nach 53)

Die den Gehaltsklassen zugeordneten lactatlöslichen Bodengehalte stehen in Tabelle 3.

Tabelle 3. Vorschlag von Richtwerten für die Gehaltsklassen A bis E nach der CAL-Methode

P-Gehaltsklasse	Gehalt	mg P/100 g Boden
A	sehr niedrig	≤ 2,0
B	niedrig	2,1–4,4
C	anzustreben	4,5–9
D	hoch	9,1–15
E	sehr hoch	≥ 15,1

Quelle: (nach 27)

Werden nun die ca. 12 Mio. ha Ackerland in Deutschland (D) nach diesem Schema beurteilt, so ergeben sich für die Mitte dieses Jahrzehnts die Werte in Tabelle 4. Das bedeutet, dass 79% des Ackerlandes in Deutschland die angestrebten bzw. deutlich höheren P-Gehalte aufweisen. Das bedeutet insgesamt gesehen ein sehr hohes Phosphatpotenzial in den Böden.

Tabelle 4. Relative Anteile der Gehaltsklassen A bis E für Phosphor auf dem Ackerland in Deutschland

Gehaltsklasse	Ackerland
E	12
D	29
C	38
B	18
A	3

Quelle: (57)

Auf die Frage, ob dieses vorgehaltene Potenzial tatsächlich für eine hohe Pflanzenproduktion nötig ist, wird später zurückzukommen sein. Betrachtet man diese Werte (Tab. 4) für Deutschland im europäischen Kontext (vgl. Abb. 3), so zeigt sich, dass auch andere Staaten wie Österreich und Frankreich einen ähnlichen Versorgungsgrad ihrer Böden besitzen. In stark Tier haltenden Ländern wie Dänemark und der Niederlanden ist die P-Versorgung noch deutlich höher als in Deutschland. Wenn auch die Eingruppierung der Böden in den einzelnen Ländern beträchtlich variiert (andere Extraktionsmethoden, Grenzwerte etc.), so scheint sich insgesamt abzuzeichnen, dass die Anteile unterversorgter, also P-armer Böden, in der Mehrzahl der Länder nur bei ca. 5% liegen.

In den meisten Böden Europas (70–80%) liegen also mittlere bis sehr hohe Boden-P-Gehalte vor. Dass von diesen Böden auch negative Auswirkungen auf die Umwelt ausgehen (Eutrophierung der Gewässer bis hin zu den angrenzenden Meeresteilen), ist bekannt und soll hier nicht thematisiert werden (3; 4; 30; 35).

Zu thematisieren sind aber die vom VDLUFA vorgeschlagenen Richtwerte für die Gehaltsklassen und die dazu vorgegebenen Düngungsstrategien. Von vorrangigem Interesse ist die Abgrenzung der Gehaltsklasse C, deren P-Gehalte anzustreben sind. Dabei ist der untere Grenzwert besonders bedeutsam, denn er beinhaltet die Grenzkonzentration ab

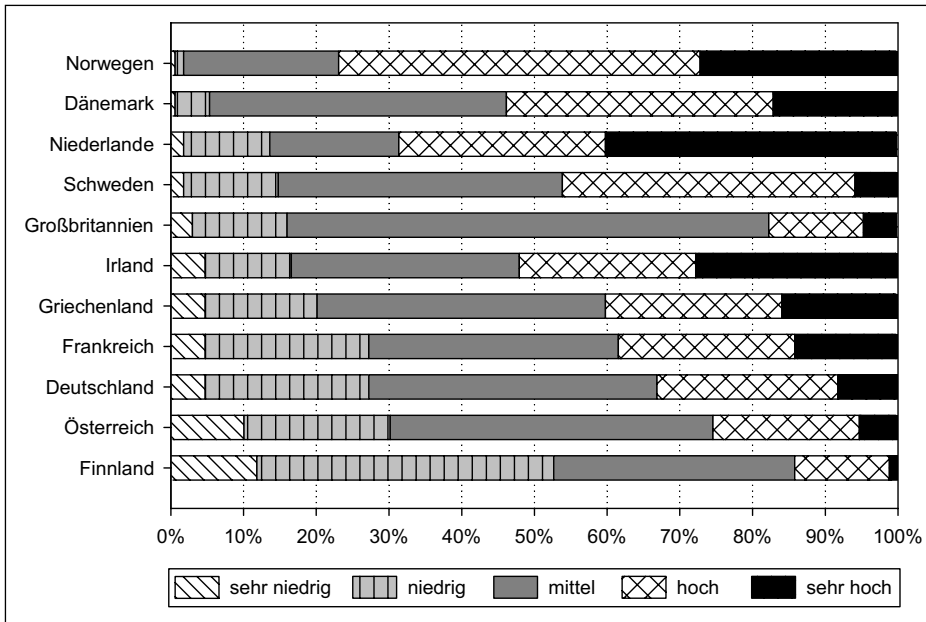


Abb. 3. Phosphorstatus der Böden in Europa

Quelle: (nach 1 bzw. 17)

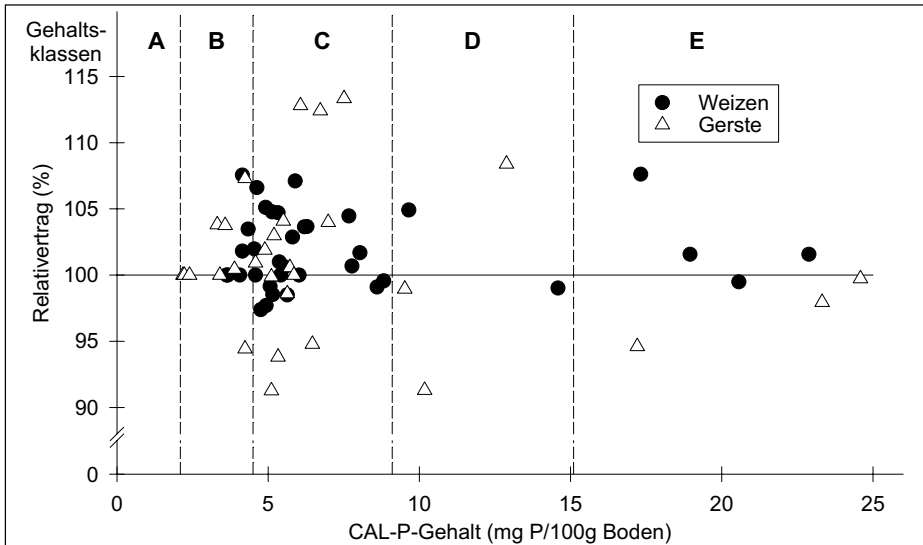


Abb. 4. Beziehung zwischen dem CAL-P-Gehalt des Bodens und dem Relativvertrag von Winterweizen und Wintergerste (Erträge der P₀-Variante = 100%), Reinshof 1983–2003

Quelle: (nach 37).

der Mindererträge auftreten, da keine ausreichende P-Versorgung gegeben ist. Nun gibt es einige aktuellere Resultate von längerfristigen Feldversuchen bei ganz unterschiedlichen Böden und klimatischen Gegebenheiten. Abbildung 4 gibt die relativen Erträge von

Winterweizen und Wintergerste aus einem 20-jährigen P-Steigerungsversuch auf einem schweren Aue-Boden der Leineniederung bei Göttingen wieder.

Die Abbildung 4 zeigt, dass nach 20 Jahren die ungedüngten Parzellen gerade die Gehaltsgrenze A/B erreicht haben. Bei etwa 4 mg P/100 g Boden erbrachte der Winterweizen durch P-Düngung Mehrerträge von 0–7%, die Wintergersten von 0–4%. Solche Mehrerträge sind bei vier Wiederholungen im Feldversuch statistisch nicht zu sichern.

Die Tabelle 5 zeigt die mittleren Erträge an Zuckerrüben und deren Bereinigte Zucker-gehalte aus 6 Anbaujahren (1988–2003) in Abhängigkeit von der P-Düngung (P0 = ohne P, P1 = 1-facher Ersatz der jährlichen P-Abfuhr (27 kg P/ha), P1,5 bzw. P3 sowie P9 = 1,5- bzw. 3- und 9-facher Ersatz der P-Abfuhr (vgl. hierzu 36). Die gesteigerten P-Gaben hatten keinen signifikanten Einfluss auf Ertrag und sog. Bereinigten Zuckerertrag (BZE).

Tabelle 5. Einfluss der jährlichen P-Gabe auf den Bereinigten Zuckerertrag (BZE) (absolut und relativ) in den Anbaujahren 1988 bis 2003 (Absoluterträge der P0-Variante = 100 %)

Variante	1988	1991	1994	1997	2000	2003	Mittel
P 0 dt/ha	80	86	97	114	110	119	101
P 0 relativ	100	100	100	100	100	100	100
P 1	97	112*	108	99	109*	109	105
P 1,5	102	106	96	101	112*	110	104
P 3	97	111*	93	103	114*	113*	105
P 9	93	101	95	98	109*	107	100

*Bei GD 5% signifikant unterschiedlich zur Kontrolle (P0)

Quelle: (36)

Interessant ist das Ergebnis der Tabelle 6 in der die sich ändernden P-Gehalte der ungedüngten Parzellen und deren absoluten Bereinigten Zuckererträge (BZE) wiedergegeben sind. Während also in 18 Jahren die P-Gehalte von ca. 5 mg P auf ca. 2 mg P/100 g Boden gesunken sind, stiegen die BZE um ca. 50% an.

