

# LP-gestützte operative Optimal-Planung von Biogasbetrieben

Andreas Otte, Johannes Steffens, Hans-Hennig Sundermeier

Institut für Agrarökonomie  
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel  
24098 Kiel  
hsundermeier@lbv-net.de

**Abstract:** In Biogasbetrieben werden mengenmäßig mehr oder weniger stark begrenzte Substratvorräte zur Gas- oder Stromproduktion eingesetzt. Aus der quantitativen Begrenztheit ergibt sich auf betrieblicher Ebene ein zeitliches Allokationsproblem, da die Substrate unter Berücksichtigung der fallspezifischen technischen, biologischen und wirtschaftlichen Einflussfaktoren im Zeitverlauf möglichst optimal verwertet werden sollen. Der Beitrag beschreibt die Entwicklung eines operativen Planungsmodells auf Basis der Linearen Programmierung sowie die Ergebnisse erster ökonomischer Optimierungskalkulationen unter verschiedenen Preis- und Mengenannahmen. Die Ergebnisse dieser Testrechnungen weichen zum Teil erheblich von praktizierten Gewohnheiten zur Anlagenführung ab.

## 1 Einleitung und Problemstellung

Das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG, letzte Novellierung 2012) und das Stromeinspeisungsgesetz von 1991 bilden die wirtschaftliche bzw. rechtliche Basis für die dezentrale Stromproduktion aus Biogas. Die Zahl der Biogasanlagen ist im letzten Jahrzehnt stark gestiegen und liegt derzeit im Bundesgebiet bei etwa 7.500 Anlagen. Begünstigt wurde der Biogasanlagenboom u. a. auch durch Phasen relativ niedriger Preise für Agrarprodukte, in denen der Anbau von Biogas-Substrat-Pflanzen (vorwiegend Silomais) wirtschaftlich sehr attraktiv war. Durch zunehmende Anlagendichte, steigende Preise für Agrarprodukte, unterschiedliche vertragliche Bindung der Substratlieferanten an die Biogasbetriebe und unterschiedliches Management-Knowhow wurde manche monetäre Annahme zum Anlagenbetrieb inzwischen hinfällig.

Biogasbetriebe scheinen betriebswirtschaftlich relativ einfach strukturiert: aus wenigen Produktionsmitteln (im Wesentlichen Gärsubstrate und Hilfsstoffe) entstehen in einer stationären Anlage wenige „Produkte“: Gas, Strom, Wärme und Gärreste. Der Stromabsatz ist mit gesetzlich garantierten Einspeisevergütungen langfristig gesichert; für die übrigen Produkte und eingesetzten Produktionsmittel bestehen jedoch Beschaffungs- und Absatzrisiken, Preis-, Mengen- und Qualitätsschwankungen sowie Verwertungsabhängigkeiten durch Anlagen- und Kapazitätsgrenzen. Obligatorische Substratbeschaffung und Gärrestabgabe verstärken den Wettbewerb um betriebsnahe Flächen; zeitliche Aus-

lastung und wirtschaftlich effizienter Betrieb der Biogasanlagen werden zu betriebswirtschaftlich anspruchsvollen Führungsaufgaben.

Im Zuge der Anlagenverbreitung entstanden neben speziellen Entscheidungshilfen für das Investitionskalkül, für die logistische Optimierung, für die biologisch-technische Prozessoptimierung der Biogasanlagen auch spezielle Auswertungssysteme zur Finanzbuchführung und für das Benchmarking von Biogasbetrieben. Produktionswirtschaftliche Entscheidungshilfen über situationsspezifische maximale Zukaufs- und minimale Verkaufspreise von Substraten, Abgabepreise von Gärresten bzw. über die monetäre Verwertung der Substrate in der Biogasanlage sind dagegen seltener. Eine kurzfristige operative Planungshilfe, die wie der nachfolgend vorgestellte Optimalplanungsansatz mit Hilfe Linearer Programmierung insbesondere das intertemporale Allokationsproblem über die Zeit adressiert (wann werden welche Substratmengen in Abhängigkeit von aktuellen situationsspezifischen wirtschaftlichen und technischen Parametern eingesetzt?) ist den Autoren nicht bekannt.

## **2 Modellkonstituenten für eine operative Optimal-Planung**

Im Normalfall sind eine gleich bleibende Beschickung, eine hohe Auslastung und möglichst unterbrechungsarmer Betrieb der Biogasanlage anzustreben. Wie soll jedoch ein Anlagenbetreiber reagieren, wenn Mengen, Preise und Qualitäten der Substratversorgung durch Missernten oder regionale Überangebote schwanken? Bei welchen Mindestpreisen ist der Verkauf von Substratvorräten wirtschaftlich günstiger als die Verwertung in der eigenen Anlage? In welchem Umfang sollte die Gasproduktion ggfs. gedrosselt werden, um in einer Mangelsituation Substrate nicht überteuert zukaufen zu müssen? Zu welchen Maximalpreisen und in welchem Umfang ist der Einsatz temporärer lokaler Substratangebote vorteilhaft? In welchen Grenzen (Abnahmevergütung bzw. Verkaufspreis) ist die Gärrestabnahme wirtschaftlich sinnvoll?

