

Überbetriebliche Optimalplanung der Düngung mit gemischt-ganzzahliger Linearer Programmierung

Hanna Kühl¹, Jan-Hendrik Buhk¹ und Hans-Hennig Sundermeier¹

Abstract: Die Düngeverordnung zwingt die landwirtschaftliche Praxis zu sorgfältiger Planung aller Düngungsmaßnahmen. Ein hierfür entwickelter Optimierungsansatz basiert methodisch auf gemischt-ganzzahliger Linearer Programmierung und wurde bisher nur einzelbetrieblich erprobt [BS19a; BS19b; La19]. Der vorliegende Beitrag skizziert die konzeptuelle Erweiterung für eine überbetriebliche Optimalplanung und präsentiert erste Ergebnisse. Kooperieren Betriebe mit latentem Wirtschaftsdüngerüberhang mit Betrieben mit Wirtschaftsdünger aufnehmenpotenzial, so lassen sich trotz erheblich gesteigerter Problemkomplexität überbetrieblich optimierte, verordnungskonforme Allokationsempfehlungen ermitteln, die den Handelsdüngereinkauf weiter reduzieren können. Der Planungsansatz eröffnet damit gerade in Regionen mit starkem Wirtschaftsdünger- und Gärrückstandsanfall weiteres Potenzial zur Umweltschonung.

Keywords: Düngeverordnung, DüV, Düngungsplanung, überbetriebliche Optimalplanung, Lineare Programmierung, MILP

1 Einleitung

Die Düngeverordnung (DüV vom 26.05.2017; [BM17]) verpflichtet landwirtschaftliche Betriebe zur Düngedarfsermittlung für N und P₂O₅ für jeden Schlag bzw. jede Bewirtschaftungseinheit und zur Planung aller Einzelmaßnahmen vor Beginn des Düngungsjahrs. Sie normt die Daten zum Nährstoffbedarf, zur Nährstoffzu- und -abfuhr, zum Nährstoffanfall aus der Tierproduktion, Vorschriften zur Lagerung von Wirtschaftsdüngern und Gärrückständen aus Biogasanlagen und zeitliche sowie technische Beschränkungen der Düngerausbringung und kodifiziert die Aufzeichnungs- und Nachweispflichten.

Was im Anhang der Düngeverordnung auf den ersten Blick wie ein umfassendes pflanzenbauliches Tabellenwerk für eine Vielzahl von unterschiedlichen Fallsituationen – mit länderspezifischen Sonderregelungen – aussieht, erweist sich für die Planungspraxis als schwer handhabbares Beschränkungsgeflecht. Vereinzelte Planungshilfen (eine Typenauswahl enthält [BS19b]) unterstützen die Rechenwege mit heuristischen partiellen Vorgehensweisen. Insbesondere örtliche und zeitliche Befahrbarkeitsspielräume der Einzelschläge im Zusammenhang mit zeitlichen Verfügbarkeits-, Lager- und Nährstoffwirksamkeitsannahmen für verschiedene Wirtschaftsdünger und Gärrückstände sind mit einfachen, sequentiellen Kalkulationsverfahren nicht systematisch zu berücksichtigen.

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

Gerade im gezielten, möglichst effizienten Einsatz des anfallenden Wirtschaftsdüngers als Substitut für kostenträchtigen Zukauf von Handelsdünger steckt ein bisher nicht vollständig erschlossenes wirtschaftliches Verbesserungspotenzial. Administrativer Druck durch gesetzlichen Umwelt- und Gewässerschutz sowie bestmögliche Ausschöpfung wirtschaftlicher Reserven waren Hauptmotive für die Entwicklung einer prototypischen Entscheidungshilfe für die praktische Düngeplanung.

Die Anforderungen an die mathematische Methode ergeben sich einerseits aus der Problemkomplexität – die schlag- und kulturspezifischen Bedarfswerte für Makronährstoffe lassen sich durch viele Mengenkombinationen aus betrieblich vorhandenen Wirtschaftsdüngern und regionstypischen Handelsdüngern decken – und andererseits durch die angestrebte Umsetzbarkeit für die Planungspraxis – technische Mindestmengen für jede einzelne Düngergabe sind genauso wichtig wie degressive Ausbringungskosten. Kommen Wirtschaftsdünger zum Einsatz, so lässt sich deren optimaler zeitlicher und schlagspezifischer Einsatz nur durch simultane Prüfung aller zulässigen Düngertyp- und Mengenkombinationen und ggfs. unter gleichzeitiger Berücksichtigung zeitlicher Anfallsvorgaben und Lagerbeschränkungen ermitteln.

