(Aus dem Institut für Pflanzenbau und Grünland und dem Institut für Lebensmitteltechnologie der Universität Hohenheim)

Eignung von Korngut verschiedener Getreidearten zur Bioethanolproduktion in Abhängigkeit von der Sorte und den Aufwuchsbedingungen

Von W. Aufhammer, H. J. Pieper, H. Stützel und V. Schäfer

(Mit 5 Abbildungen)

Zusammenfassung

Korngut von Getreidearten gilt als Rohstoffbasis für die Bioethanolproduktion. Untersucht werden sollte die Eignung definierter Kornpartien verschiedener Arten für dieses Produktionsziel. Mit und ohne Fremdenzymzusatz wurden die Alkoholausbeuten in Liter/dt Trockenmasse von Winterweizen, -triticale und -roggen analysiert. Errechnet wurden die autoamylolytischen Quotienten (AAQ) und die Alkoholerträge in Liter/ha. Hierzu waren Kornpartien artspezifischer Sortengruppen aus zwei Erntejahren und von verschiedenen Standorten verfügbar. Soweit die Materialbasis Vergleiche zuließ, wurde folgendes festgestellt:

Bei Verarbeitung mit Fremdenzymzusatz variierte die Alkoholausbeute zwischen und innerhalb der Getreidearten wesentlich weniger als bei autoamylolytischer Konversion. Für die Variation innerhalb der Arten waren sowohl die Sorten als auch die Aufwuchsbedingungen verantwortlich. Roggen und Triticale wiesen bessere autoamylolytische Eigenschaften auf als Weizen. Hinsichtlich der Ausbeute erreichte Roggen jedoch nicht das Niveau von Weizen und Triticale. Zwischen der Alkoholausbeute/dt Trockenmasse und dem Kornertrag/ha konnte keine Beziehung nachgewiesen werden. Der Kornertrag/ha bestimmte den Alkoholertrag/ha entscheidend mit. Bei den leistungsfähigsten Weizensorten zeichneten sich ohne und mit Fremdenzymzusatz höhere Alkoholerträge/ha ab als bei den leistungsfähigsten Triticale- und Roggensorten.

Schlüsselworte: Getreidearten, -sorten, Bioethanolausbeute (l/dt), Bioethanolertrag (l/ha).

Suitability of the grain of different cereal species for bioethanol production dependent on cultivars and growing conditions

Summary

The grain of cereals is used as raw material for the production of bioethanol. Concerning this goal the suitability of defined grain material sets of cereal species were investigated. With and without an addition of technical enzymes the

alcohol output per unit of dry matter (l/dt) of winter wheat, winter triticale and winter rye was analyzed. The autoamylolytic quotient (AAQ) and the alcohol yield (l/ha) were calculated. Grain material of several cultivars per species from two vegetation periods and partly from different locations was available. As far as the data allow comparisons, results are:

With addition of technical enzymes as compared to autoamylolytic processing the variation of the alcohol output (l/dt) between and within species was evidently lower. The variation within the species refered to effects of cultivars and growing conditions. As compared to wheat, triticale and rye showed better autoamylolytic properties, but rye did not reach the alcohol output levels of wheat and triticale. Alcohol outputs per unit dry matter and grain yields per ha were not correlated. Alcohol yields per ha were substantially influenced by the grain yields/ha. With and without an addition of technical enzymes the alcohol yields/ha of the best wheat cultivars exceeded those of the best triticale and rye cultivars.

Key-words: Cereal species, cultivars, bioethanol output (l/dt), bioethanol yield (l/ha).

1. Einleitung

1.1 Literaturübersicht

Bei herkömmlichen Bioethanol-Produktionsverfahren wird der Stärkeanteil des Getreidekorns im Maischprozeß unter Zusatz von Fremdenzympräparaten in vergärbare Zucker abgebaut. Diese werden anschließend durch Hefe zu Alkohol vergoren. Auch korneigene Enzyme sind in der Lage, ohne Zusatz technischer Enzympräparate die Stärke weitgehend zu verzuckern (Matzik et al. 1984, Rau 1990, Wesenberg 1990, Thomas 1991). Zur technologischen Nutzung autoamylolytischer Aktivitäten von Getreiderohstoffen tragen insbesondere neuere Maischverfahren bei (Pieper und Senn 1987). Auch bei solchen Verfahren verlangen Kornpartien mit schwacher autoamylolytischer Aktivität zur Sicherung hoher Bioethanolausbeuten teure Fremdenzymzusätze (Thomas 1991). Die Kosten hierfür betragen z. B. bei der Verarbeitung von Weizen etwa 75 % der Betriebskosten (Rau 1990).