Anlagengröße, Fermentervolumen, Kapazität von Nachgärbehälter und Gärrestlager sowie Auslegung des/der BHKWs bilden die Eckpunkte für den einzelbetrieblichen Aktionsraum im Biogasbetrieb. Zentrale Abbildungsgegenstände sind die prozessbiologischen Restriktionen (Raumbelastung, hydraulische Verweilzeit), die biologisch-technischen Eigenschaften der eingesetzten Substrate, elektrische und thermische Wirkungsgrade, die physikalischen Restriktionen wie Eigenwärmebedarf und Fließfähigkeit der Fermenterflüssigkeit, Vorräte, Einsatzmengen, Qualitäten und ggfs. Preise der einzusetzenden Substrate, Vergütungen bzw. Kosten abzusetzender Gärreste, Biogasproduktion, Stromverkauf, Reparaturkosten sowie Wärmeproduktion und –verkauf. Die Zielfunktion maximiert den erzielbaren Einnahmen-Ausgaben-Überschuss.

Die o. g. Modellkonstituenten wurden in einem mehrperiodigen, deterministischen linearen Optimierungsmodell berücksichtigt. Der hier zur Verfügung stehende Platz erlaubt auch nicht annäherungsweise eine vollständige Wiedergabe des Gleichungssystems. Einige Eckdaten einer prototypisch abgebildeten Nassgäranlage mit Vor-Ort-Verstromung mögen den Optimierungsgegenstand veranschaulichen: 526 kW elektrische Leistung, 3.810 m<sup>3</sup> nutzbares Gärvolumen, 4.994 m<sup>3</sup> Endlagervolumen, Lagerfläche für feste

Substrate bis zu 15.000 t FM, Lagerraum für flüssige Substrate bis zu 1.500 t FM; als Substrate kommen Mais, Gras, GPS sowie Rindergülle zum Einsatz.

Phänomene mit offensichtlich nichtlinearen Beziehungen (z. B. Überlauf- und Raumbelastungsverluste) wurden in Intervalle separiert und linear approximiert. Binäre Hilfsvariablen stellen sicher, dass nur jeweils ein Intervall berücksichtigt wird. Die Annahmen zur Stromvergütung basieren auf dem EEG 2009.

Der Planungshorizont beträgt maximal ein Jahr, wobei wir eine Periode vom 1.12. bis zum 30.11. als sinnvoll erachten (Zeitpunkt des Siloanbruchs der neuen Ernte). Die Planungsperiode wird anschaulich in die Kalendermonate unterteilt, so dass auch jahreszeitliche Parameteränderungen (z. B. der Substratpreise, des Eigenwärmebedarfs, der Wärmevergütung) berücksichtigt werden können. Transferaktivitäten und Hilfsrestriktionen bilden periodenübergreifende Zusammenhänge ab. Damit die Optimalplanung zu jedem beliebigen Zeitpunkt – etwa nach Bekanntwerden neuer Marktdaten – einsetzbar ist, ist eine Momentaufnahme des jeweils aktuellen Anlagenzustandes in einem „Startvektor“ notwendig. Im Normalfall ist zum Planungsende eine Fortsetzung des laufenden Betriebs anzunehmen; diese ist ebenfalls in einem „Endvektor“ abzubilden. Das vorstehend skizzierte Gleichungssystem des Optimierungsmodells – die Detaildarstellung beschreibt Otte [Ott12] – wurde in zusammenhängenden Excel-Tabellen realisiert und erreicht bei 12-monatigem Planungshorizont eine Größenordnung von ca. 700 Aktivitäten und 600 Restriktionen. Bei den Test- und Szenariokalkulationen kam ein kommerzieller LP-Lösungsalgorithmus (Frontline Solver Pro) zum Einsatz.

### 3 Ergebnisaufbereitung

Die nicht weiter aufbereiteten Ergebnis- und Sensitivitätsberichte erreichen bei derartigen Matrixgrößen schnell einen Umfang von über 50 A4-Seiten: Derartige „Monsterberichte“ sind schwer zu lesen und der Betriebsleitungspraxis nicht zumutbar. In einem weiteren Projektteil entwickelte Steffens [St12] eine leicht verständliche Zusammenfassung der relevanten Ergebnisse auf einem Faltblatt im A3-Format (vier A4-Seiten). Dieser „Planungs-Report“ für Anlagenbetreiber basiert ebenfalls auf Excel-Makros, liest aus den Ergebnis- und Sensitivitätsberichten die wichtigsten Daten aus und bereitet sie in übersichtlichen Tabellen und Diagrammen auf.

