

Wildpflanzen-Samen in der Biogas-Anlage: Screening des Überlebensrisikos verschiedener Arten

Wildflower seeds in the biogas reactor: Screening the risk of survival of different species

Juliane Hahn*, David Parzych, Julia Schulz, Paula R. Westerman, Bärbel Gerowitt

Universität Rostock, Phytomedizin, Satower Straße 48, 18059 Rostock

*Korrespondierende Autorin, juliane.hahn2@uni-rostock.de

DOI 10.5073/jka.2018.458.006



Zusammenfassung

Wenn Pflanzen-Samen in eine Biogas-Anlage gelangen, besteht das Risiko, dass sie die anaerobe Vergärung überleben und mit Ausbringung des Gärrestes verbreitet werden. Neuerdings kommt durch den Einsatz von Blümmischungen eine Vielzahl von Wildpflanzen-Samen mit dem Biogas-Prozess in Kontakt. Das von diesen Arten ausgehende Kontaminationsrisiko lässt sich derzeit nicht verlässlich abschätzen, da systematische Forschung zur Überlebensfähigkeit von Pflanzensamen fast vollständig fehlt. Um dem abzuhelfen bietet sich die Überprüfung der Thermoresistenz der Arten an, da Temperatur und Verweildauer die wichtigsten Parameter sind, von denen das Überleben der Samen in Biogas-Anlagen abhängt.

Wir haben das Überleben von 11 Wildpflanzen-Arten aus verschiedenen Familien unter den Temperatur-Bedingungen einer mesophilen Biogas-Anlage mit einem Screening im Wasserbad untersucht. Die Samen wurden bei 42 °C und pH 7 in einer wässrigen Lösung inkubiert und ihre Lebensfähigkeit über einen Zeitraum von bis zu 18 Tagen bestimmt. Zur Validierung der Ergebnisse wurden Samen ausgewählter Arten einer anaeroben Vergärung bei 42 °C im Labormaßstab ausgesetzt.

Die mittlere Inaktivierungszeit unterschied sich bei 8 der 11 untersuchten Wildpflanzen-Arten signifikant, wobei 6 Arten nur sehr langsam bzw. nicht vollständig inaktiviert wurden. Bei diesen Arten besteht das Risiko, dass sie mit dem Gärrest verbreitet werden. Mit Hilfe des Wasserbad-Screenings ließ sich das Überlebensrisikos der Samen in der mesophilen, anaeroben Vergärung verlässlich abschätzen.

Stichwörter: Biogas-Reaktor, Temperatur, Thermoresistenz, Überlebens-Risiko, Wildpflanzen-Arten

Abstract

If plant seeds enter a biogas reactor there is the risk of surviving anaerobic digestion and spreading with the digestate application. Recently, a large number of wildflower species can enter the biogas chain due to the use of wildflower seed mixtures for the production of biogas. The contamination risk associated with these species cannot be reliably estimated as there is a lack of systematic research on the survival of seeds from different plant species. As seed survival in biogas plants mainly depends on temperature and exposure time, the investigation of the species' thermoresistance is a first step to close this gap of knowledge.

We investigated the survival of 11 wildflower-species from different families in a waterbath at 42 °C and pH 7, conditions that are usually encountered in a mesophilic biogas plant. Seeds were incubated in a buffer solution and their viability was determined during 18 days of exposure. Additionally, seeds of selected species were exposed to anaerobic digestion at 42 °C in an experimental reactor.

The mean inactivation time differed significantly between 8 species. Inactivation was very slow or even lacking for 6 species, suggesting that these species could be dispersed with the digestate. The waterbath-screening of thermoresistance allowed for reliable estimation of the probability of seed survival in mesophilic, anaerobic digestion.