Diese Vorüberlegungen führten zur gemischt-ganzzahligen Linearen Programmierung (MILP, mixed-integer linear programming) als Lösungsalgorithmus und zur Abbildung aller fallspezifischen Kombinations- und Substitutionsmöglichkeiten innerhalb des verordnungsbegrenzten Beziehungsgeflechts als LP-Matrix. Die kombinatorische und mengenmäßige Alternativenprüfung wird gemäß Kostenminimierungsregel so lange fortgesetzt, bis sich keine günstigere Allokation der Düngemittel findet. Die ersten Modelleinsätze in Fallstudien (s. [BS19a], [BS19b], [La19]) belegten als „proof of concept“ die Machbarkeit und erfüllten alle Erwartungen bezüglich Methodeneignung und Ergebnisqualität. Eine weitere Studie [BSL19] untersuchte die Bedeutung unterschiedlicher Lagerkapazitäten für die optimale zeitliche Wirtschaftsdüngerallokation im Düngejahr.

2 Überbetriebliche Düngungsplanung: Konzepterweiterung

Die positiven Einsatzerfahrungen in Einzelbetrieben mündeten in einen überbetrieblichen Optimierungsansatz. Leitfragen beim Konzeptausbau waren: a) Welche zusätzlichen Modellierungen sind neben der wachsenden Zahl der Schläge notwendig, b) Kommen trotz erweiterter Komplexität noch praktikable Ergebnisse zustande und c) Welche Einsparungen lassen sich durch gesteigerte exogene Wirtschaftsdüngerzufuhr bei gleichbleibenden Ertragsannahmen verordnungskonform erschließen? Insbesondere der letzte Aspekt verdient besondere Beachtung: Kooperieren Betriebe mit latentem Wirtschaftsdüngerüberhang mit Betrieben mit Wirtschaftsdünger aufnehmenpotenzial, so ließen sich nicht nur allseits verordnungskonforme Allokationsempfehlungen ermitteln, sondern auch zusätzlich der Handelsdüngereinkauf insgesamt, die Ausbringungskosten sowie Nährstoffüberschüsse weiter reduzieren.

Abbildung 1 skizziert schematisch die Modellkonstituenten im Einzelbetrieb als auch im Zusammenspiel aller beteiligten Betriebe. Jede Hinzunahme eines weiteren Betriebes erschwert oder erleichtert (je nach Fruchtartenverhältnis und Nährstoffversorgung der Flächen) die verordnungskonforme Düngerallokation. Der „action room“ (= mathematischer Möglichkeitenraum aller Entscheidungsalternativen) wächst in jedem Fall und mit ihm die Modellkomplexität. Damit wachsen auch die Chancen, für alle Betriebe insgesamt abgestimmte, wirtschaftliche und verordnungskonforme Allokationsoptima zu finden.

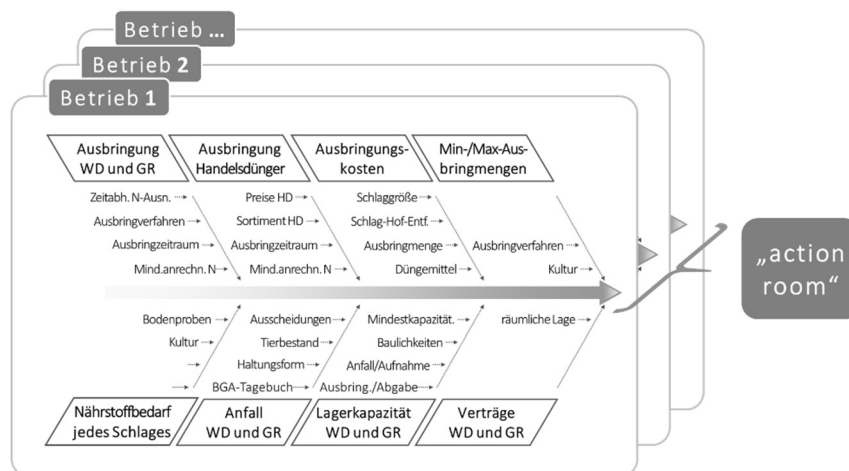


Abb. 1: Vereinigung der betriebsspezifischen Handlungsalternativen, Beschränkungen und Datenannahmen im überbetrieblichen „action room“ (verändert nach [BS19a])