Tabelle 6. Änderungen der CAL-P-Gehalte auf den ungedüngten Parzellen von 1987 bis 2005 und der auf diesen Parzellen geernteten Bereinigten Zuckererträge (BZE)

Jahr	CAL-P-Gehalte	Jahr	BZE
	mg P/100 g Boden		dt/ha
1987 (a)	4,2	1988	80
1990	2,8	1991	86
1993	4,6	1994	97
1996	2,2	1997	114
1999	2,3	2000	110
2002	2,4	2003	119

(a) 1983 (zu Versuchsbeginn); 5–7 mg CAL-P/100 g

Quelle: (36)

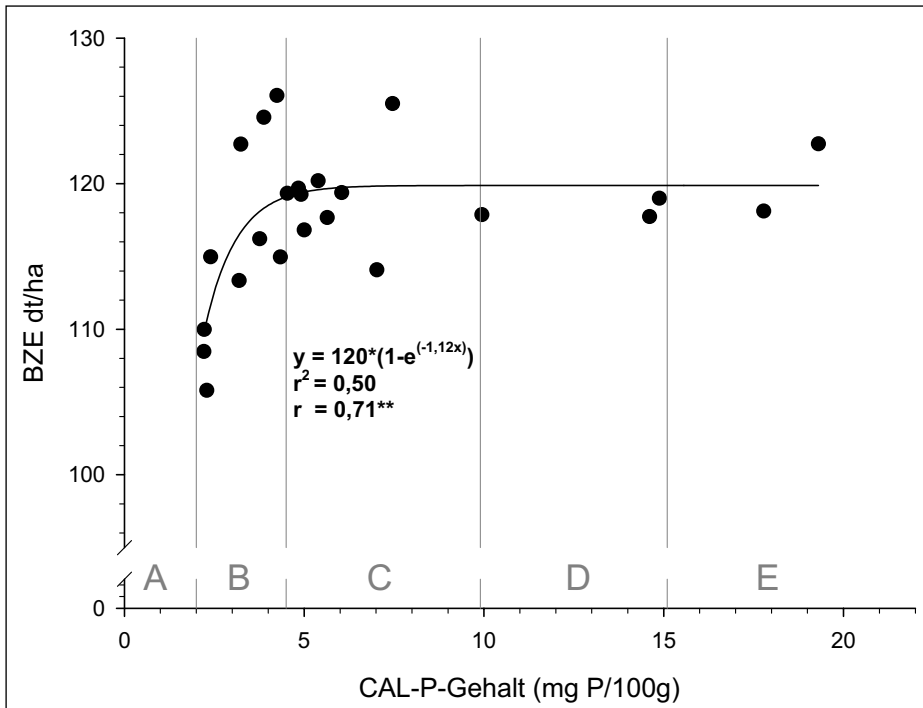


Abb. 5. Abhängigkeit des BZE im Jahre 2000 vom CAL-P-Gehalt des Bodens im Herbst 1999

Quelle: (nach 34)

Ohne Zweifel ist das ein Resultat des Züchtungsfortschrittes. Die neuen Sorten sind also nicht nur ertragsstärker, sondern auch nährstoffeffizienter. Das bekannte Argument, Sorten mit höheren Erträgen erfordern auch ein höheres Nährstoffangebot stimmt also nicht.

Abbildung 5 zeigt beispielhaft die Erträge an BZE in Abhängigkeit vom Boden-P-Gehalt auf diesem Standort aus dem Jahr 2000. Man erkennt, dass nur im engen Bereich der Gehaltsklasse B ein Zusammenhang zwischen Boden-P-Gehalt und BZE besteht. Man könnte auch sagen, oberhalb von 4 mg P/100 g Boden hat der Boden-CAL-P-Gehalt keinen Einfluss auf den Ertrag. Ein grundsätzlich gleiches Resultat erzielte BAUMGÄTEL (5) ebenfalls in Niedersachsen. Dort sank in der ungedüngten Variante der CAL-P-Gehalt innerhalb von 23 Jahren von 11 auf 4 mg P/100 g Boden ab. Die Getreideeinheiten-(GE)-Mehrerträge durch P-Düngung lagen in diesem Zeitraum für alle drei Kulturen Winterweizen (WW), Wintergerste (WG) und Zuckerrübe (ZR) zwischen ca. 0,3–2%. Auch in den folgenden Jahren bis 2004 zeigten WW und WG bei 4 mg P/100 g Boden durch eine P-Düngung (von 60–180 kg P₂O₅/ha) keinen Düngungseffekt in Form von Mehrerträgen.

Offenbar reichen auch 60 kg P₂O₅/ha zur Erreichung des Höchstertes bei den Zuckerrüben aus. Das Ergebnis ist dem Resultat aus der Leineau bei Göttingen adäquat. Also auch in diesen Feldversuchen reichen zumindest die 4 mg P/100 g Boden und eine P-Zufuhr in Höhe der Abfuhr völlig.

Die P-Steigerungsversuche auf drei Sandstandorten (Kreis Soltau-Fallingbostel, nördlich von Hannover, Niedersachsen) ergaben die Resultate der Abbildung 6 (vgl. 43; 61).

Für die 19 Versuchsjahre ist kein Trend zu erkennen, dass etwa die Erträge bei einer P-Düngung ansteigen, wenn die P-Gehalte von 14 mg P/100 g Boden bis auf 4,5 mg P/100 g

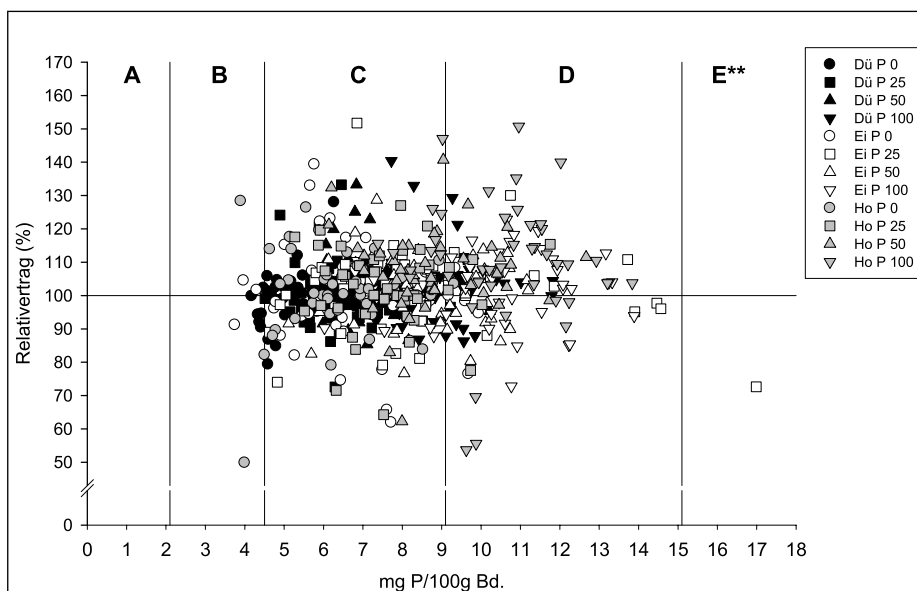


Abb. 6. Relativverträge* in Abhängigkeit vom (DL-)P-Gehalt des Bodens im Vorjahr auf drei Sandstandorten (Düshorn, Eickeloh, Hodenhagen) bei jeweils vier unterschiedlichen Düngungsstufen, 1989–2007 (* bezogen auf den Kornertrag bzw. den Knollenertrag der P-ungefügten Variante, P 0 = 100 %; ** P-Gehaltsklassen)

Quelle: (RÖMER, CLAASSEN und HILMER bisher unveröffentlicht; nach 27)

Boden absinken. Man sieht nur eine Punktwolke zwischen den P-Gehalten von 4,5–14 mg P/100 g Boden. Dabei gibt es nahezu gleich viele Ertragswerte über als auch unter der 100 %-Linie. Das bedeutet, dass die Erträge in diesem Versorgungsbereich unabhängig vom Bodengehalt sind. Es gibt keinen deutlichen Ertragsanstieg mit steigendem CAL-P-Gehalt. Das gilt auch bei getrennter Betrachtung für die Zuckerrübe, die auf dem Standort Düshorn viermal angebaut wurde (nicht separat dargestellt).

In Bayern wurden in den vergangenen Jahren auf acht Standorten P-Düngungsversuche durchgeführt (24; 25). Durch anfänglich deutlich gestaffelte P-Gaben (1. Phase) wurden in den Böden P-Gehalte von ca. 2 bis 50 mg P_2O_5 (0,9 bis ca. 22 mg P/100 g Boden) eingestellt. In Abbildung 7 erkennt man, dass erst unterhalb von ca. 10 mg P_2O_5 (= 4,4 mg P) ein Ertragszuwachs durch P-Düngung um ca. 2 dt GE eintritt.

In der 2. Phase (Abb. 8) in der jeweils auf allen Parzellen die P-Abfuhr durch Düngung ersetzt wurde, ergaben sich im Mittel aller 8 Orte und Jahre Erträge von 80,3 bis 80,8 dt GE und zwar bei Bodengehalten von 6,9 mg P_2O_5 (= 3,0 mg P) bis 15,8 mg P_2O_5 (= 7,0 mg P). In Auswertung ihrer langfristigen acht Feldversuche kommen HEGE et al. (24) zu dem Schluss: „Eine höhere Versorgung als Gehaltsklasse B, d. h. 5–9 mg P_2O_5 /100 g Boden bzw. 2–4 mg P/100 g Boden, hat bei Abfuhrdüngung nur in Ausnahmefällen zu signifikanten Mehrerträgen geführt.“

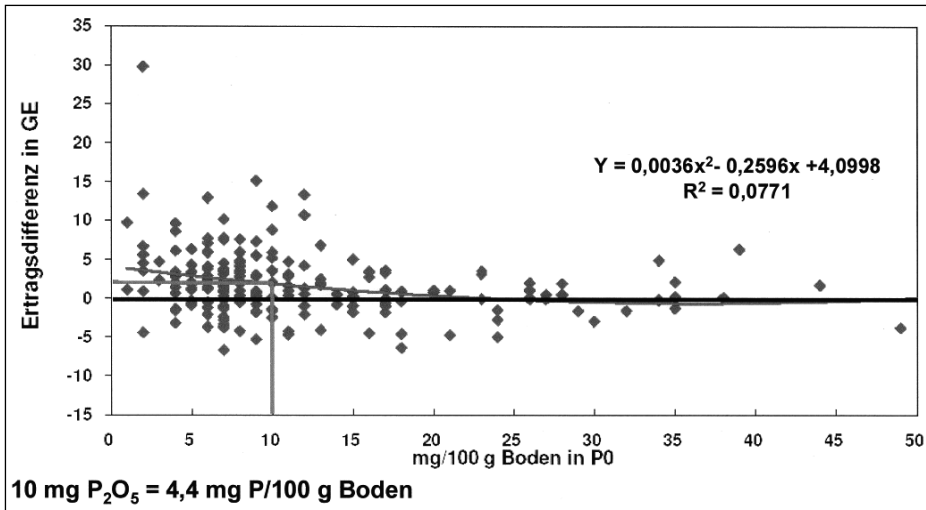


Abb. 7. Ertragsdifferenz in GE von 50 kg/60 kg P₂O₅/ha* gegenüber ohne P-Düngung in Abhängigkeit von der Boden-P-Versorgung bei P0 (1. Versuchsphase)

Quelle: (nach 24; 25)

