

Düngungsplanung mit gemischt-ganzzahliger Linearer Programmierung: bedarfsgerecht, betriebsspezifisch, kostenminimal und verordnungskonform

Jan-Hendrik Buhk¹ und Hans-Hennig Sundermeier¹

Abstract: Die deutsche Düngeverordnung [M17] zwingt landwirtschaftliche Betriebe zu betriebs- und einzelschlagspezifischer Düngungsplanung und offenbart die Defizite für praxistaugliche und verordnungskonforme Entscheidungshilfen. In einer Fallstudie entstand ein gemischt-ganzzahliges LP-basiertes Kostenminimierungsmodell, das die optimale Allokation sämtlicher Düngemittel auf die Schläge bei simultaner Einhaltung betrieblicher, betriebswirtschaftlicher, pflanzenbaulicher und verordnungsbedingter Restriktionen ermittelt. Eine zeitlich gegliederte und schlagbezogene Ausbringungsempfehlung, ein DüV-gerechter Nachweis, Übersichten zur Wirtschaftsdünger- und Gärückstandslagerung sowie eine Bestellliste für Handelsdünger bilden die Ergebnis-Komponenten.

Keywords: Düngungsplanung, Düngeplanung, Düngeverordnung, MILP, Proof of Concept

1 Einleitung und Problemstellung

Die deutsche Düngeverordnung (DüV vom 26.05.2017) [BM17] verpflichtet landwirtschaftliche Betriebe zur Düngedarfsermittlung für N und P₂O₅ für jeden Schlag bzw. jede Bewirtschaftungseinheit und damit indirekt zur Planung aller Düngegaben für das Düngejahr sowie zur Dokumentation aller Düngungsmaßnahmen. In ihrem Anhang enthält die Verordnung die Kalkulationsdaten für die Ermittlung des Nährstoffbedarfs und für die Erstellung des obligatorischen Nährstoffvergleichs. Sie regelt ebenfalls die Ausbringungszeitspannen für stickstoffhaltige Dünger, Lagerungs- und Ausbringungsmodalitäten der Wirtschaftsdünger aus Tierproduktion sowie der Gärückstände aus Biogasbetrieben und die planerisch zu berücksichtigenden Stickstoffwirkungsäquivalente.

Zur Einhaltung des umfassenden Regelwerkes und im Hinblick auf die Stoffstrombilanzverordnung (StoffbilV vom 14.12.2017, [BM18]) gewinnt problemorientierte und verordnungskonforme Planungssoftware erheblich an Bedeutung, da praxisübliche Schlagkarteisysteme zwar die schlagspezifische Datenhaltung und Nährstoffbilanzierung zu Dokumentationszwecken unterstützen, jedoch keine Entscheidungshilfen i. e. S. darstellen, welche die zeitliche und schlagbezogene Wirtschafts- und Handelsdüngerauswahl und -allokation erleichtern könnten.

¹ Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Institut für Agrarökonomie, Wilhelm-Seelig-Platz 6/7, 24118 Kiel, jhbuhk@ae.uni-kiel.de bzw. hsundermeier@lbv-net.de

2 Einordnung praxisorientierter Lösungsansätze

Tab. 1 vergleicht exemplarisch die konzeptuellen Eigenschaften ausgewählter Lösungsansätze zur Düngungsplanung mit den Merkmalen des hier vorgestellten Ansatzes. Aus der (Offizial-) Beratung (z. B. [LK18]) stammen Systeme, die insbesondere einen verordnungskonformen Nachweis anstreben. Wörle und Gaugler [WG17] trachten zwar nach „Optimierung“ der Düngungsmaßnahmen – aus der sequentiellen Vorgehensweise resultiert jedoch letztlich eine vorentscheidungsgetriebene Simulationssoftware. Unsere – erheblich erweiterte – Auffassung des einzelbetrieblichen Planungsproblems „Düngung“ fußt auf dem Ansatz von Sundermeier [Su80] zur kostenminimalen, simultan zeitlich und schlagspezifisch optimalen Allokation von Wirtschafts- und Handelsdüngern und berücksichtigt sowohl die betriebswirtschaftlich als auch die pflanzenbaulich relevanten Aspekte der betriebsindividuellen Planungssituation.