Quantitativ erprobt wurden diese Überlegungen anhand der Daten einer hypothetischen Kooperation von fünf Betrieben mit insgesamt ca. 1.200 ha Ackerfläche in benachbarter Lage (die maximale Entfernung zwischen den insgesamt 55 Schlägen betrage ca. 25 km) [Kü19]. Die Gruppe betreibt unter gemeinsamer Arbeitsorganisation Marktfruchtbau und habe sich vertraglich zur Aufnahme des Gärrückstands einer Biogasanlage und des in einem der Betriebe anfallenden Hühnertrockenkots verpflichtet. Die Abbildung dieser Fallkonstellation ergibt eine „sparse“-Matrix mit ca. 7.000 Aktivitäten (davon sind knapp die Hälfte 0/1-Variablen) und ca. 3.600 Restriktionen. Neben den obligatorisch zu verwertenden Wirtschaftsdüngern (Gärrückstand und Hühnertrockenkot) standen 18 ortstypische Handelsdünger (Ein- und Mehrnährstoffdünger) zur Auswahl.

Zusätzlich zu den schlagspezifischen Optimalplänen für das Düngjahr sollte auch ermittelt werden, zu welchen Konditionen über die vertraglich vereinbarte Menge hinaus weitere Gärrückstandsmengen verwertet werden könnten. Die „Knappheit“ bzw. das „Überangebot“ repräsentierten Verrechnungspreise von 5 Euro/m³ bzw. Vergütungen bis -15 Euro/m³ – jeweils unverändert über das Düngjahr. Düngerechtlich wurde differenziert: Gelten die gesamtbetrieblichen Nährstoffgrenzen (170 kg N_{org}/ha bzw. Nährstoffvergleich) für jeden Betrieb mit seinen angestammten Flächen jeweils einzeln (Sichtweise A) oder sind nur „globale“, betriebsübergreifende Beschränkungen über alle eingebrachten

Flächen (Sichtweise B) zu berücksichtigen. Um allein düngerechtliche Unterschiede herauszuarbeiten, erfolgte die Allokation der Düngemittel in beiden Szenarien über alle Schläge. Die Einhaltung anderer Vorgaben, wie z. B. des Greenings, wurde aufgrund der Exogenität der Kulturenauswahl in beiden Sichtweisen nicht geprüft.

3 Ergebnisse

Abbildung 2 repräsentiert die mengenmäßige Aufnahmefähigkeit der in der Kooperation zusammengefassten Flächen bei unterschiedlichen Annahmen bezüglich Verrechnung zusätzlicher Mengen (im Intervall +5 ... -15 Euro/m³). Bei düngerechtlicher Trennung der Flächen (Sichtweise A) ist ein kostenträchtiges Gärrückstandsangebot nicht attraktiv. Erst wenn ein finanzieller Anreiz (Vergütung > 0 Euro/m³) die enthaltenen Nährstoffe begleitet, kann mehr Gärrückstand durch die Teilkompensation der Ausbringungskosten aufgenommen werden. Bei etwa 17.000 m³ zusätzlicher Abnahme scheint das Nährstoff-Aufnahmepotenzial ausgeschöpft.