Keywords: Biogas reactor, probability of survival, temperature, thermoresistance, wildflower species

Einleitung

Mit der Ernte von Biomasse gelangen auch Pflanzensamen in den Biogas-Reaktor. Wenn sie die anaerobe Vergärung überleben, besteht das Risiko, dass sie mit Ausbringung des Gärrestes verbreitet werden. In einer Literaturstudie identifizierten WESTERMAN und GEROWITT (2013) Wildpflanzen mit harten Samen (physikalische Dormanz), hoher Thermoresistenz, einer dicken Samenschale oder mit Anpassungen an Endozoochorie als Hochrisiko-Arten für das Überleben in Biogasreaktoren. Die Mechanismen hinter dieser erhöhten Widerstandsfähigkeit sind allerdings zumeist unbekannt. Studien umfassen nur wenige Arten. Systematische Forschung zur

Überlebensfähigkeit von Pflanzensamen fehlt fast vollständig (WESTERMAN und GEROWITT, 2013). Dies ist vor dem Hintergrund der zunehmenden Zahl an Herbizidresistenzen von (Mais-) Unkräutern (GEROWITT, 2012) und dem Einsatz von artenreichen Blümmischungen für die Biogasproduktion (z.B. www.saaten-zeller.de) problematisch, wenn man das Ziel verfolgt den Einsatz von Herbiziden zu verringern und Florenverfälschung zu vermeiden. Denn im Moment ist vollkommen unklar, ob das Risiko besteht, dass diese Arten überleben mit dem Gärrest verbreitet werden.

Für den Einstieg in die systematische Forschung zur Überlebensfähigkeit von Wildpflanzen-Samen im Biogas-Prozess bietet sich die Überprüfung der Widerstandsfähigkeit der Arten gegenüber der Temperatur an. Temperatur und Verweildauer sind die wichtigsten Parameter, von denen das Überleben der Samen in Biogas-Anlagen abhängt (WESTERMAN und GEROWITT, 2013). Aufbauend auf den Experimenten zur „Bedeutung der Temperatur für die Inaktivierung von Samen im Biogas-Reaktor“ (HAHN et al., 2016) haben wir in dieser Studie, die Thermoresistenz mehrerer Wildpflanzen-Arten aus verschiedenen Familien mit einem kostengünstigen und leicht reproduzierbaren Screening im Wasserbad verglichen.

Material und Methoden

Pflanzenmaterial

In Anlehnung an die Temperatur in mesophil betriebenen Biogasanlagen (HAHN et al., 2016) wurde das Überleben von Samen bei 42 °C am Beispiel von 11 verschiedenen Pflanzenarten untersucht (Tab. 1). Die Auswahlkriterien waren, dass (1) ein Eintrag in die Biogas-Prozesskette wahrscheinlich war, (2) möglichst viele verschiedene Pflanzen-Familien vertreten waren und (3) Arten mit Eigenschaften, die eine erhöhte Widerstandsfähigkeit gegenüber einer anaeroben Vergärung vermuten lassen.

Tab. 1 Untersuchte Pflanzenarten mit Familienzugehörigkeit, Eintragspfad in die Biogas-Anlage und Herkunft des Saatgutes für diese Studie.

Tab. 1 Examined plant species, plant family, pathway to enter a biogas-plant, and origin of seeds used in this study.

Familie	Art		Eintragspfad	Herkunft
Amaranthaceae	Chenopodium album	Weißer Gänsefuß L.	Mais-Unkraut	Aufs. D ^a
Apiaceae	Daucus carota	Wilde Möhre L.	Blümmischung ¹	HS ^b
Asteraceae	Ambrosia artemisiifolia	Beifußblättrige Ambrosie L.		Aufs. USA ^c
Asteraceae	Centaurea nigra	Schwarze Flockenblume L.	Blümmischung ¹	SZ ^d
Fabaceae	Melilotus officinalis	Gelber Steinklee (L.) PALL.	Blümmischung ¹	AW ^e
Malvaceae	Malva alcea	Rosen-Malve L.	Blümmischung ¹	AW ^e
Malvaceae	Malva sylvestris	Wilde Malve L.	Blümmischung ¹	SZ ^d
Poaceae	Cynodon dactylon	Bermudagrass (L.) PERS.		Kult. D ^f
Polygonaceae	Fallopia convolvulus	Windenknocherich (L.) Á. LÖVE	Mais-Unkraut	Aufs. D ^a
Polygonaceae	Polygonum aviculare	Vogelknocherich L.	Mais-Unkraut	Aufs. D ^a
Solanaceae	Lycopersicon esculentum	Tomate (L.), Sorte St. Pierre	Hygiene-Indikator ²	BH ^g