Modellbereich	Konzepttyp:	Offizialberatung	Wörle u. Gaugler (2017)	Sundermeier (1980)	Unser Ansatz
	Entwicklungsziel	[Kalk.-hilfe]	„App“	[Diss.]	„Navi“
Grundlegende Modell-Parameter	Schlagspezif. Nährstoffbedarf	✓	✓	✓	✓
	Ausbringungszeitfenster	?	?	saisonal	monatlich
Wirtschaftsdünger und Gärrückstände	Vorentscheidungsfreie Handelsdüngerauswahl		[Vorabfestlegung]	Lokales	Handelsdüngersortiment
	Nährstoffe, Wirkungsäquival.	✓	✓	✓	✓
	Anfall (t)			✓	✓
	Lager (t)			✓	✓
Ausbringungskosten	Abgabe-/Aufnahmeverträge				✓
	Verlauf der Kostenkurve		?	linear	degressiv
	... diff. nach Schlagentfernung				✓
Rechenweg	... diff. nach Schlaggröße				✓
	Über Vorentscheidungen		ja	nein	nein
Abbildung 'action-room'	Kalkulationsabfolge		sequentiell	simultan	simultan
	lineare Gleichungen/Relationen			✓	✓
optimale Allokation ...	MILP approx. nichtlin. Relationen				✓
	über die Zeit im Düngejahr und ... gleichzeitig über alle Schläge			✓	✓

Tab. 1: Eigenschaften ausgewählter Entscheidungshilfe-Konzepte zur Düngungsplanung

3 Auffassung des Sachproblems und Modellierung

Tabelle 1 verdeutlicht die Gemeinsamkeiten typischer Lösungsansätze zur Düngungsplanung, aber auch die grundlegenden Unterschiede in der Problemauffassung. Größtmögliche Datentransparenz ist zwar eine notwendige Voraussetzung für den Aufbau einer Entscheidungshilfe; sie bietet aber aus sich heraus noch keine Basis für ökonomisch rationales Handeln. Heuristische Simulationssoftware (wie z. B. von Wörle und Gaugler [WG17]) kann Voranschlagskalkulationen in einem explizit nicht näher definierten Lösungsraum erleichtern; es bleibt jedoch offen, ob und inwieweit alle betrieblichen Nebenbedingungen und Abhängigkeiten berücksichtigt sind, oder ob es nicht wirtschaftlich vorteilhaftere Lösungen gibt.

Auf mathematischer Optimierung basierende Lösungsansätze heben diese Defizite auf; sie stellen jedoch neue Anforderungen bezüglich der Abbildung aller theoretisch möglichen Lösungen („action room“) in einem System mathematischer Formeln. Sundermeier belegte bereits 1980 die Einsetzbarkeit der Linearen Programmierung für die einzelbetrieblich optimale Allokation von Wirtschafts- und Handelsdüngern im Düngejahr – insbesondere in Betrieben mit flüssigen Wirtschaftsdüngern bei beschränkten Lagerkapazitäten.

Der aktuelle Ansatz [Bu18] überwindet durch den Übergang zur gemischt-ganzzahligen Linearen Programmierung (Mixed-Integer Linear Programming, MILP) die ursprünglich noch vorhandenen, betriebswirtschaftlichen Abbildungsschwächen. Mit binären Hilfsvariablen lassen sich in der Praxis nicht ausbringbare Kleinst- und Splittermengen für Handels- und Wirtschaftsdünger ausschließen. Degressive Verläufe von Ausbringungs-Kostenkurven lassen sich ebenfalls über Binärvariable mit für Planungszwecke ausreichender Genauigkeit approximieren. Gleichzeitig erlauben leistungsfähige Solver und moderne Hochleistungsrechner neue Größenordnungen bei der Modellgröße und -komplexität.