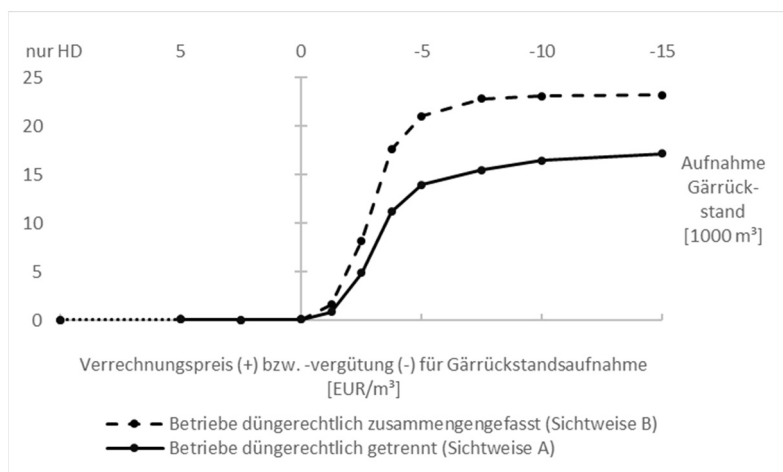


Abb. 2: Änderung der Aufnahmemenge bei Variation des Verrechnungspreises bzw. der Verrechnungsvergütung für Gärrückstand

Alle Flächen zusammen könnten also etwa 15 m³/ha Gärrückstand zusätzlich zum obligatorisch auszubringenden Gärrückstand (ca. 10 m³/ha) und Hühnertrockenkot (ca. 0,5 t/ha) aufnehmen. Die hypothetische Sichtweise B erhöht durch ihre geringere Restriktivität in der Nährstoffbilanzierung das Aufnahmepotenzial aller Flächen bei zusätzlicher Vergütung auf etwa 23.000 m³ (ca. 20 m³/ha).

Abb. 3 spiegelt das wirtschaftliche Potenzial der Gärrückstaufnahme bei unterschiedlichen Verrechnungspreisen wider. Grundsätzlich senkt diese mit steigender Vergütung

die Gesamtdüngungskosten in beiden Sichtweisen. Eine düngerechtliche Zusammenfassung der Betriebe (Sichtweise B) eröffnet weiteres Einsparpotenzial bei den Düngungskosten insbesondere bei Vergütungen einer Wirtschaftsdüngeraufnahme im aufnehmenden Betrieb. Der nahezu lineare Verlauf dieses Zusammenhangs bei hoher Vergütung resultiert aus der Kompensation der schlechteren Verwertung des zusätzlichen Gärrückstandes durch diese hohen Vergütungen. Der Mehrnährstoffdünger „Gärrückstand“ wird in diesem Fall vermehrt zur Düngung einzelner Nährstoffe eingesetzt.

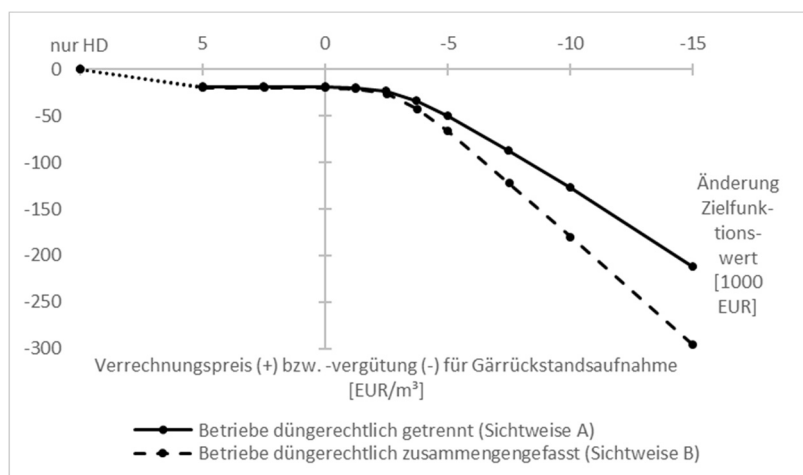


Abb. 3: Änderung des Zielfunktionswertes bei Variation des Verrechnungspreises bzw. der Verrechnungsvergütung für Gärrückstand

Ausgehend vom Referenzszenario (Erfüllung der Bedarfswerte ausschließlich über Handelsdünger) senkt die Ausbringung des bzw. der vertraglich obligatorisch aufzunehmenden Hühnertrockenkotes und Gärrückstände bei düngerechtlicher Trennung den Zielfunktionswert. Zusätzlicher Gärrückstand wird noch nicht aufgenommen, da dessen Wert sehr nah an seinen Ausbringungskosten liegt (vgl. Abb. 2). Eine zusätzliche Vergütung aufgenommenen Gärrückstandes kann die Ausbringungskosten teilweise decken, erhöht seine Aufnahmemenge und senkt damit den Zielfunktionswert. Allein die düngerechtliche Zusammenfassung schafft kostengünstigere Ausbringungsalternativen und senkt somit den Zielfunktionswert weiter.