¹ Biogas-Blümmischung „BG70“ von Saaten Zeller^d; ³ Nachweis der phytohygienischen Unbedenklichkeit von Vergärungs- und Kompostierungsanlagen laut BioAbfV (BMU, 1998)

^a Aufsammlung auf Versuchsflächen der Universität Rostock (Deutschland) während der Kultivierung der Blümmischung „BG70“ 2014-2015; ^b Herbiseed Ltd., Twyford, UK; ^c Aufsammlung in Urbana, Illinois, USA, Oktober 2016 Illinois; ^d Saaten Zeller GmbH & Co. KG, Eichenbühl-Guggenberg, Deutschland; ^e Appels Wilde Samen GmbH, Darmstadt, Deutschland; ^f Ernte von Pflanzen im Treibhaus der Universität Rostock; ^g Bingenheimer Saatgut AG, Eczzell-Bingenheim, Deutschland

Screening bei 42 °C im Wasserbad

Für das Screening des Überlebensrisikos bei 42 °C wurden die Samen aller Arten in einer Pufferlösung in Präzisions-Wasserbädern inkubiert, die auf 0,1 °C genau regelbar waren (WB-6, Firma witeg Labortechnik GmbH, Wertheim, Deutschland). Die Samen wurden nach einer

Oberflächensterilisation in Reagenzgläsern mit 5 ml 0,5 M HEPES Puffer (pH 7,0) versetzt und für 1, 3, 6, 9, 12 und 18 Tage bei 42 °C inkubiert. Pro Art und Expositionszeit wurden mindestens drei Replikate mit je 50 Samen untersucht. Nach den verschiedenen Expositionszeiten wurde die Lebensfähigkeit der Samen mittels Tetrazolium-Färbung bestimmt.

Anaerobe Vergärung bei 42 °C im Labormaßstab

Zur Überprüfung der Ergebnisse aus dem Wasserbad-Screening wurden Samen der Arten *C. album*, *D. carota*, *L. esculentum*, *M. alcea* und *M. officinalis* einer anaeroben Vergärung bei 42 °C im Labormaßstab ausgesetzt wie in HAHN et al. (2016) beschrieben. Zusammengefasst wurden die Samen in feinmaschige Polyester-Beutel eingenäht und in vier Replikaten in die mit Maissilage und Rindergülle betriebenen Laborreaktoren eingebracht. Die Samen von *C. album*, *D. carota* und *L. esculentum* wurden für 1, 3, 6 oder 9 Tage, die von *M. alcea* und *M. officinalis* für 3, 9, 18 und 36 Tage vergoren. Nach den unterschiedlichen Expositionszeiten wurden zunächst die Keimungsraten der Samen 21 Tage lang überprüft. Anschließend wurde die Lebensfähigkeit der Samen, die in den 21 Tagen nicht keimten, mittels Tetrazolium-Färbung getestet (WESTERMAN et al., 2012b). Aus der Summe der gekeimten und der laut Tetrazolium-Test lebensfähigen Samen wurde der Anteil vitaler Samen errechnet. Als Kontrolle wurde die Keim- und Lebensfähigkeit von unbehandelten Samen bestimmt. Dazu wurden sie zwei Tage vor Beginn der Tests im Dunkeln angequollen.