Die wirtschaftliche Aufgabenstellung formulieren wir daher wie folgt: Minimiere die Summe aller düngerart-, schlag-, mengen- und terminspezifischen Beschaffungs- und Ausbringungskosten für alle Wirtschafts- und Handelsdüngerausbringungsaktivitäten in einem Düngejahr für alle Schläge und Fruchtarten eines Betriebs unter folgenden Nebenbedingungen: a) die termin-, fruchtart- und schlagspezifischen Nährstoffbedarfsmengen auf allen Schlägen sind zu befriedigen, b) terminspezifische Höchstmengenbeschränkungen (insbesondere für Wirtschaftsdünger) für jeden einzelnen Schlag bzw. jede Fruchtart sind einzuhalten, c) die Beschränkung von 170 kg N pro ha und der betriebliche Nährstoffvergleich sind für den Betrieb insgesamt einzuhalten, d) die terminspezifischen Verfügbarkeiten für Wirtschaftsdünger und Gärrückstände sind in Abhängigkeit vom Anfall, von den Lagerkapazitäten sowie von vertraglich vereinbarten, terminspezifischen Zufuhr- bzw. Abfuhrmengen zu berücksichtigen.

Da dem kompletten LP-Formelwerk in diesem Beitrag nicht der benötigte Platz eingeräumt werden kann, skizzieren wir die Problemkonstituenten für eine vorentscheidungs-freie Düngungsplanung schematisch in Abbildung 1.

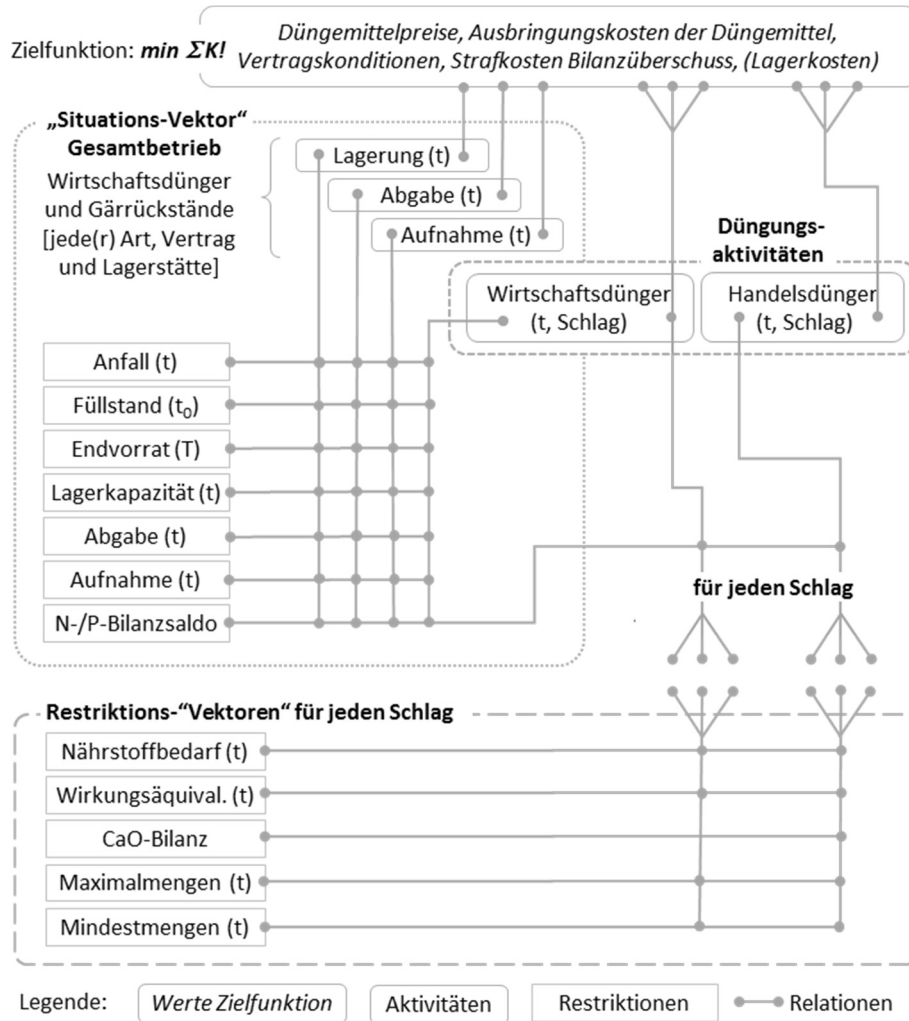


Abb. 1: Problemkonstituenten bei der Düngungsplanung

Der Praxisbetrieb, mit dem wir unser Konzept erprobt haben, hält Milchkühe, mäset Bullen, gibt Gülle an einen Biogasbetrieb ab, nimmt Gärrückstände vereinbarungsgemäß wieder auf und bewirtschaftet 29 Schläge (Grünland, Silomais, Winterweizen, Wintergerste und Winterraps), die teils bis zu 15 km vom Betriebsgelände entfernt liegen.