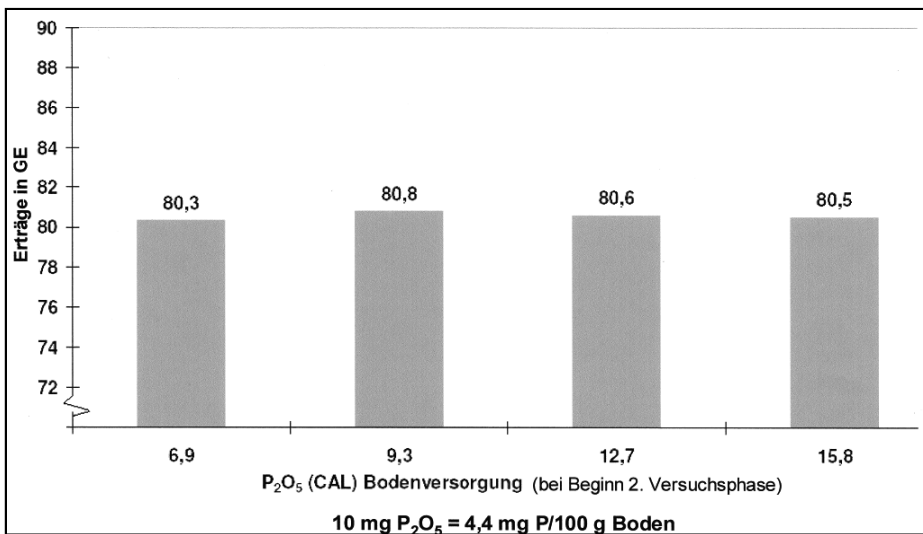


Abb. 8. Erträge in Abhängigkeit von der Boden-P-Versorgung, Mittelwert aller Orte und Jahre; 2. Phase nach Abzug der Spezialkosten (1 mg P₂O₅-Anhebung = 150 kg P₂O₅, 1 kg P₂O₅ = 0,55 Euro, Zinsabschreibung 6%, 1 GE = 15 €)

Quelle: (nach 24; 25)

Wenn in Niedersachsen 4 mg und in Bayern 2–4 mg lactatlöslicher P/100 g Boden für hohe Erträge ausreichen und höhere P-Gehalte keine ökonomisch relevanten Mehrerträge erbringen, so kann vermutet werden, dass das auch in anderen Regionen Deutschlands der Fall sein kann. Bereits im VDLUFA-Standpunkt von 1997 (53) wird dargelegt: „Werte $\geq 4,5$ mg P bzw. 10 mg P₂O₅/100 g Boden genügen dagegen fast immer, um bei Erhal-

tungsdüngung den optimalen Ertrag zu erzielen.“ Warum dann die Gehaltsklasse C bis 9 mg P gehen soll und in Gehaltsklasse D noch ein P-Düngung empfohlen wird, bleibt das Geheimnis der Autorengruppe, denn an anderer Stelle heißt es eindeutig: „In den Gehaltsklassen D und E enthält der Boden unnötig viel Phosphat.“

Aus den Angaben der Tabelle 7 geht hervor, dass zur Anhebung des Boden-P-Gehaltes um 1 mg/100 g Boden ca. 100 kg P/ha über den Pflanzenentzug hinaus ausgebracht werden müssen. Für die Differenz zwischen 4 und 9 mg P/100 g Boden wären also 500 kg P/ha nötig. Diese P-Menge entspricht etwa der P-Abfuhr von ca. 20 Ernten!

Tabelle 7. Düngermengen (kg P/ha) zusätzlich zum Pflanzenentzug zur Erhöhung des Gehaltes an DL-löslichem Phosphat im Boden um 1 mg je 100 g Boden

Boden	bei DL-P-Gehalten kleiner 3,5 mg P/100 g Boden	bei DL-P-Gehalten 3,5–7 mg P/100 g Boden
	kg P/ha	kg P/ha
Sandböden	100	82
SI / IS	120	92
SL / sL	100	96
L / ST / T	136	106
Löss-Schwarzerde (nach 29)	80	100
im Mittel	100	95
3 Sandböden im Raum Walsrode, Niedersachsen ¹⁾	–	125

¹⁾ nach RÖMER, CLAASSEN und HILMER bisher unveröffentlicht

Quelle: (nach 28; 29)

Bei dem innerhalb des vergangenen Jahres (2008) um den Faktor 3 teurer gewordenen Düngerphosphors, wäre das eine enorme finanzielle Belastung der Betriebe mit der trüben Aussicht, dass kein sicherer finanzieller Gewinn durch entsprechende Mehrerträge zu erzielen sein wird. Die zu ziehende Schlussfolgerung kann nur lauten: Die VDLUFA-Richtwerte bedürfen dringend einer Neubewertung. Dass auf einigen besonderen Böden, (wie z. B. Gneis- oder Raseneisensteinverwitterungsböden im Erzgebirge bzw. nahe der Ostseeküste u. a. (persönliche Mitteilung von L. SUNTHEIM, Leipzig, bzw. R. KUCHENBUCH, Rostock), durchaus höhere P-Aufwendungen als im Mittel aller Böden nötig sind, darf nicht dazu führen, dass allgemein verbindliche Richtwerte so hoch vorgegeben werden, wie die derzeitig noch empfohlenen.

Dabei wird die Bodenuntersuchung zur Feststellung aktueller Phosphor-Gehalte auch weiterhin gebraucht um:

- I. die Flächen zu finden, die geringere P-Gehalte als ca. 2 mg P aufweisen, denn auf ihnen sind mit hoher Wahrscheinlichkeit Mehrerträge zu erreichen;
- II. Flächen mit sehr hohen P-Gehalten zu identifizieren, wenn sie ein Risiko für die Umwelt darstellen. Für diese wenigen Funktionen ist eine Kategorisierung von Böden nach fünf Gehaltsklassen vermutlich gar nicht notwendig.

Wenn die Einordnung der Böden nach ihrem Phosphorstadium in Europa so erfolgt ist, wie das Vorgehen in Deutschland, so hätte natürlich jedes Land gegenüber seinen Landwirten die Pflicht, seine Grenzwerte ebenfalls zu überprüfen. Insgesamt betrachtet kann es also sein, dass der reale Bedarf an Düngephosphor in weiten Teilen Europas niedriger sein dürfte als sich aus offiziellen Statistiken ergibt.

3 Potenziale des P-Recyclings in Deutschland

Das Wissen um die Verknappung der Weltvorräte an Rohphosphat – einerseits der P-Bedarf zur Ernährung von Pflanzen, Tieren und andererseits der des Menschen – hat inzwischen auch die Regierung in Deutschland und die verantwortlichen Stellen der EU in Brüssel erreicht. Als eine zu erschließende P-Quelle wird das Phosphatrecycling von P-haltigen Abfällen etc. gesehen. Bereits 2004 starteten das BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) und das BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) eine gemeinsame Förderinitiative, um Pflanzennährstoffe, insbesondere Phosphor in Abfallstoffen dem Recycling zuzuführen (vgl. 11).

Der Hintergrund ist, dass in Deutschland jährlich ca. 2,4 Mio. t Trockenmasse (TM) Klärschlämme (KS) anfallen (47), die bei ca. 2 % P-Gehalt etwas 48 000 t Phosphor enthalten (41). 2003 wurden davon nur ca. 33 % landwirtschaftlich verwertet, aber bereits 38 % thermisch entsorgt (Mono- und Mitverbrennung), 3 % gelangten auf Deponien und 26 % in den Landschaftsbau. In Zukunft könnte die Mitverbrennung von KS auf 71 % des Gesamtanfalles steigen (41, S. 20).

Einige Bundesländer haben bereits die Klärschlammdeponierung gänzlich eingestellt. Hintergründe dafür sind die Bemühungen, die Böden vor einem weiteren möglichen Eintrag von verschiedensten Schadstoffen zu schützen. Die aus den genannten Gründen erforderliche Novellierung der Klärschlammverordnung ist in Vorbereitung. Eine diesbezügliche Anhörung aller interessierten Verbände und Einrichtungen fand im Dezember 2006 in Bonn statt. In Anbetracht einer wahrscheinlichen Verschärfung von Grenzwerten für Schadstoffe (8) wird folglich der Einsatz von Klärschlamm als Düngemittel weiter sinken. Damit stellt sich aber die Frage nach der möglichen Rückgewinnung des wertvollen Nährelementes Phosphor aus den Klärschlämmen in dringlicher Form.

Eine weitere wichtige Quelle bilden die gegenwärtig pro Jahr anfallenden 2,4 Mio. t Schlachtnebenprodukte und ca. 415 000 t gefallene Tiere aus der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung (49). Die daraus u. a. hergestellten 400 000 t Tiermehle enthalten bei ca. 3 % P etwa 12 000 t P, die 160 000 t Fleischknochenmehle enthalten bei ca. 6 % P etwa 9600 t P.

Die Gesamt-P-Menge der je Jahr anfallenden Klärschlämme sowie der Tier- und Fleischknochenmehle beträgt somit ca. 69 600 t P. Dem steht ein jährlicher Aufwand (2003/2004) an P-Mineraldünger von 108 000 t P gegenüber (46). Bei einer theoretischen Rückgewinnungsquote von 90 % könnten also nahezu 60 % des derzeitigen Mineraldünger-P-Einsatzes durch neue P-Düngemittel aus dem P-Recycling ersetzt werden.

Seitens der Forschung – gleichsam auch bereits im Pilotmaßstab der Industrie – gibt es intensive Bemühungen den Phosphor aus den genannten Abfällen sowie weiteren Quellen zurückzugewinnen. Der Interessent findet die entsprechenden Resultate u. a. in den Berichten einschlägiger Tagungen (z. B. 9; 15; 50).

Eine grobe Übersicht über Technologien zur Nährstoffabtrennung aus verschiedenen P-haltigen Abfällen sowie die möglichen Endprodukte, die als neuartige P-Dünger auf die Landwirtschaft zukommen können, findet man bei SCHAUM (41) und RÖMER (38). Bei Letzterem sind auch die Resultate eines vergleichenden agronomischen Tests zur P-Lieferbereitschaft von insgesamt 26 sowohl chemisch reinen Substanzen, als auch herkömmlichen

P-Mineraldüngern und aus dem P-Recycling stammenden P-Verbindungen wiedergegeben (vgl. Tab. 8).

Tabelle 8. Relative P-Aufnahme von Roggenkeimpflanzen (21 Tage alt), ermittelt in einem Kleingefäßversuch mit Quarzsand als Substrat

P-Verbindung	P-Gehalt	Wasserlöslichkeit	Relative P-Aufnahme
	(%)	(%)	(%)
Triplesuperphosphat	20,0	93	100
Hyperphosphat	13,5	0	16
Thomasphosphat	5,8	0	44
Struvit (Wasserwerke Berlin)	10,2	2	114
Struvit (Klärwerk Heilbronn)	13,7	2	127
Produkte des P-Recyclings von Klärschlamm, Seaborne-Verfahren (vgl. 54)			
P-Dünger mit Mg-Phosphat	11,1	1	112
P-Dünger mit Ca-Phosphat	9,7	0	64
P-Dünger mit Fe-Phosphat	9,7	0	13
GD _{5% Tukey}			24

Quelle: (auszugsweise nach 38)

Dabei schnitten Struvit ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$) und andere Mg-Phosphatfällungsprodukte im Vergleich zu Superphosphaten sehr gut ab, während Fe-Fällungsprodukte eine ungenügende P-Lieferbereitschaft zeigten.

Neueste Resultate z. B. über das P-Recycling von Klärschlammaschen sind über www.susan.bam.de abrufbar. Die agronomische Prüfung der Produkte ist noch nicht abgeschlossen. Über weitere laufende Forschungs- und Pilotprojekte in Deutschland findet man Informationen im Internet des BMU (10).