Statistische Auswertung

Der Anteil vitaler Samen während der Expositionszeit wurde mit Hilfe des Pakets „drc“ (RITZ und STREIBIG, 2015) für R (R CORE TEAM, 2017) modelliert. Grundlage der Modelle war eine log-logistische Funktion mit einer unteren Grenze bei 0: $F(t) = d / (1 + \exp[b(\log(t) - \log(MIZ))])$, mit „b“ – Parameter, der proportional zur Steigung von „F“ bei der Inkubationszeit „t“ ist; „d“ – maximaler Anteil an vitalen Samen; „MIZ“ – mittlere Inaktivierungszeit (d.h., Zeit nach der die Hälfte der ursprünglich vitalen Samen inaktiviert wurde). Es wurde ein Modell für das Screening aller Arten in der wässrigen Lösung erstellt. Daneben wurde für jede der fünf Arten, die zusätzlich der anaeroben Vergärung ausgesetzt wurden, je ein Modell berechnet, dass die Inkubation in wässriger Lösung und in der anaeroben Vergärung umfasste. Das Signifikanz-Niveau für den Vergleich der Modellparameter zwischen den Arten oder den Inkubationsvarianten wurde auf $\alpha < 0,05$ festgelegt.

Ergebnisse

In der anaeroben Vergärung erfolgte die Inaktivierung der Samen von *C. album*, *L. esculentum* und *M. alcea* signifikant schneller als in der wässrigen Lösung (Tab. 2). Auch bei *D. carota* war eine tendenziell schnellere Abnahme im Reaktor zu erkennen. Einzig das Modell für *M. officinalis* ergab eine um eine Größenordnung höhere mittlere Inaktivierungszeit in der Vergärung.

Tab. 2 Mittlere Inaktivierungszeit (MIZ) und Standardfehler (SF) von Wildpflanzen-Samen bei Inkubation in einer Pufferlösung (pH 7) und in der anaeroben Vergärung in einem Laborreaktor bei jeweils 42 °C. Sterne geben signifikante Unterschiede in der MIZ einer Art zwischen Pufferlösung und Vergärung an ($\alpha < 0,05$).

Tab. 2 Mean inactivation time (MIZ) and standard errors (SF) of wildflower seeds that were incubated at 42 °C in a buffer solution (pH 7) or in an anaerobic digestion in an experimental reactor. Asterisks indicate significant differences in MIZ of a species between buffer solution and digestion ($\alpha < 0,05$).

Art	Puffer		*	Vergärung	
	MIZ	±SF (Tage)		MIZ	±SF (Tage)
C. album	10,8	± 0,2	*	7,1	± 0,1
D. carota	1,2	± 0,1		0,0	± 0,0
L. esculentum	8,5	± 0,2	*	1,8	± 0,1
M. alcea	2,8	± 0,2	*	0,6	± 0,1
M. officinalis	319,6	± 261,8	*	3160,0	± 1289,0

Im Wasserbad-Screening bei 42 °C verloren die Samen der verschiedenen Wildpflanzen-Arten ihre Vitalität unterschiedlich schnell (Abb. 1), wobei sich die mittlere Inaktivierungszeit (MIZ) bei 8 der 11 Arten signifikant unterschied (Tab. 3).