Durch die zeitabhängige Verknüpfung des Wirtschaftsdüngeranfalls mit den Flächen über die Wirtschaftsdüngerausbringung entstehen Verbindungen jedes einzelnen Schlages zu den übergeordneten Wirtschaftsdüngeranfall-, -lagerungs-, -abgabe- und -aufnahme-

restriktionen, welche eine simultane Betrachtung des Allokationsproblems u. E. zwingend erfordern. Komplexitätstreiber sind hierbei die Zahl der Schläge, die Zeitspannen (Monate), die Zahl der Flüssigmistarten und Lagerorte, sowie das Sortiment an Handelsdüngern, das lokal verfügbar ist. Ohne diese Verknüpfung könnte die terminspezifische Bedarfsdeckung der Nährstoffe N, P₂O₅, K₂O, MgO, CaO und S auf jedem einzelnen Schlag separat (und damit auf einem sequentiellen Lösungsweg) erfolgen.

Der Praxisfall [Bu18] ergab eine MILP-Matrix mit ca. 2.000 Restriktionen, ca. 3.500 Entscheidungsaktivitäten (davon ca. 45 % Binärvariablen) und ca. 20.000 Nicht-Null-Koeffizienten. Die Koeffizientendichte von 0,3 % signalisiert eine dünn besetzte, sogenannte "sparse" Matrix. Eine prototypische Implementation erfolgte mit Excel als Frontend und GUROBI als Solver. Laufzeiten von ca. 30 Minuten (bei ca. 16 Mio. Iterationen, Branch and Bound Tolerance von 1 %) auf einem PC signalisieren die technische Beherrschbarkeit des Ansatzes.