4 Fazit und Ausblick

Unser Modellierungsansatz erweist sich auch bei einer erheblich komplexeren überbetrieblichen Problemstellung zur Düngungsplanung als ohne erkennbare Einschränkungen einsetzbar und praxistauglich. Er ist geeignet, die existenten Verordnungsnormen und Rechenregeln lückenlos abzubilden und bietet Mehrwerte durch bestmögliche Nutzung der Nährstoffe in den Wirtschaftsdüngern sowie durch die Substitution von Handelsdüngern.

Basierend auf Fallstudien von fünf hypothetisch kooperierenden Betrieben haben wir den Verrechnungswert für Gärrückstand – stellvertretend für Wirtschaftsdünger allgemein – im praxisüblichen Bereich von einem Zukaufpreis von 5 Euro/m³ bis zu einer Aufnahmevergütung von -15 Euro/m³ parametrisiert. Wie zu erwarten war, steigt die Gärrückstandsaufnahme mit zunehmender Vergütung durch abgebende exogene Betriebe. Der wirtschaftliche Vorteil nimmt allerdings infolge der Nährstoffbilanzierungsgrenzen und schlechterer Stickstoffwirkungsäquivalente mit zunehmender Menge ab.

Bei anhaltendem, regional konzentriertem Anfall von Wirtschaftsdünger aus der Tierproduktion und Biogasanlagen lässt sich für überbetriebliche Zusammenschlüsse die Wirtschaftsdüngerverwertung spatial und temporal verordnungskonform und kostenminimal ermitteln. Ob diese situationspezifisch optimierten Empfehlungen tatsächlich zustande kommen, entscheiden letztlich die beteiligten Betriebsleiter. Die Bilanzierungsvorschriften vermehren die Transporte auf noch aufnahmefähige Flächen. Diese sind für die jeweils betrachtete Fallkonstellation kostenminimal – ihre gesellschaftliche Akzeptanz bleibt jedoch trotz Vorteilen für die Umwelt abzuwarten.

Literaturverzeichnis

- [BM17] Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, Deutschland (2017). Düngeverordnung. www.bmel.de/DE/Landwirtschaft/Pflanzenbau/Ackerbau/_Texte/Duengung.html
- [BSL19] Buhk, J.-H.; Sundermeier, H.-H.; Latacz-Lohmann, U.: Nitratrichtlinie und Wirtschaftsdüngerallokation: Folgen veränderter Lagerkapazitäten. In (Grötzer, M et al., Hrsg.) Perspektiven wertebasierter Wertschöpfungsketten - Perspectives on Values-based Supply Chains: Tagungsband der 29. Jahrestagung der Österreichischen Gesellschaft für Agrarökonomie in Innsbruck, 2019, S. 51-52.
- [BS19a] Buhk, J.-H., Sundermeier, H.-H.: Düngungsoptimum digital: Entscheidungs-„Navi“ gemäß Düngeverordnung in Sicht. <https://www.hochschultagung.ae.uni-kiel.de/de/beitraege/langfassung-2019>, Stand: 30.10.2019.
- [BS19b] Buhk, J.-H.; Sundermeier, H.-H.: Düngungsplanung mit gemischt-ganzzahliger Linearer Programmierung: bedarfsgerecht, betriebsspezifisch, kostenminimal und verordnungskonform. In (Meyer-Aurich, A. et. al., Hrsg.): Referate der 39. GIL-Jahrestagung in Wien, 18.-19. Februar 2019: Digitalisierung für landwirtschaftliche Betriebe in kleinstrukturierten Regionen – ein Widerspruch in sich? Lecture Notes in Informatics (GI Lecture Notes) 287, S. 31-36, 2019.
- [Kü19] Kühl, H.: Überbetrieblich optimierte Düngungsplanung mit gemischt-ganzzahliger Linearer Programmierung – Fallstudie. Masterarbeit, Institut für Agrarökonomie, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 2019.
- [La19] Lange, S.: Optimierte Wirtschaftsdünger-Allokation für einen Veredlungsbetrieb bei Vornutzung der tierischen Exkremente in einer Biogasanlage. Bachelorarbeit, Institut für Agrarökonomie, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 2019.