4 Die P-Aufnahmeeffizienz der Kulturpflanzen und ihre Veränderbarkeit

4.1 P-Verfügbarkeit im Boden

Wird eine definierte N-Menge in Form von Nitrat ausgebracht, so steigt die Nitratkonzentration der Bodenlösung um nahezu die gleiche Nitratmenge an, die ausgebracht wurde. Die unspezifische Anionensorption der meisten Ackerböden für Nitrationen ist gering. Der spezifischen Anionensorption unterliegt das Nitration nicht.

Beim Phosphatanion ist die Situation völlig anders. Eisen-/Aluminiumoxidhydrate und Tonmineraloberflächen haben eine sehr hohe Affinität zum Phosphatanion, das infolgedessen in Form mono- bzw. binuklearer Komplexe (44) gebunden wird. Hinzu kommt, dass freie Ca^{2+} -Ionen insbesondere bei neutraler und basischer Bodenreaktion Phosphatanionen fällen. Es entstehen sekundäre bzw. tertiäre Ca-Phosphate, Oktocalciumphosphate sowie letztendlich apatitische Strukturen. Die Löslichkeit nimmt in der genannten Reihenfolge ab.

Alle diese P-Formen sowie der organisch gebundene Phosphor der festen Bodenphase befinden sich in der Bodenlösung im Gleichgewicht mit der Konzentration an gelöstem Phosphat. Letzteres ist aber wegen der genannten intensiven Bindungen des Phosphates sehr gering (bei Ackerböden in 0–30 cm Tiefe: <1 mg P/l nach 55). Das bedeutet, dass selbst in Böden der Gehaltsklasse C oder D nur einige 100 g P/ha in der Ackerkrume frei verfügbar sind. Bei 0,1 mg P/Liter, einer Bodentiefe von 25 cm und einem Wassergehalt von 18 % sind nur 60 g P/ha in der Krume frei verfügbar (30).

4.2 P-Aufnahme der Pflanzen

Getreidepflanzen nehmen jedoch bei Erträgen von 80 dt Korn ca. 25 kg P/ha in etwa 120 Tagen auf. Das ist nur möglich, weil die Wurzeln mit ihren aktiven Aufnahmemechanismen die Löslichkeit beeinflussen und Phosphatanionen aus der Bodenlösung aufnehmen. Das Absenken der P-Konzentration an der Wurzeloberfläche führt zu einem Phosphat-Diffusionsprozess zur Wurzel hin. Verarmt die Bodenlösung, so geht Phosphat aus der festen Bodenphase in Lösung (Desorption, Salzauflösung) und die P-Konzentration bleibt weitestgehend aufrecht erhalten (P-Pufferung).

Trotz des im Boden sehr kleinen Diffusionskoeffizienten von 10^{-9} bis 10^{-10} cm^2/s (55; 61) und einem effektiven Diffusionsweg von nur ca. 1–2 mm (ca. Länge der Wurzelhaare) vermögen die Pflanzen während einer Vegetationsperiode 25 kg P/ha aufzunehmen. Für diese Leistung ist ein riesiges unterirdisches Wurzelsystem erforderlich, das die Pflanzen in kurzer Zeit aufbauen. Dieses hat pro Quadratmeter Bodenfläche z. B. bei Roggen rund 38 km Länge, bei Kartoffeln und Zuckerrüben etwa 26 km Länge. Daraus ergeben sich auch verschiedene Wurzellängendichten pro Kubikzentimeter Boden in 0–15 cm Tiefe. Bei Getreide sind dies 12,5 cm/cm^3 Boden, bei Kartoffeln und Rüben nur 7–9 cm/cm^3 Boden (vgl. 61). Die Getreidepflanzen können also ein viel größeres Bodenvolumen erschließen als die anderen Kulturpflanzen. Die Ausführungen von CLAASSEN (13) zum Gesamtproblem der Nährstoffverfügbarkeit im Boden und des Nährstoffaneignungsvermögens der Pflanzen sind nach wie vor gültig.

4.3 Pflanzenarten mit besonderen P-Aneignungsmechanismen

Neben dem Getreide gibt es Kulturpflanzen, die ganz andere Mechanismen besitzen, um das Phosphat des Bodens nutzbar zu machen. Tabelle 9 zeigt ein Experiment mit Mais und Weißlupine, die jeweils auf einem P-armen und einem mit P gedüngten Boden angezogen wurden. Während der Mais auf die P-Düngung mit einer 3,7-fachen Erhöhung der P-Aufnahme und Verdopplung des Trockenmasseertrags reagierte, erhöhte die Weißlupine ihre P-Aufnahme nur um 30 %, wobei die Trockenmassebildung nahezu unverändert blieb. Hier wird deutlich, dass der Weißlupine das niedrige P-Angebot für ihre Ertragsbildung völlig ausreichte, dem Mais dagegen nicht. Deshalb muss eine Anbauplanung stets differenziert erfolgen.

Die Fähigkeit der Weißlupinenpflanzen, bei geringem P-Angebot ausreichende P-Mengen aufnehmen zu können, resultiert aus zwei Eigenschaften:

- I. Die Weißlupine besitzt sogenannte Proteoidwurzeln. d. h. einzelne Segmente der Wurzeln besitzen eine flaschenbürstenartige Anhäufung von ähnlich langen Seitenwurzeln, die den Boden räumlich sehr intensiv zu erschließen vermögen. Abbildung 9 zeigt diesen Wurzeltyp bei *Lupinus albus*, während die Schmalblättrige Lupine keine solchen Verzweigungen zeigt und die Gelblupine nur eine schwache Ausprägung für solch stark verzweigte Wurzeln aufweist.
- II. Aus diesen Proteoidwurzeln exsudieren die Pflanzen in bestimmten Entwicklungsstadien intensiv Citronensäure und Äpfelsäure (33).

Tabelle 9. Einfluss der P-Düngung auf TM-Ertrag und P-Entzug von Mais und Weißlupine auf einer P-fixierenden Roterde (Oxisol);

	Spross-TM		P-Entzug	
	g	rel.	mg	rel.
	<i>Mais</i>			
ohne P	5	100 a ¹⁾	6	100 a
mit P	13	236 b	22	366 b
	<i>Weißlupine</i>			
ohne P	7,4	100 a	20	100 a
mit P	7,6	103 a	26	130 b

¹⁾ unterschiedliche Buchstaben stehen für signifikante Unterschiede bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $p = 0,05$. Quelle: (39)

Exsudationsraten weiterer Kulturpflanzen sind in Tabelle 10 wiedergegeben. Deutlich wird die große Differenz zwischen den drei dikotylen Pflanzenarten und dem monokotylen Mais, dessen Säureausscheidung sehr gering ist. Man erkennt, dass aber bei allen Pflanzenarten bei P-Mangel die Exsudationsraten deutlich erhöht sind.

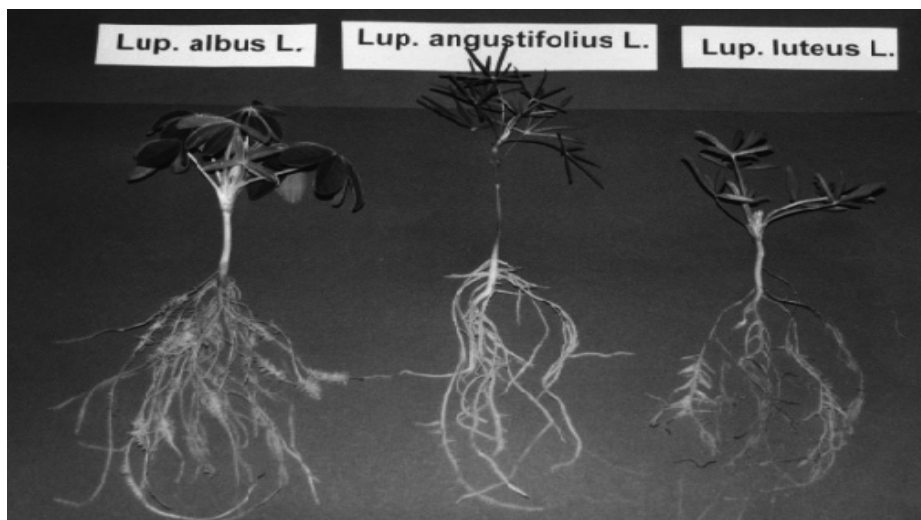


Abb. 9. Wurzelmorphologie bei drei Lupinenarten (*Lupinus albus* L., *Lupinus angustifolius* L., *Lupinus luteus* L.)

Quelle: (nach 18)

Tabelle 10. Exsudation von Oxalat und Citrat aus den Wurzeln von vier Kulturpflanzen bei variiertem P-Angebot

	Spinat		Zuckerrübe		Weißlupine		Mais	
	-P	+P	-P	+P	-P	+P	-P	+P
	nmol cm ⁻¹ h ⁻¹							
Oxalat	3,9	2,8	0,23	0,04	n. n.	n. n.	0,040	0,005
Citrat	1,0	0,7	0,04	0,01	0,32	0,15	0,020	0,015

Spinat (cv. Tabu) : 35 Tage alt

Mais (cv. Foria) : 20 Tage alt

Zuckerrübe (cv. Reka) : 20 Tage alt

Weißlupine (cv. Minori) : 21 Tage alt

n. n. = nicht nachweisbar

Quelle: (7; 26; 18).