Das Deckblatt enthält die Daten zur Identifizierung des Planungsfalls sowie die technischen Daten zur Anlage und zum Betrieb. Der Hauptteil des „Planungs-Reports“ enthält im A3-Querformat für jeden einzelnen Monat der Planungsperiode die Einsatzmengen der Substrate, der Prozesswärme und des Eigenstromverbrauchs, die Lagerbestände, Arten und Mengen der Zu- und Verkäufe, Strom-, Wärme- und Gärrestproduktion, Kennzahlen zum Gärprozess (Verweilzeit, Raumbelastung, Biogasausbeute) und zum BHKW (Arbeitsausnutzung), monetäre Leistungen und variable Kosten sowie den Deckungsbeitrag pro Monat bzw. kumuliert. Die Annahmen zum Wärmekonzept, zur Ausgangssituation („Startvektor“) und zum angestrebten Endzustand („Endvektor“) vervollständigen die Darstellung. Die Rückseite des Faltblatts gibt Auskunft über kritische Substratpreise (maximale Zukaufspreise, minimale Verkaufspreise).

## 4 Ergebnisse der Szenarienkalkulation und Fazit

Erste Testrechnungen [St12] ergaben: Bei niedrigem Preisniveau für Substrate wird die Anlage wie erwartet unter Volllast betrieben. Bei steigenden Substratpreisen wird die Anlage sukzessiv in ihrer Leistung gedrosselt: das Modell empfiehlt, wie stark und wie lange die Leistung der Anlage reduziert werden soll.

Die kritischen Substratpreise geben für jeden Monat an, zu welchen Konditionen Substrate zugekauft werden könnten, um den Deckungsbeitrag der Anlage zu steigern. Würden Substrate zu höheren Preisen beschafft, säne der Deckungsbeitrag. Der Betreiber müsste trotz höherer Stromproduktion auf Deckungsbeitrag verzichten. Die kritischen Substratpreise werden für alle Substrate berechnet; somit helfen sie dem Betreiber bei der Frage, bei welcher Preiskonstellation die Substitution eines Substrats durch ein anderes, unter Berücksichtigung sämtlicher Einflussfaktoren, wirtschaftlich sinnvoll wäre. Mit Hilfe einer parametrischen Programmierung, bei der der Preis für Maissilage sukzessiv gesenkt wurde, konnte ein typischer Substitutionsprozess verdeutlicht werden.

Zusammenfassend ist festzustellen: Problemauffassung und Methodenwahl führten zu einer praktikablen Abbildung des Planungsproblems. Die entwickelte Entscheidungshilfe scheint sich zur Lösung praktischer Planungsprobleme zu eignen. Bisher wurde zunächst ein Prototyp dieser Planungshilfe für typische Praxisfälle (EEG 2009, ca. 500 kW BGA, etc.) erstellt. Eine Erweiterung des Planungsmodells für weitere EEGs und andere Anlagentypen (z. B. Gaseinspeisung) und –größen steht noch aus. Der hierfür notwendige Entwicklungsaufwand scheint gerechtfertigt. Die Dateneingabe des Planers hat vor allem in Bezug auf die prognostizierten Marktpreise für Gärsubstrate einen erheblichen Einfluss auf die Planungsergebnisse. Je besser die Annahmen des Planers sind, desto genauer kann die optimale Betriebsweise der Anlage berechnet werden.

Nicht-lineare prozessbiologische Eigenschaften (z. B. Gasverluste durch Verweilzeit und Raumbelastung) werden approximiert. Die Ergebnisse der Szenario-Kalkulation deuten darauf hin, dass die gewählte Intervalleinteilung für Testrechnungen zur Modellreagibilität ausreichend ist. Bei einer weiteren Verwendung sollten die Approximierungsintervalle jedoch enger gewählt werden. Sollen weitere Substrate in das Modell aufgenommen werden, so muss auch diesbezüglich eine Anpassung stattfinden. Die Ergebnisse zeigen, dass das Planungsmodell sinnvolle Allokationen der Substrate im Zeitablauf ermittelt. Eine Erweiterung des Modells und ein Praxiseinsatz können empfohlen werden.

## Literaturverzeichnis

- [Ot12] Otte, A., Matrizingenerierung für eine LP-gestützte operative Optimalplanung von Biogasbetrieben (Prototyp), MSc-Arbeit, Institut für Agrarökonomie, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Mai 2012.
- [St12] Steffens, J., Ergebnisaufbereitung und Szenarienkalkulation für eine LP-gestützte operative Optimalplanung von Biogasbetrieben (Prototyp), MSc-Arbeit, Institut für Agrarökonomie, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Mai 2012.