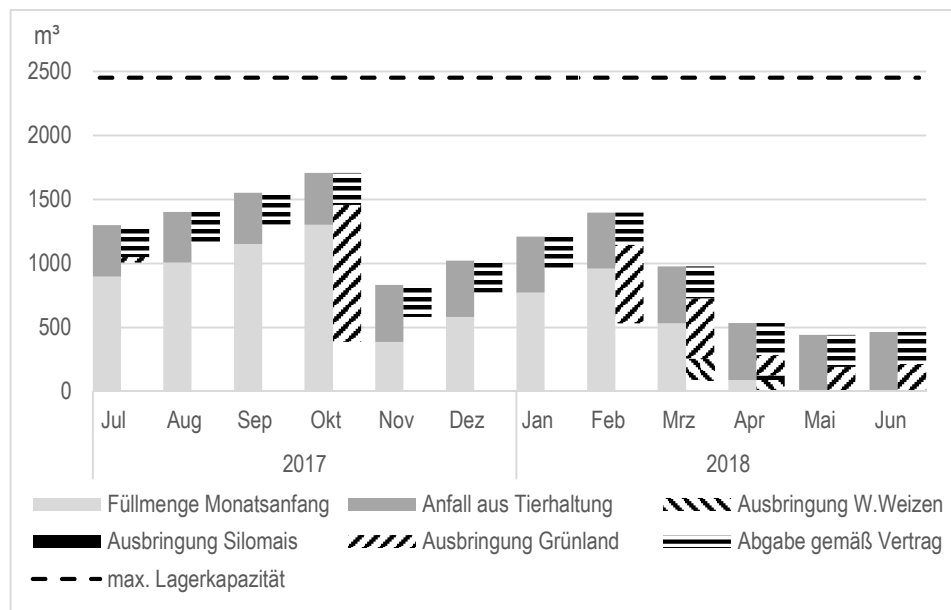


Abb. 2: Lagerübersicht Güllelager

Das LP-Rohergebnis mündet ebenfalls über Excel in einen Ergebnisbericht, bestehend aus a) der kostenminimalen, detaillierten, zeitlich auf Monatsbasis gegliederten Ausbringungsempfehlung für Wirtschafts- und Handelsdünger für jeden einzelnen Schlag, b) den Nährstoffsummen und -salden aller Nährstoffe mit den Ausbringungs- und Handelsdüngerkosten für jeden Schlag, c) einer zeitlich differenzierten Anfalls-, Lagerungs- und Ausbringungsübersicht für alle Wirtschaftsdünger und Gärrückstände und d) einer Bestellliste der zur Umsetzung der Düngungsempfehlung erforderlichen Handelsdüngemittel. Aus

Platzgründen können wir hier nur exemplarisch eine grafische Lagerungs- und Ausbringungsübersicht für die Rindergülle wiedergeben (Abb.2).

4 Diskussion und Schlussfolgerungen

Die erfolgreiche Optimierung bestätigt die grundsätzliche Anwendbarkeit der Linearen Programmierung zur Düngungsplanung in der Praxis. Die Erweiterungen im Vergleich zum Ansatz von Sundermeier [Su80] erhöhen die Modellkomplexität und verbessern die betriebswirtschaftliche Abbildungsqualität für das Sachproblem. Fachlich wurden Modell und Ergebnisse mit Experten der Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein und dem Betriebsleiter diskutiert und grundsätzlich akzeptiert. Potenzielle Verfeinerungsschritte liegen in differenzierterer Abbildung der knappen Verfügbarkeit von Arbeit und Maschinen sowie der saisonalen Schwankungen der Handelsdüngerpreise. Auf dem Pfad zu einer praxistauglichen Entscheidungshilfe liegen u. a. noch die Meilensteine a) Verknüpfung mit etablierten Datenhaltungssystemen für Tierhaltungs-, Biogas-, Schlag- und Anbaudaten sowie für Maschinen- und Verfahrenskosten, b) komfortabler Steuerungsdialog, c) Matrizengenerierungssystem für die fallspezifischen MILP-Matrizen, d) Berichtsgenerator zur Aufbereitung der Optimallösungen sowie e) die Erreichbarkeit als Webservice.

Die bisherigen Arbeitsergebnisse belegen erneut, dass die komplexen Matrizen einer MILP-basierten Düngungsplanung technisch beherrschbar sind, dass erhebliche Kostenvorteile auszuschöpfen sind und dass zusätzlich zu verordnungskonformer Planung und DüV-gerechtem Nachweis beachtliche Mehrwerte für Betriebe und Umwelt erschlossen und realisiert werden können. Auf dem Weg zu einer wirtschaftlich effizienten, praxistauglichen Entscheidungshilfe („Navi“) zur digitalen Düngungsplanung erachten wir den Meilenstein „Proof of Concept“ als erfolgreich abgeschlossen.

Literaturverzeichnis

- [Bu18] Buhk, J-H.: Düngungsplanung gemäß DüV (2017) – Simultan kostenminimierende Allokation von Wirtschafts- und Handelsdüngemitteln (Prototypische LP-Entscheidungshilfe). Masterarbeit, Institut für Agrarökonomie, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 2018.
- [BM17] BMEL, Bundesmin. für Ernährung u. Landwirtschaft: Düngeverordnung. 2017.
- [BM18] BMEL, Bundesmin. f. Ernährung u. Landwirtschaft: Stoffstrombilanzverordnung. 2018.
- [LK18] LKSH, Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein: Richtwerte für die Düngung 2018.
- [Su80] Sundermeier, H.-H.: Düngungskostenminimierung. Diss., Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 1980.
- [WG17] Wörle, M.; Gaugler, T.: IT-gestützte Optimierung der Düngelplanung in kleinen und mittleren landwirtschaftlichen Betrieben: Ein nachhaltiger Ansatz zur Steigerung des Betriebsergebnisses. In (Ruckelshausen, A. et.al., Hrsg.): Referate der 37. GIL-Jahrestagung in Dresden, Bonn, S.169-172, 2017.