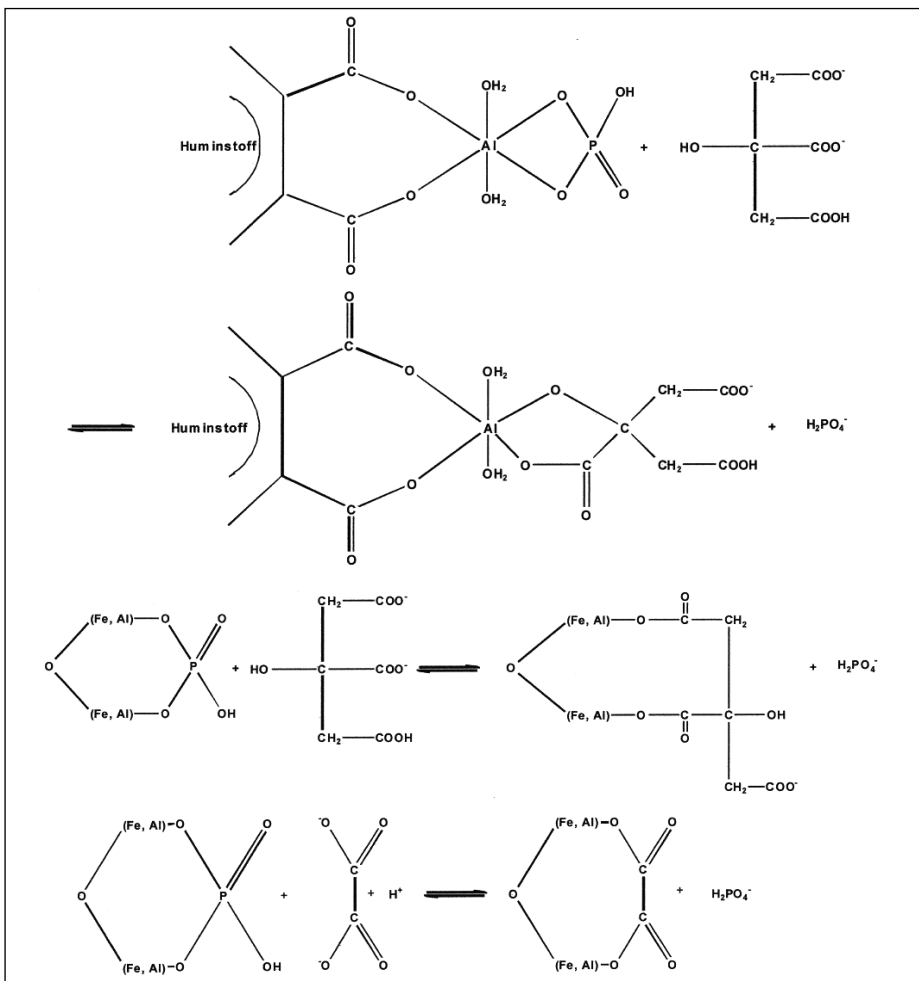


Abb. 10. Schematische Darstellung der Desorption von Phosphat durch Citrat bzw. Oxalat von Huminstoff-Al-Komplexen und von Fe/Al-Oxiden unter Beachtung des mittleren Protonierungsgrades der Citrat- und Phosphatanionen im pH-Bereich 4,5–6,0

Quelle: (nach 22)

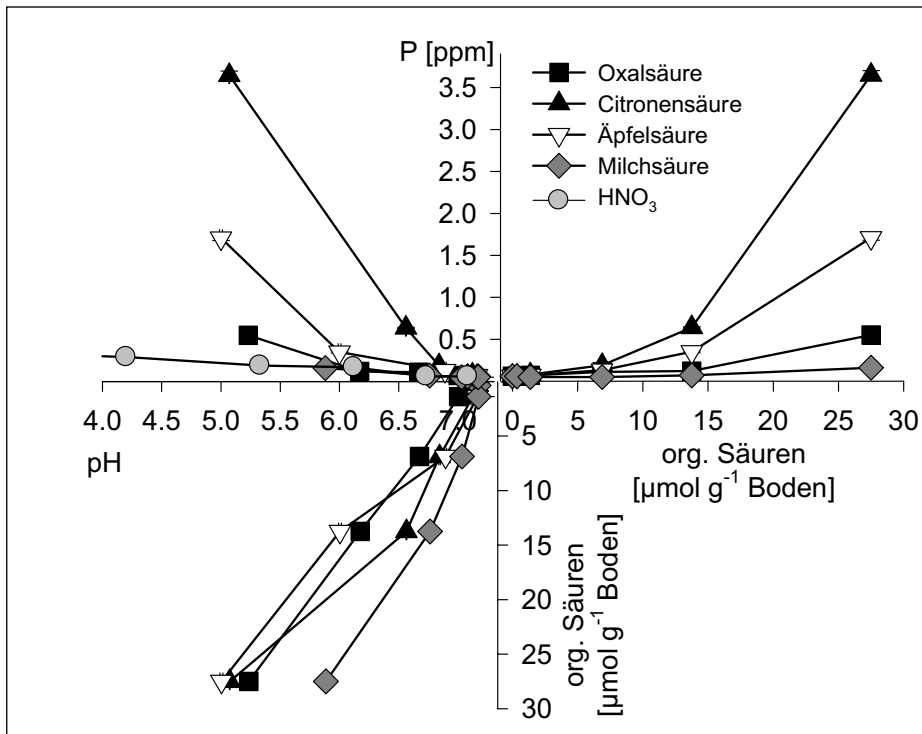


Abb. 11. P-Löslichkeit in einer Schüttellösung (16 g Boden : 40 ml Wasser) nach einer Zugabe verschiedener Mengen organischer Säuren zu einem Lösslehm Boden von pH 7,2 und einer Einwirkungsdauer von 6 Stunden bei ca. Feldkapazität

Quelle: (26).

Abbildung 10 vermittelt einen schematischen Eindruck, wie die mehrbasischen organischen Säuren Phosphationen durch Ligandenaustausch von der festen Bodenphase freisetzen.

Abbildung 11 zeigt, welchen quantitativen Effekt die einzelnen Säuren auf die P-Freisetzung haben können.

Aus dem Vergleich mit der applizierten Salpetersäure wird klar, dass es weniger der durch die Säurezugabe reduzierte pH-Wert ist, der zur Phosphatfreisetzung führt, als vielmehr der Ligandenaustausch mit den entsprechenden Anionen. Der Effekt der dreibasischen Zitronensäure ist am stärksten, gefolgt von dem der Äpfelsäure. Diese P-Mobilisierungseffekte waren auch in den P-Konzentrationsänderungen von Bodenlösungen im Pflanzenexperiment direkt nachweisbar (23).

4.4 Genetische Beeinflussung der P-Aufnahmeeffizienz

Das Prinzip der Exsudation von Zitronensäure (Citrat) in die Rhizosphäre verbunden mit P-Mobilisierung und Erhöhung der P-Aufnahme bildet einen Mechanismus, der in der Pflanzenzüchtung nutzbar ist. In Japan (51) ist es gelungen, das Citratsynthetase-Gen aus Mitochondrien der Möhre mittels Genföhre (*Agrobacterium* Plasmid) in Zellen von Eukalyptus einzubringen und erfolgreich zu exprimieren (Abb. 12). Die genetisch veränderten Eukalyptuspflanzen sind in der Lage, die Citratsynthetase-Aktivität je Einheit Protein um

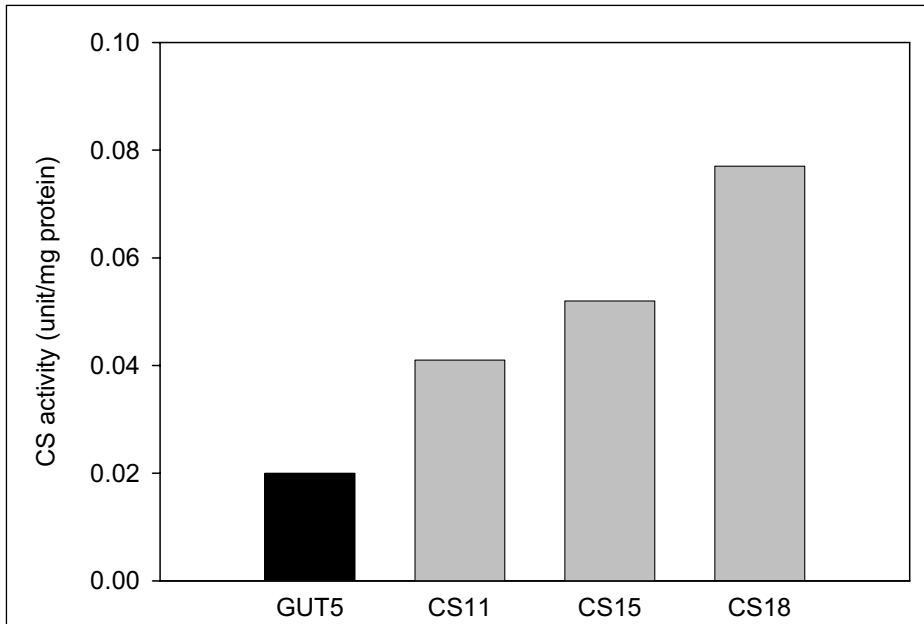


Abb. 12. Citrat-Synthase-Aktivität in Kontrollpflanzen (GUT5) und 3 verschiedenen transgenen Pflanzentypen (CS 11, CS 15, CS 18) von Eucalyptus

Quelle: (51).

den Faktor vier zu steigern, entsprechend mehr Citrat auszuscheiden und in der Folge mehr Phosphat aufzunehmen.

Unter Bedingungen stark verwitterter tropischer Böden mit hohem P-Sorptionsvermögen ist das ein Beispiel einer gelungenen Erhöhung der P-Aufnahmeeffizienz der Pflanzen, ohne dass extra Phosphat gedüngt werden müsste. Die Folge ist, dass das Phosphat, das ohnehin im Boden vorhanden ist, von den Pflanzen erheblich effizienter genutzt wird.

Bedenkt man, dass in Deutschland von 1960 bis 1990 jährlich mit einem P-Überschuss (aus Handelsdünger und Futterimporten) von 20–29 kg P/ha in den 90er-Jahren noch mit 5–10 kg P/ha Überschuss Pflanzenbau betrieben wurde, so haben sich in den Böden ca. 1000 kg P/ha angereichert (21; 57). Das ist ein Potenzial, das es zu nutzen gilt. Dafür werden allerdings P-effiziente Kulturpflanzen und -sorten gebraucht. Ein großer Teil dieser Phosphate muss ebenfalls wieder mobilisiert werden, da die über Jahrzehnte lang gealterten Phosphate im Boden weniger löslich sind als frisch gedüngte Phosphate (55).

Neben den anorganischen Phosphaten gilt es, auch das organisch gebundene Phosphat zur Ernährung der Pflanzen zu nutzen. Die Exsudation von Phytase ist aber bei höheren Pflanzen oft unbefriedigend, sodass die P-reiche Verbindung Phytat in der Rhizosphäre nur unzureichend genutzt wird. Eine Phytaseapplikation in den Böden kann zwar wirkungsvoll in Bezug auf die P-Mobilisierung von Phytat sein (6), aber der Preis ist sehr hoch. Bemerkenswert ist deshalb das Experiment von RICHARDSON et al. (34), das Phytase-Gen aus *Aspergillus niger* in *Trifolium subterraneum* (Bodenfrüchtiger Klee) zu transferieren. Letzterer kann Phytat-P gut nutzen und damit seinen P-Ernährungszustand verbessern.