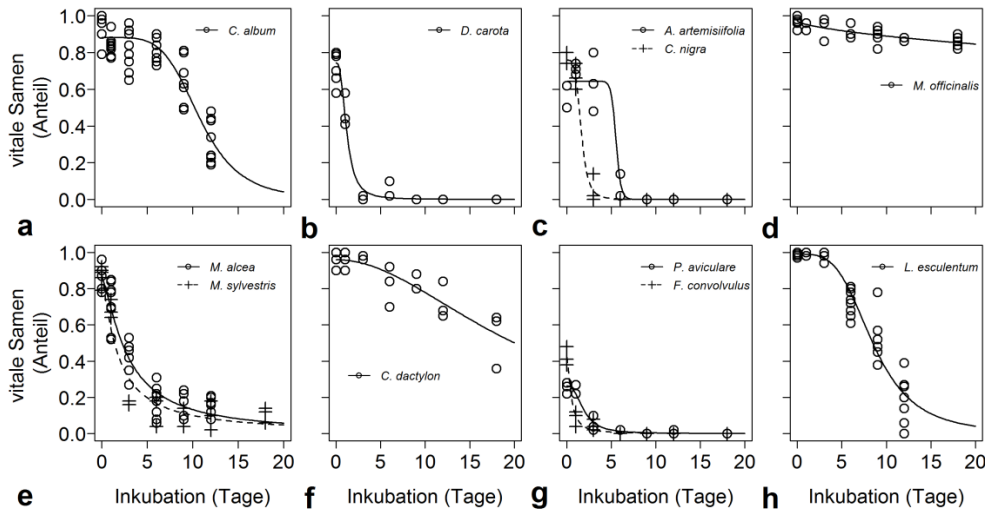


Abb. 1 Anteil vitaler Samen von Arten aus verschiedenen Pflanzenfamilien während der Inkubation in einer wässrigen Lösung mit pH 7 bei 42 °C. (a) Amaranthaceae, (b) Apiaceae, (c) Asteraceae, (d) Fabaceae, (e) Malvaceae, (f) Poaceae, (g) Polygonaceae, (h) Solanaceae.

Fig. 1 Proportion of viable seeds from species from different plant families during the incubation in a buffer solution with pH 7 at 42 °C. (a) Amaranthaceae, (b) Apiaceae, (c) Asteraceae, (d) Fabaceae, (e) Malvaceae, (f) Poaceae, (g) Polygonaceae, (h) Solanaceae.

Vertreter derselben Pflanzenfamilie zeigten einen ähnlichen Inaktivierungsverlauf (Abb. 1 c, e, g), was sich auch in einem gleichen „b“-Parameter der Modelle zeigte (Daten nicht gezeigt). Allerdings unterschied sich die MIZ zwischen den beiden Vertretern einer Familie signifikant (Tab. 3).

Tab. 3 Mittlere Inaktivierungszeit (MIZ) und Standardfehler (SF) von Wildpflanzen-Samen bei Inkubation in einer wässrigen Lösung mit pH 7 bei 42 °C. Kleinbuchstaben geben signifikante Unterschiede zwischen Pflanzenarten an ($\alpha < 0,05$).

Tab. 3 Mean inactivation time (MIZ) and standard error (SF) of wildflower seeds that were incubated in a buffer solution with pH 7 at 42 °C. Lowercase letters indicate significant differences between plant species ($\alpha < 0.05$).

Familie	Art	MIZ (Tage)	SF (Tage)	
Polygonaceae	<i>F. convolvulus</i>	0,5	0,2	a
Apiaceae	<i>D. carota</i>	1,2	0,1	a
Asteraceae	<i>C. nigra</i>	1,6	0,2	b
Malvaceae	<i>M. sylvestris</i>	1,7	0,2	b
Polygonaceae	<i>P. aviculare</i>	1,9	0,4	bc
Malvaceae	<i>M. alcea</i>	2,8	0,2	c
Asteraceae	<i>A. artemisiifolia</i>	5,6	1,1	d
Solanaceae	<i>L. esculentum</i>	8,5	0,2	e
Amaranthaceae	<i>C. album</i>	10,8	0,2	f
Poaceae	<i>C. dactylon</i>	20,9	1,9	g
Fabaceae	<i>M. officinalis</i>	319,6	261,8	h

Mit MIZ von mehr als 1 Woche waren *L. esculentum*, *C. album*, *C. dactylon* und *M. officinalis* (Tab. 3) am widerstandsfähigsten gegenüber der Inkubation bei 42 °C in wässriger Lösung. Zudem wurden die Samen dieser vier Arten und der beiden Malvaceen im Versuchszeitraum nie vollständig inaktiviert.