Ein nachahmenswertes Beispiel aus der Pflanzenzüchtung ist die *markergestützte Züchtung* von P-effizienten Reissorten (58; 59; 60). Hier ging es darum, die ertragreiche japanische Reissorte „Nipponbare“, die P-ineffizient ist, mit der ertragsschwachen indischen

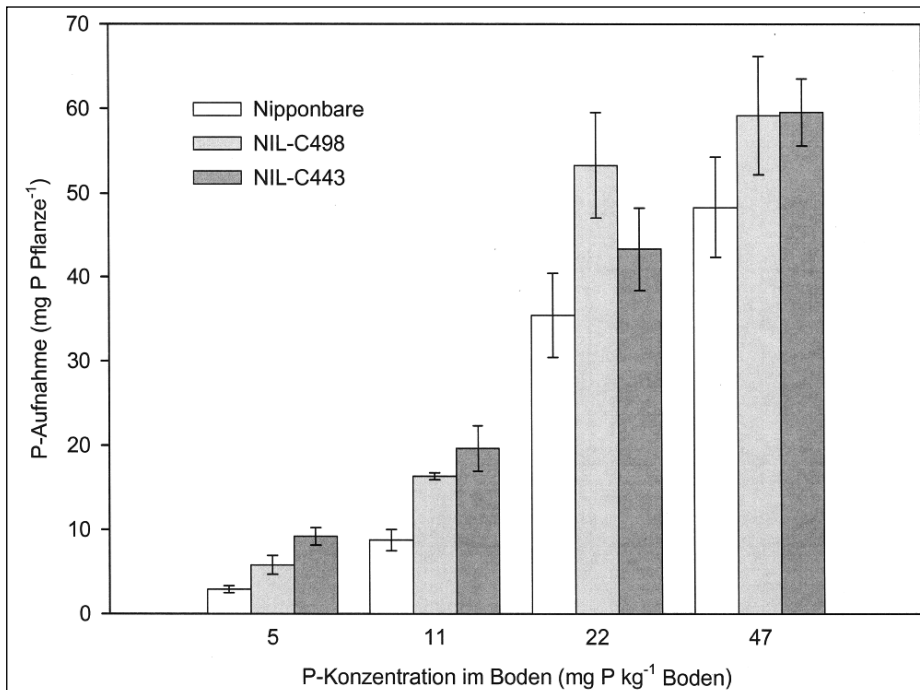


Abb. 13. Wirkung des Boden-P-Gehaltes (Bray-2) auf die P-Aufnahme der Sorte Nipponbare und zwei nahen isogenen Linien (NILs), die QTLs für hohe P-Aufnahme tragen

Quelle: (59)

Reissorte „Kosalath“, die ein hohes P-Aufnahmevermögen besitzt, zu kreuzen. Nachdem es den Autoren (60) gelungen war, die mutmaßlichen quantitativen Merkmalsorte (QTLs) für die P-Aufnahme auf den 12 in Frage kommenden Chromosomen zu identifizieren, konnten die entsprechenden markergestützten Kreuzungen erfolgen.

Die Abbildung 13 zeigt, dass sich bei hohem P-Angebot die ursprüngliche Sorte „Nipponbare“ in ihrer P-Aufnahme von den zwei nahen isogenen Linien (NILs) kaum unterscheiden. Aber bei geringem P-Angebot waren die Linien, die die Marker C 498 bzw. C 443 besaßen, der ursprünglichen japanischen Form deutlich überlegen. Damit wird klar, dass mit der Aufklärung der QTL für bestimmte Pflanzeigenschaften, hier der P-Aufnahme, eine zielgerichtete Erhöhung der P-Aufnahmeeffizienz auf züchterischem Wege möglich ist und zu leistungsfähigen Pflanzen führt.

4.5 Reserven bei der Züchtung auf Erhöhung der inneren P-Verwertung

Die Nutzung der Bodenphosphate und Düngerphosphate durch die Wurzeln der Pflanzen, also deren Aufnahmeeffizienz, ist jedoch nur eine Seite der erstrebten P-Effizienz. Die zweite ist die der inneren P-Verwertung der Pflanzen. Damit verbunden ist die Frage nach der Menge der zu erwartenden Ernteprodukte, die von den Pflanzen je Einheit aufgenommenes Phosphat gebildet werden. Eine wichtige Kenngröße ist deshalb das Synthesevermögen, ausgedrückt in kg TM/g P. Für Länder, die in großem Stil Getreide und

Leguminosensamen (z. B. Sojabohnen) exportieren, bedeutet das gleichzeitig einen Export von beträchtlichen Mengen an Phosphor, aber auch anderer Nährstoffe, aus den landwirtschaftlichen Flächen (Getreidekörner enthalten ca. 0,3 % P, Sojabohnen ca. 0,45 % P).

Für Importländer dagegen ist mit diesem Stoffstrom ein P-Gewinn in gleicher Höhe verbunden. Ein vor einigen Jahren in Deutschland durchgeführter Landessortenversuch (40) mit Mais ergab eine Spanne der inneren P-Verwertung von 82 % bei der Sorte „Boss“ bis 124 % und bei der Sorte „Legat“, bezogen auf das Sortenmittel von 515 kg TM/kg P. Tabelle 11 zeigt dies sehr deutlich. Daraus folgt die Aufgabe für die Pflanzenzüchtung, Sorten mit hoher Stoffproduktion je Einheit P zu erarbeiten. Das gilt insbesondere für den sogenannten „Energie-Mais“. Bei diesen Pflanzen geht es nicht um hohe Nährstoffkonzentrationen im Kolben (Stärke, Proteine, Mineralstoffe), sondern um die größte Masse an leicht vergärbaren Kohlenhydraten in der Gesamtpflanze. Diese Kohlenhydrate enthalten keinen Stickstoff und das Phosphat nur in Spuren (Amylase, Amylopektin). Damit ist eine wichtige Bedingung für die interne P-Effizienz erfüllt.

**Tabelle 11. P-Entzug und P-Verwertung von 22 Silomaisorten.
Landesversuch 1993, Strohkirchen (Kreis Hagenow)**

Sorte	P-Entzug	P-Verwertung
Sortenmittel	25 kg P ha ⁻¹	515 kg TM kg P ⁻¹
relativ	100 %	100 %
	relativ	relativ
Amadeus	88	105
Garant	93	98
Mentor	86	95
Boss	106	82
Magda	99	93
Quanta	98	95
Aladin	96	101
Diva	100	101
Marshall	98	104
Ulrich	104	102
Alvis	100	94
Eviva	108	89
General	100	94
Prinval	107	92
Azur	85	114
Solfège	90	107
Kalif	111	101
Merlin	113	104
Nicola	108	97
Lixis	131	86
Helmi	101	109
Legat	86	124
GD 5 %	23	13

Quelle: (Auszugsweise nach 40)

Dass die Pflanzenzüchtung heute auch ohne Gentechnik in der Lage ist, P-effiziente Sorten zu kreieren, geht bereits aus Tabelle 6 hervor. Dass innerhalb von 25 Jahren die sogenannten Bereinigten Zuckererträge um 50% gesteigert werden konnten bei ständig bis an die Grenze von Gehaltsklasse B/A sinkenden P-Gehalten im Boden, ist äußerst bemerkenswert. Es zeigt einen sehr erfolgreichen Weg der Pflanzenzüchtung in der Umsetzung von Zuchtzielen, die auf Steigerung der Nährstoffeffizienz durch Ertragssteigerung bei gleich bleibendem bzw. sinkendem Nährstoffaufwand gerichtet sind.

Dieser Weg ist noch nicht zu Ende und bietet erhebliche Chancen für die Ernährungssicherung. Er sollte zielstrebig weiter gegangen werden. Die Steigerung der internen P-Effizienz ist offenbar besonders unter Bodenbedingungen mit geringer P-Verfügbarkeit bedeutsam (48).

Zum Schluss sei darauf hingewiesen, dass inzwischen ein sehr lesenswerter Übersichtsartikel zur gesamten Phosphatproblematik von KIRKBY und JOHNSTON (30) erschienen ist.

Zusammenfassung

- I. Die Düngerindustrie prognostiziert weltweit eine in der Zukunft sinkende Rohphosphatproduktion nach dem das Maximum in den 80er-, 90er-Jahren überschritten wurde. Die P-Reserven, die mit den zzt. geltenden Bewertungen (physikalische, chemische Eigenschaften) und akzeptierten Kosten für den Abbau und die Aufbereitung reichen weltweit nur noch ca. 120 Jahre, Reserven mit geringeren Qualitäten und höheren Kosten ca. dreimal länger. Deshalb besteht ein akuter Mangel an Phosphatdüngern derzeit noch nicht. Die Preise für Phosphate sind aber in den beiden letzten Jahren um 300% gestiegen, was ein Signal ist, insbesondere für die Phosphatverbraucher, ungenutzte Potenziale im Ackerboden zu erschließen und effizienter als bisher mit dem endlichen Rohstoff umzugehen.
- II. Neuere Resultate längerfristiger P-Feldversuche in verschiedenen Regionen Deutschlands ergaben, dass ca. 4 mg P/100 g lactatlöslicher Phosphor für hohe Erträge völlig ausreichen, in Bayern Gehaltsklasse B (2–4 mg CAL-P/100 g Boden) bei Düngung in Höhe der Abfuhr. Im Licht dieser Resultate muss das System der fünf Gehaltsklassen von 1997, insbesondere die Spanne der GK C (4–9 mg P/100 g Boden), sehr kritisch hinterfragt werden, denn für das Erreichen von 9 mg P wären bei einem Ausgangsgehalt von 4 mg P/100 g Boden (GK B/C) ca. 500 kg P/ha, also die P-Menge für die Abfuhr von ca. 20 Ernten nötig. Bei den gegenwärtig, um 300% gestiegenen Preisen (Vergleich zu 2005) wäre das eine nicht zu verantwortende Empfehlung.
- III. In Deutschland fallen jährlich 2,4 Mio. t TM Klärschlamm (ca. 2% P) mit ca. 48 000 t P, 400 000 t Tiermehle (ca. 12 000 t P) und 160 000 t Fleischknochenmehle (ca. 9600 t P) als Abfall an. Der gegenwärtige P-Verbrauch in Form von P-Düngern beträgt jährlich 108 000 t P. Bei einer P-Recyclingquote von 90% könnten also über 50% des derzeit importierten Mineraldünger P ersetzt werden. BMBF und BMU haben 2004 eine Forschungs- und Innovationsförderung zum P-Recycling gestartet. Erste Verfahren zur Herstellung neuer P-Dünger sind in der Entwicklung bzw. P-Dünger in der Erprobung. Erste agronomische Tests möglicher neuer P-Dünger wurden bereits durchgeführt.
- IV. Die P-Dynamik in den Böden ist sehr kompliziert, da Phosphat der spezifischen Anionensorption und der Fällung durch insbesondere Calciumionen unterliegt. Während Getreidepflanzen der niedrigen P-Konzentration in der Bodenlösung mit einem großen aufnahmebereiten Wurzelsystem (Roggen z. B. 38 km/m²) begegnen, scheiden dikotyle Pflanzen eine Reihe von organischen Säuren (Citrat, Malat, Oxalat etc.) aus, die in der Rhizosphäre Phosphat durch Ligandenaustausch mobilisieren und damit aufnehmbar machen. Letzteres Prinzip wird u. a. in Japan bei Eukalyptuspflanzen genutzt (51). Der Gentransfer wird als ein Weg gesehen, die P-Aufnahmeeffizienz von Pflanzen auf indirektem Weg zu steigern. Ein wichtiger Weg ohne Gentransfer ist die Züchtung auf hohe P-Aufnahmeeffizienz durch markergestützte Züchtung mittels QTLs für die P-Aufnahme. In einem Reisprojekt Japan/Indien wurde dieser Weg bereits erfolgreich beschritten (58; 59).
- V. Die innere P-Verwertung der Kulturpflanzen (kg Trockenmassebildung/g aufgenommenen P) weist offensichtlich eine beachtliche Variationsbreite auf. D. h. auch für dieses Merkmal gilt, dass die P-Verwertungseffizienz der Pflanzen noch deutlich verbessert werden kann.

- VI. Die Möglichkeiten, Pflanzen bedarfsgerecht zu düngen, sollten ausgeschöpft und der Einsatz von P-Düngemitteln entsprechend auf die jeweiligen Standort- und Anbauverhältnisse abgestimmt werden.

Summary

Concepts for a more efficient use of phosphorus based on experimental observations

- I. The fertiliser industry predicts a sinking rock phosphate production all over the world after the peak production point had been hit in the 1980/1990's. The global P reserves with the currently applicable evaluations (physical, chemical characteristics) and accepted costs for exploitation and processing are expected to last for only approx. 120 more years, reserves of lower quality and higher costs about three times longer. An acute lack of phosphate fertiliser does therefore not yet exist. But phosphate prices have increased by 300% over the last two years. This is a clear signal, for phosphate consumers in particular, to exploit the unused potential in agricultural soil and handle this limited resource in a more efficient way.
- II. More recent results of long-term P field experiments in different German regions show that approx. 4 mg P/100 g lactate soluble phosphorus are fully sufficient for high yields, in Bavaria content class B (2–4 mg CAL-P/100 g soil) with fertilisation equalling crop removal. In the light of these results, we must very critically examine the system of five content classes dating back to 1997, and the margin of content class C (4–9 mg P/100 g soil) in particular, as with an initial content of 4 mg P/100 g soil (content class B/C) it would need approx. 500 kg P/ha (i. e. an amount of P equivalent to the removal of about 20 harvests) to reach 9 mg P. With prices up by 300% (compared to 2005), this cannot be recommended.
- III. In Germany, 2.4 million tonnes of dry matter sewage sludge (approx. 2% P) with approx. 48,000 tonnes of P, 400,000 tonnes of animal meal (approx. 12,000 tonnes of P) and 160,000 tonnes of meat-and-bone meal (approx. 9,600 tonnes of P) are disposed of as waste every year. Current P consumption in the form of phosphate fertiliser amounts to 108,000 tonnes of P per year. With a P recycling rate of 90%, more than 50% of the currently imported mineral fertiliser P could thus be replaced. In 2004, the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) and the Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (BMU) began to support research and innovation in P recycling. First methods for the production of new P fertilisers are currently being developed and P fertilisers are being tested. First agronomical tests of potential new P fertilisers have already been carried out.
- IV. P dynamics in the soil are very complicated as phosphate is subject to specific anion adsorption and precipitation by calcium ions in particular. Whereas grain crops handle the low P concentrations in the soil solution with their extensive root system (rye e. g. 38 km/m²), dicotyledons excrete a series of organic acids (citrate, malate, oxalate) which mobilise phosphate in the rhizosphere through ligand exchange to make it absorbable. The latter principle is, for example, used by eucalypt plants in Japan (51). Gene transfer is regarded as a way to indirectly increase the P absorption efficiency of plants. An important method without gene transfer lies in the breeding with a view to high P absorption efficiency by way of marker-assisted breeding with QTLs for P absorption. This method had already been successfully adopted within the scope of a rice project in Japan/India (58; 59).
- V. The internal P utilisation of arable crops (kg dry-matter production/g absorbed P) obviously has a considerable range of variation. It can therefore also be said in this respect that the P absorption efficiency of the plants can still be increased considerably.
- VI. The possibilities to apply fertilisers according to the actual needs should be fully exhausted and the use of P fertilisers should be adjusted to the specific site conditions and cropping ratios.

Résumé

Approches pour l'utilisation plus efficace du phosphore sur la base de constatations expérimentales

- I. Le secteur des producteurs d'engrais prévoit pour l'avenir une baisse de la production de phosphate naturel au niveau mondial après que le sommet atteint dans les années 80/90 est dépassé. Les réserves de phosphore aux caractéristiques physiques et chimiques actuellement exigées et à des coûts acceptés concernant son exploitation et son traitement suffiront pour couvrir une période d'environ 120 ans ; les réserves de moindre qualité et avec des coûts plus élevés seront encore disponibles trois fois plus longtemps. À présent, il n'existe donc pas de pénurie d'engrais phosphatés. Mais les prix des phosphates ont augmentés les deux dernières

- années de 300 % ce qui devrait être pris comme un signal, notamment de la part des utilisateurs de phosphate, afin d'exploiter les potentiels existants dans le sol agricole et d'employer plus efficacement cette matière première épuisable.
- II. Des essais sur le terrain réalisés plus récemment dans plusieurs régions d'Allemagne montrent que d'environ 4 mg de P/100 g de phosphore soluble dans le lactate sont bien suffisants pour parvenir à de bons rendements. À la lumière de ces résultats, il convient de remettre en question le système des cinq classes de teneur datant de l'année 1997, notamment la marge de la classe de teneur C (4–9 mg de P/100 g de sol) car dans le cas d'une teneur d'origine de 4 mg de P / 100 g de sol (classe de teneur B/C), il faudrait environ 500 kg de P/ha, donc la quantité de phosphore équivalente à l'évacuation d'environ 20 récoltes, pour obtenir 9 mg de P. Face aux prix augmentés de 300 % par rapport à 2005, une telle mesure ne peut pas être recommandée.
 - III. En Allemagne, 2,4 millions de tonnes de matière sèche de boues (environ 2 % de P) avec à peu près 48 000 tonnes de P, 400 000 tonnes de farines animales (environ 12 000 tonnes de P) et 160 000 tonnes de farines de viande osseuse (environ 9.600 tonnes de P) sont produits annuellement. L'usage actuel de phosphore sous forme d'engrais phosphaté s'élève à 108 000 tonnes par an. Avec un pourcentage de recyclage du phosphore de 90 %, plus de 50 % de la quantité d'engrais minéral phosphaté importée à présent pourraient donc être substitués. En 2004, les ministères fédéraux allemands chargés de la recherche et de l'environnement ont lancé une initiative pour encourager les activités de recherche et d'innovation dans le domaine du recyclage du phosphore. Les premières techniques pour la production d'une nouvelle génération d'engrais phosphatés sont en cours de développement et les premiers engrais phosphatés sont testés.
 - IV. Étant exposé à la sorption anionique spécifique et à la précipitation notamment par les ions de calcium le phosphore montre une dynamique très compliquée dans les sols. Tandis que les plantes de céréales répondent à la basse concentration de phosphore dans la solution du sol par un vaste système de racine capable d'absorber les substances (celui du seigle par exemple s'étend à 38 km/m²), les dicotylédones sécrètent de différentes acides organiques (citrate, malate, oxalate et autres) qui par l'échange de ligands mobilisent le phosphate dans la rhizosphère pour le rendre absorbable. Ce dernier principe est employé entre autre au Japon par les plantes d'eucalyptus (51). La transgénèse est considérée comme un moyen efficace pour augmenter indirectement la capacité d'absorption de phosphore des plantes. Une autre possibilité, sans avoir recours à la transgénèse, est la sélection visant à une forte capacité d'absorption de phosphore et ce par une sélection assistée de marqueurs au moyen de QTL pour l'absorption de phosphore. Dans le cadre d'un projet de riz au Japon et en Inde cette approche a déjà été mise en œuvre avec succès (58; 59).
 - V. L'utilisation interne du phosphore par les plantes cultivées (kilogramme de matière sèche produite /gramme de phosphore absorbé) montre apparemment de grandes variations ce qui veut dire que la capacité des plantes d'utiliser le phosphore pourrait également être améliorée de manière significative.
 - VI. Il serait utile de profiter pleinement des possibilités d'apporter des engrais aux plantes selon leur besoin et d'adapter l'emploi d'engrais phosphatés aux conditions spécifiques de l'emplacement et des cultures concernés.

Literatur

1. Anonym, 2000: Understanding Phosphorus and its use in Agriculture. Aus Publikationen der web site der European Fertilizer Manufacturers Association (EFMA); siehe auch EFMA weiter unten.
2. Anonym, 2008: www.weltbevölkerung.de/info-service/weltbevölkerungsuhr.php.
3. AUERSWALD, K.; CLAASSEN, N.; RÖMER, W.; WERNER, W., 2002: VDLUFA-Standpunkt: Mögliche ökologische Folgen hoher Phosphatgehalte im Boden und Wege zu ihrer Verminderung. Mitteilungen der DBG 98, 75–80.
4. BARBERIS, E. MARSAN, F. H.; SCALENGHE, R.; LAMMERS, A.; SCHWERTMANN, U.; EDWARDS, A.; MAGUIRE, R.; WILSON, M.; DELGADO, A.; TORRENT, J.; 1996: European soils overfertilized with phosphorus. Part 1. Basic properties. Fertilizer Research 45, 199–207.
5. BAUMGÄRTEL, G., 2005: P- und K-Düngung kritisch überdenken. Land und Forst 32, 18–19.
6. BEISSNER, L.; RÖMER, W., 1996: Improving the availability of phytate-P so sugar beet by phytase application to soil. IX. Intern. Coll. For Optimization of Plant Nutrition Prag, 8.–15. 9. 1996, Proceedings, p. 327–332.
7. –, 1997: Mobilisierung von Phosphor aus organischen und anorganischen P- Verbindungen durch Zuckerrübenwurzeln. Dissertation. Universität Göttingen. Cuvillier Verlag Göttingen.