Diskussion

Aussagekraft des Screenings in wässriger Lösung für Überleben in anaeroben Vergärungsprozessen

Die Ergebnisse aus dem Wasserbad-Screening wurden im Laborreaktor insofern bestätigt, als dass die Inaktivierung der Samen im Reaktor gleich schnell oder sogar beschleunigt verlief. Das Screening in wässriger Lösung stellt demnach eine konservative Schätzung des Überlebensrisikos der Samen einer Wildpflanzen-Art in anaeroben Vergärungsprozessen bei 42 °C dar. Durch die über den Messzeitraum hinausgehende MIZ und die sehr großen Standardfehler bei *M. officinalis* wurde allerdings deutlich, dass bei Arten mit Hartschaligkeit (ROLSTON, 1978) ein Versuchsdesign mit einer höheren Anzahl von Probenahmen in der Zeit notwendig ist. So könnte auch der bei hartschaligen Arten vermutete zweiphasige Inaktivierungsverlauf (WESTERMAN et al., 2012c; HAHN et al., 2016) sinnvoll in einem (biphasischen) Modell abgebildet werden (BECKON et al., 2008).

Überlebensrisiko verschiedener Wildpflanzen-Samen bei 42 °C

Die Samen von fünf der untersuchten Wildpflanzen-Arten starben innerhalb von 18 Tagen bei 42 °C ab, während die Samen der sechs anderen nur langsam (MIZ > 7d) oder nicht vollständig inaktiviert wurden.

Die nur langsam abnehmende Lebensfähigkeit der Samen von *C. album* könnte in Kombination mit den in Praxisanlagen gelegentlich auftretenden sog. „Kurzschluss“-Stoffströmen dazu führen, dass geringe Prozentsätze von *C. album*-Samen die Vergärung überleben und mit dem Gärrest verbreitet werden. Verschärfend kommt hinzu, dass zum Teil große Mengen an Samen von *C. album* in Biogas-Anlagen gelangen (WESTERMAN et al., 2012a). Dies unterstreicht auch aus phytohygienischer Sicht die Notwendigkeit der Prozess-Kontrolle mit einer ausreichend langen Verweildauer des Substrates vor allem durch die Prävention von Kurzschluss-Strömen, um die ungewollte Verbreitung dieser und anderer Wildpflanzen zu verhindern. Ferner wurde auch in dieser Studie deutlich (HAHN et al. 2016), dass die Tomate sich nicht als Hygiene-Leitorganismus für die phytohygienischen Unbedenklichkeit von Vergärungsanlagen (laut BioAbfV 1998) eignet. Das Überlebensrisiko der Samen von *L. esculentum* lag unter dem von *C. album* und war damit nicht höher als das der meisten anderen Arten.

Die höchste Temperaturreistenz zeigte *M. officinalis*, ein Vertreter der Fabaceen, der ebenso wenig vollständig inaktiviert wurde, wie die beiden untersuchten Malvaceen. In beiden Familien tritt das Phänomen der Hartschaligkeit auf (ROLSTON, 1978; BASKIN et al., 2000), das zu einer ungewöhnlichen Widerstandsfähigkeit gegenüber anaerober Vergärung führen kann (WESTERMAN und GEROWITT, 2013). Es würde sich demnach empfehlen, solche Arten aus Biogas-Blümmischungen auszuschließen. Neben der Hartschaligkeit identifizierten WESTERMAN und GEROWITT (2013) auch Anpassungen an Endozoochorie als Hochrisiko-Faktor für das Überleben von Unkrautsamen in Biogasreaktoren. Dies könnte die überraschend langsame Inaktivierung der Samen der nicht-hartschaligen, aber endozoochor verbreiteten Poacee *C. dactylon* (BURTON und ANDREWS, 1948; ANDERSON et al., 2014) erklären. In anderen Studien wurden Samen von Poaceen schnell und vollständig inaktiviert (JEYANAYAGAM und COLLINS, 1984; LEONHARDT et al., 2010; BAUTE et al., 2016). Beim derzeitigen Kenntnisstand kann eine verlässliche Abschätzung des Überlebensrisikos daher nur auf Artebene erfolgen. Um in Zukunft Aussagen auf höheren taxonomischen oder funktionellen Ebenen zu ermöglichen, sollten sich weiterführende Studien mit der Art und Verbreitung der der Temperaturreistenz zugrundeliegenden Mechanismen befassen.