8. BERGS, C. G., 2006: Eckpunkte für eine Novelle der Klärschlammverordnung. In: KTBL-Schrift 453, 193–200.
9. Berlin, 2003: Symposium „Rückgewinnung von Phosphor in der Landwirtschaft und aus Abwasser und Abfall“ des Umweltbundesamtes und der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen im Febr. 2003 in Berlin.
10. BMU, 2004: www.bmu.de/foerderprogramme/pilotprojekte_inland/doc/2330.php; oder auch bei: www.phosphorrecycling.de.
11. Bundesanzeiger 2004: Gemeinsame Förderinitiative des BMBF und des BMU Kreislaufwirtschaft für Pflanzennährstoffe, insbesondere Phosphor. (Nr. 203, 26. 10. 2004, Seite 22373).
12. CEEP, 1997: Phosphate, European Chemical Industry Council, Centre Europeen d Études des Polyphosphates, Brüssel.
13. CLAASSEN, N., 1990: Nährstoffaufnahme höherer Pflanzen aus dem Boden. Habilschrift. Severin Verlag, Göttingen.
14. Darmstadt, 2005: Schriftenreihe WAR Nr. 167.
15. –, 2008: Schriftenreihe WAR Nr. 185,
16. DERY, P.; ANDERSON, B., 2008: Peak Phosphorus. In: <http://www.energybulletin.net/33164.html> und: [energybulletin.net/node/28720](http://www.energybulletin.net/node/28720).
17. EFMA, 2000: www.efma.org/publications/phosphorus/understanding%20phosphorus/Final%20phosphorus.pdf, Seite 22.
18. EGLE K., 2002: Untersuchungen zum Phosphor-, Kupfer-, Zink- und Cadmium-Aneignungsvermögen von drei Lupinenarten und Weidelgras unter Berücksichtigung wurzelbürtiger organischer Säuren. Dissertation. Universität Göttingen. Shaker Verlag Aachen.
19. FAO, 2008: www.fao.org/newsroom/en/news/2008/1000923/index.html
20. FERTECON, 2008: Phosphate report, 31. January 2008. www.fertecon.com.
21. FREDE, H. G.; BACH, M., 2003: Heutiger und künftiger Beitrag der Gülle bei der Phosphorversorgung der Böden. In: Tagungsband zum Symposium „Rückgewinnung von Phosphor in der Landwirtschaft und aus Abwasser und Abfall“ des Umweltbundesamtes, Berlin, 4/1–4/11.
22. GERKE, J., 1995: Chemische Prozesse der Nährstoffmobilisierung in der Rhizosphäre und ihre Bedeutung für den Übergang vom Boden in die Pflanze. Cuvillier Verlag Göttingen.
23. –; RÖMER, W.; JUNGK, A., 1994: The excretion of citric and malic acid by proteoid roots of *Lupinus albus* L. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 157: 289–294.
24. HEGE, U.; OFFENBERGER, K.; WENDLAND, M., 2007: Stimmen die Beratungsempfehlungen für die P- und K-Düngung? Vortrag auf dem 10. Düngungstag der LUFA Rostock, 22. Nov. 2007 in Güstrow. www.lms-lufa.de.
25. –; WENDLAND, M.; OFFENBERGER, K., 2008: Versuchsergebnisse zur Bedeutung der Bodenversorgung mit Phosphat und Kali. Wie hoch müssen die Nährstoffgehalte im Boden sein? Pflanzenbauwissenschaften, Bd. 12, Heft 2, S. 53–63.
26. KELLER, H., 2000: Einfluss wurzelbürtiger organischer Säuren auf das Cu-, Zn- und Cd-Aneignungsvermögen von Spinatgenotypen. Dissertation. D 386 Kaiserslautern, Fachbereich Chemie. http://kluedo.ub.uni-kl.de/Chemie/Metadaten/dissertation_33.html.
27. KERSCHBERGER, M., HEGE, U., JUNGK, A., 1997: VDLÜFA-Standpunkt „Phosphordüngung nach Bodenuntersuchung und Pflanzenbedarf“. Eigenverlag Darmstadt, 1997.
28. –; RICHTER, D., 1978: Beitrag zur Ermittlung der für die Erhöhung des Gehaltes an DL-löslichem Phosphat im Boden notwendigen P-Düngermengen. Archiv Acker-Pflanzenbau Bodenkunde., Berlin 22 (1978) 12, 755–762.
29. –; –, 1988: Ergebnisse eines 12-jährigen P-Steigerungsversuches auf einer Löss-Schwarzerde im Bezirk Halle. Archiv Acker- Pflanzenbau Bodenkunde., Berlin 32 (1988) 6, 369–377.
30. KIRKBY, E. A.; JOHNSTON, A. E., 2008: Soil and fertilizer phosphorus in relation to crop nutrition. In: White, P. J.; Hammond, J. P., (eds): The ecophysiology of plant-phosphorus interactions; Springer Science + Business Media B. V., 177–223.
31. LIEBIG, J. v., 1840: Die organische Chemie in ihrer Anwendung auf Agricultur und Physiologie. Vieweg, Braunschweig.
32. MITSCHERLICH, E. A., 1909: Das Gesetz des Minimums und das Gesetz des abnehmenden Bodenertrages. Landwirtschaftliches Jahrbuch 38: 537–552.
33. NEUMANN, G.; MASSONEAU, A.; MARTINOVA, E.; RÖMHELD, W., 1999: Physiological adaptations to phosphorus deficiency during proteoid root development in white lupin. Planta 208: 273–282.
34. RICHARDSON, A. E.; HADOBAS, P. A.; SIMPSON, R. J., 2001: Phytate as a source of phosphorus for the growth of transgenic *Trifolium subterraneum* L. In: Plant nutrition – Food security and sustainability of agro-ecosystems. HORST W. J. et al. (Eds.). Kluwer Academic Publishers. p 560–561.
35. RÖMER, W. 1999: Zum Problem sehr hoher P-Gehalte im Boden vor dem Hintergrund der Düngeverordnung von 1996 und der Eutrophierung von Gewässern. VDLÜFA-Schriftenreihe 50, 5–19.

36. –; Claassen, N.; Steingrobe, B.; Hilmer, R.; Märländer, B., 2004: Reaktion der Zuckerrübe auf Phosphordüngung. *Zuckerrübe* 6/2004 (53. Jg.), 1–3.
37. –; –; –, 2005: P- und K-Düngung – Reaktion von Winterweizen und Wintergerste auf die P- und K-Düngung in einem 20-jährigen Feldversuch. *Getreide-Magazin*, 10. Jg. 4, 238–242.
38. –, 2006: Vergleichende Untersuchungen zur Pflanzenverfügbarkeit von Phosphat aus verschiedenen P-Recycling-Produkten im Keimpflanzenversuch. *J. Plant Nutr. Soil Sci*, 169, 826–832.
39. –; GERKE, J., 1998: Phosphat und Eisenmobilisierung durch Wurzelexsudate bei *Lupinus albus* L., Lupinen in Forschung und Praxis, Hrsg. Wink M. 15–25.
40. –; SCHENK, H.; DAETZ, F.; SCHMIDT, L.; RÖMER, A., 1995: Genotypische Unterschiede des Phosphatentzuges und der Phosphatverwertung bei *Zea mays* L. und *Hordeum distichon* L. *Kühn-Archiv* 89: 164–177.
41. SCHAUM, CH., 2007: Verfahren für eine zukünftige Klärschlammbehandlung. Dissertation. In: *Schriftenreihe WAR*, 185.
42. SCHILLING, G., 2000: *Pflanzenernährung und Düngung*. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.
43. SCHULZ, VOLKER, 1994: Pflanzenverfügbarkeit von Kalium in norddeutschen Sandböden als Grundlage umweltschonender Kalium- Düngung von Ackerkulturen. Dissertation, Georg-August-Universität, Göttingen.
44. SCHWERTMANN, U., 1998: Chemische Eigenschaften der Böden. In: SCHEFFER / SCHACHTSCHABEL: *Lehrbuch der Bodenkunde*, Kapitel 4. 14. Auflage, Enke Verlag, Stuttgart.
45. SPRENGEL, C., 1828: Von den Substanzen der Ackerkrume und des Untergrundes. *Journal für Technische und Ökonomische Chemie* 2: 423–474 und 3: 42–99; 313–352; 397–421.
46. Statistisches Jahrbuch 2006 über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. Landwirtschaftsverlag Münster Hiltrup (nach Statistisches Bundesamt, BMVEL, Referat 425).
47. Statistisches Bundesamt, 2001: Umwelt-öffentliche Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung. Fachserie 19, Reihe 2. 1., 2001. Erschienen im Oktober 2003, Wiesbaden.
48. STELLING, D.; WANG, S. H.; RÖMER, W., 1996: Efficiency in the use of phosphorus, nitrogen and potassium in topless faba beans (*Vicia faba* L.) - Variability and inheritance. *Plant Breeding* 115, 361–366.
49. STN (Servicegesellschaft Tierische Nebenprodukte) 2007: www.stn-vvtn.de/fakten_zahlen.php; sowie: www.stn-vvtn.de/produkte.php.
50. Stuttgart 2006: *Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft*, Bd. 184.
51. SUZUKI, Y.; KAWAZU, T.; WADA, T.; HARA, T.; KOYAMA, H., 2003: Characteristics of transgenic Eucalyptus hybrids with an over expression of a plant mitochondrial citrate synthase. *Proceedings of 2nd International Symposium on Phosphorus Dynamics in the Soil-Plant Continuum*; 2003 Sept 21–26; Perth, 152–153.
52. U. S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2007: http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/phosphate_rock/mcs-2008-phos.pdf.
53. VDLUFA-Standpunkt, 1997: *Phosphordüngung nach Bodenuntersuchung und Pflanzenbedarf*. Eigenverlag Darmstadt, 1997.
54. VESTEAGER, N. O., 2003: Erfahrungen zur Phosphorrückgewinnung mit dem Seaborne-Verfahren. In: *Tagung des UBA zur Rückgewinnung von Phosphor in der Landwirtschaft und aus Abwasser und Abfall*. Berlin, 6.-7-2-2003, 17/1–17/9.
55. WENDT, J., 1991: Wirkung von Dünger- und Bodenphosphor auf die Phosphatversorgung von Ackerkulturen – Untersuchungen an mehrjährigen Feld- und Gefäßversuchen. Dissertation. Universität Göttingen 1991.
56. WERNER, W., 1999: Ökologische Aspekte des Phosphorkreislaufs. *Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung* 11, Nr. 6, 343–351.
57. –, 2006: Düngung von Böden. *Handbuch der Bodenkunde*. 26. Ergänzung Lfg. 11/06; Kap. 6.4, 1–63.
58. WISSUWA, M., 2001: A marker-based approach to improve nutrient acquisition in rice. In: *Plant nutrient Acquisition – New Perspectives*, Eds. AE, N.; ARIHARA, J.; OKADA, K.; SRINIVASAN, A.; Springer Verlag Tokyo, 464–486.
59. –; AE, N., 2001: Further characterization of two QTLs that increase phosphorus uptake of rice (*Oryza sativa* L.) under phosphorus deficiency. *Plant and Soil* 237, 275–286.
60. –; YANO, M.; AE, N., 1998: Mapping of QTLs for phosphorus-deficiency tolerance in rice (*Oryza sativa* L.). *Theor. Appl. Genet* 97, 777–783.
61. WULFF, F., 1996: *Umweltschonende Kalium und Phosphatdüngung – Feldversuchen, Bodenanalysen und Modellrechnungen zur Bestimmung des Düngebedarfs von Ackerkulturen auf Sandböden*. Dissertation. Cuvillier Verlag, Göttingen.

Fußnote

- ¹⁾ Nach einem Vortrag im Rahmen des Bio-Geo-Kolloquiums der Friedrich-Schiller-Universität Jena zu Ehren von Prof. Dr. WERNER BERGMANN (50 Jahre Habilitation) am 18. 12. 2007.

Autorenanschrift: Prof. Dr. WILHELM RÖMER, Department für Nutzpflanzenwissenschaften, Abteilung Pflanzenernährung der Georg-August-Universität Göttingen, Carl-Sprengel-Weg 1, 37075 Göttingen, Deutschland
Privatadresse: Südring 14, 37120 Bovenden, Deutschland
awroemer@web.de