Danksagung

Diese Studie wurde vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) in Projekträgerchaft der Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) gefördert (FKZ 22401114).

Literatur

- ANDERSON, T.M., M. SCHÜTZ, A.C. RISCH und H.H. BRUUN, 2014: Endozoochorous seed dispersal and germination strategies of Serengeti plants. *Journal of Vegetation Science* **25**, 636–647.
- BASKIN, J.M., C.C. BASKIN und X. LI, 2000: Taxonomy, anatomy and evolution of physical dormancy in seeds. *Plant Species Biology* **15**, 139–152.
- BAUTE, K., D. ROBINSON, L. VAN EERD, M. EDSON, P. SIKKEMA und B. GILROYED, 2016: Survival of seeds from perennial biomass species during commercial-scale anaerobic digestion. *Weed Research* **56**, 258–266.
- BECKON, W.N., C. PARKINS, A. MAXIMOVIC und A.V. BECKON, 2008: A general approach to modeling biphasic relationships. *Environmental Science and Technology* **42**, 1308–1314.
- BMU - BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT im Einvernehmen mit dem BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN und dem BUNDESMINISTERIUM FÜR GESUNDHEIT, 1998: Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden. Bioabfallverordnung - BioAbfV. BMU, Berlin, 58 S.
- BURTON, G.W. und J.S. ANDREWS, 1948: Recovery and Viability of Seeds of Certain Southern Grasses and Lespedeza Passed through the Bovine Digestive Tract. *Journal of Agricultural Research* **76**, 95–103.
- GEROWITT, B., 2012: Herbizidresistenz: Höchste Zeit zum Umdenken! *Top Agrar*, 104–108.
- HAHN, J., D. PARZYCH, P.R. WESTERMAN, M. HEIERMANN und B. GEROWITT, 2016: Die Bedeutung der Temperatur für die Inaktivierung von Samen im Biogas-Reaktor. *Julius-Kühn-Archiv* **452**, 123–129.
- JEYANAYAGAM, S.S. und E.R. COLLINS, 1984: Weed seed survival in a dairy manure anaerobic digester. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* **27**, 1518–1523.
- LEONHARDT, C., M. WEINHAPPEL, M. GANSBERGER, A. BRANDSTETTER, H. SCHALLY und E. PFUNDTNER, 2010: Untersuchungen zur Verbreitungsgefahr von samenübertragbaren Krankheiten, Unkräutern und austriebsfähigen Pflanzenteilen mit Fermentationsendprodukten aus Biogasanlagen. Endbericht zum Forschungsprojekt 100296/2.
- R CORE TEAM, 2017: R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- RITZ, C. und J.C. STREIBIG, 2015: R! package "drc". (<http://bioassay.dk/>)
- ROLSTON, M.P., 1978: Water impermeable seed dormancy. *Botanical Review* **44**, 365–396.
- WESTERMAN, P.R. und B. GEROWITT, 2012a: The probability of maize biomass contamination with weed seeds. *Journal of Plant Diseases and Protection* **119**, 68–73.
- WESTERMAN, P.R., F. HILDENBRANDT und B. GEROWITT, 2012b: Weed seed survival following ensiling and mesophilic anaerobic digestion in batch reactors. *Weed Research* **52**, 286–295.
- WESTERMAN, P.R., M. HEIERMANN, U. POTTBERG, B. RODEMANN und B. GEROWITT, 2012c: Weed seed survival during mesophilic anaerobic digestion in biogas plants. *Weed Research* **52**, 307–316.
- WESTERMAN, P.R. und B. GEROWITT, 2013: Weed seed survival during anaerobic digestion in Biogas Plants. *Botanical Review* **79**, 281–316.