Aktuelle Untersuchungen bestätigen prinzipiell die Eignung von Weizen und Triticale für die fremdenzymfreie Ethanolproduktion (Rau 1990, Thomas 1991). Die Ausprägung der autoamylolytischen Aktivität von Korngut wird von der Getreideart, der Sorte und den Aufwuchsbedingungen bestimmt. Nach Echtermann et al. (1988) übersteigt die Bedeutung der Aufwuchsbedingungen den Sorteneinfluß. Jahreswitterungs- und Standorteffekte übertreffen die Auswirkungen produktionstechnischer Maßnahmen im Rahmen von Anbauverfahren (Gruber und Flamme 1989). Veränderungen des Aufwuchsverlaufes durch die Höhe und die Verteilung der Stickstoffgaben können jedoch in Interaktion mit Getreidearten und Sorten die Eigenenzymaktivität des Korngutes verändern (Detje und Geisler 1989). Primär bestimmen die Bedingungen in der Kornausbildungsperiode die Korneigenschaften. Im Stadium der Teigreife ist die Enzymaktivität im Roggenkorn am geringsten (Gordon 1980). Die Umweltbedingungen im weiteren Reifeverlauf spielen neben genetischen Faktoren für den Anstieg der Enzymaktivität eine erhebliche Rolle (Detje 1988, Derera 1989, Ohnmacht 1991). Hohe Temperaturen während der Abreife fördern den Abbau der Keimruhe. Anschließend feucht-kühle Verhältnisse bewirken eine rasche Zunahme der Enzymaktivität (Plett und Larter 1986, Derera 1989). Bei Triticale wurden auch

ohne klare Abhängigkeit von den Umweltbedingungen schon vor der Erntereife hohe α-Amylaseaktivitäten festgestellt (OETTLER 1987, MARES und OETTLER 1991).

Hohe autoamylolytische Enzymaktivität bedeutet andererseits latente Auswuchsneigung. Ob daher ein für die fremdenzymfreie Bioethanolherstellung geeigneter Rohstoff gezielt produzierbar ist, ist eine andere Frage.

1.2 Problemstellung

Aus technologischer Sicht wird die Bioethanolausbeute auf die Gewichtseinheit Kornrohstoff bzw. Stärke bezogen. Aus pflanzenbaulicher Sicht ist die Relation Bioethanolertrag/ha jedoch gleichermaßen von Bedeutung. Hierzu sollten mit den vorliegenden Untersuchungen folgende Fragen geklärt werden:

— Wie groß sind die Arten- und innerhalb der Arten die Sortenunterschiede in der Bioethanolausbeute (l/dt Kornrohstoff) bzw. im Bioethanolertrag (l/ha) unter Einsatz von bzw. unter Verzicht auf Fremdenzymzusatz?
— Welche Bedeutung kommt dem Einfluß der Aufwuchsbedingungen (Jahre, Standorte) auf die Ethanolausbeute und den Ethanolertrag zu?

Mit dieser Fragestellung sollte verfügbares, definiertes Kornmaterial auf seine Verarbeitbarkeit mit und ohne Fremdenzymzusatz überprüft werden.

2. Material und Methoden

2.1 Verfügbares Kornmaterial

Das Kornmaterial der Getreidearten Winterweizen, -triticale und -roggen entstammte dem Erntegut von Landessortenversuchen in Baden-Württemberg, aus Versuchen der Landessaatzuchtanstalt Stuttgart-Hohenheim und aus Praxisanbau (Standort Winnenden) der Erntejahre 1990 und 1991. Freundlicherweise stellten verschiedene Prüfstellen sowohl Erntegut als auch die relevanten Kornflächenerträge (dt/ha) zur Verfügung. Damit stand eine Materialbasis zur Verfügung, die sowohl Arten- und Sortenvariabilität als auch Variabilität in Abhängigkeit von den Aufwuchsbedingungen aufwies (Tab. 1).

2.2 Durchführung der Gärversuche

Die maximale Alkoholausbeute von Getreideproben wurde unter Zusatz von technischen Fremdenzympräparaten (Standardgärversuche) analysiert. Darüber hinaus wurde die Alkoholausbeute unter ausschließlicher Nutzung eigener Enzyme (autoamylolytische Gärversuche) ermittelt. Je Probe erfolgte eine Doppelbestimmung. Die Standardgärversuche wurden bei allen Getreidearten in gleicher Weise durchgeführt. Hierbei wurde eine hinsichtlich maximaler Alkoholausbeute optimierte Fremdenzymkombination (PIEPER und THOMAS 1989) eingesetzt. Die einzelnen Verfahrensabschnitte wurden durch das im Maischbad[1] installierte Zeit- und Temperaturprogramm exakt eingehalten. Das Maischschema der Standardgärversuche wurde in folgenden Schritten durchgeführt:

— Einteigen von 80 g Schrot (0,5-mm-Sieb)[2] im Maischbecher mit 300 ml Leitungswasser (9° dH, T < 20 °C),
— pH-Einstellung mit 1 n-Schwefelsäure auf 6,0 bis 6,5
— Zugabe einer thermostabilen Bakterien-α-Amylase aus *Bacillus licheniformis* als Verflüssigungsenzym (16,5 ml Optimash-pH 420/dt Getreide)[4]
— Aufheizen der Maische unter ständigem Rühren (200 min^{-1}) mit 1 bis 2 °C min^{-1} auf 65 °C
— Verflüssigungsrast, 30 min
— Abkühlen auf 52 °C und pH-Einstellung mit 1 n-H_2SO_4 auf pH 5,0 bis 5,2
— Zugabe von Verzuckerungsenzymen (Dosierung/dt Getreide):
  180 g Spezialbrennmalz[3]
  24 g Rhizopus-Amylasenpräparat (Optimalt 234)[4]
  6 ml Schimmelpilz-α-Amylase aus *Aspergillus oryzae* (Optimalt 327)[4]
  10,2 ml Glucoamylase aus *Aspergillus niger* (Optimalt 238)[4]

---

[1] VLB-Maischbad, Modell MA-33/E, Bender & Holbein, Neu-Ulm
[2] Retsch-Schlagrotormühle Typ SR 2, Retsch GmbH, Haan
[3] Heidelsheimer Malzfabrik Heinrich Durst, Bruchsal
[4] Solvay Enzymes, Hannover

— Verzuckerungsrast, 30 min
— Kühlen auf 30 °C
— frische Maische unter Zugabe von 1 g rehydratisierter Trocken-Reinzuchthefe[5] und einem Tropfen Entschäumer[6] in 1 l Erlenmeyerkolben überführen und mit Leitungswasser auf 500 g aufwiegen
— Gäransatz mit Gärröhrchen verschließen (45%ige Glycerinlösung als Sperrflüssigkeit) und im Wasserbad für 70 Stunden vergären.

Tabelle 1

Untersuchtes Korngut verschiedener Getreidearten und Sorten in Abhängigkeit von Standort und Erntejahr

Material- bzw. Datengruppe	Getreideart/Sorte	Standort	Erntejahr
1	Winterweizen Sorten: Ares, Orestis, Rektor, Slejpner, Topas	Neuler (N)	1990 1991
2	Wintertriticale Sorten: Alamo, Clercal, Lasko, Local, Lukas, Salvo	Hohenheim (H)	1990 1991
3	Winterroggen Sorten: Amando, Danko, Halo, Luchs, Marder, Merkator, Rapid	Neuler (N)	1990 1991
4	Winterweizen Sorten: Adular, Sorbas	Winnenden (W)	1990 1991
5	Wintertriticale Sorten: Lasko, Lukas	Hohenheim (H)	1990 1991
		Neuler (N)	1990
		Nebringen (Ne)	1991
6	Winterroggen Sorten: Amando, Halo, Danko, Luchs, Marder, Merkator, Rapid	Nebringen (Ne)	1990
		Krauchenwies (K)	1991
7	Winterweizen Sorten: Apollo, Basalt, Hai, Kanzler, Okapi, Topas	Neuler (N)	1990
	Wintertriticale Sorten: Alamo, Salvo	Nebringen (Ne)	1991
	Winterroggen Sorten: Akkord, Wolf	Neuler (N)	1990

Die autoamylolytischen Gärversuche wurden unter ausschließlicher Nutzung getreideeigener Enzyme, nach Getreidearten differenziert, durchgeführt:
— Einmaischen wie beim Standardgärversuch
— Einstellung des pH-Wertes auf pH 5,5 mit 1 n-Schwefelsäure
— Aufheizen der Maische auf 64 °C für 5 min, anschließend 60 °C für 55 min bei Weizen, 60 °C für 60 min bei Roggen und Triticale
— Kühlen auf 30 °C und Vergärung wie beim Standardgärversuch

Der Alkoholgehalt in vergorenen Maischen wurde nach der Methode von Rebelein (1973) bestimmt.

Die Berechnung der Alkoholausbeute (Liter Alkohol/dt Korn-Trockenmasse) erfolgte nach folgender Formel:

[5] Spezialbrennereihefe, Schließmann Kellerei-Chemie, Schwäbisch-Hall
[6] Schill & Seilacher, Hamburg

$$\text{Liter Alkohol je dt Korntrockenmasse} = \frac{\text{Maischegewicht (g)} \times \text{Alkoholgehalt (\% vol)} \times 0{,}97}{\text{Einwaage (g)} \times \text{Trockensubstanzgehalt (\%)}} \times 100$$

Das Maischegewicht (g) zur Berechnung der Alkoholausbeute wurde nach der Vergärung ermittelt. Der Faktor 0,97 berücksichtigt einen 3%igen Treberabzug. Die Bestimmung des Trockensubstanzgehaltes erfolgte durch Trocknung von 3 g Schrot aus dem gemahlenen Probenmaterial bei 105 °C und drei Stunden. Zur Bewertung der autoamylolytischen Aktivität der untersuchten Getreidearten und Sorten wurde der autoamylolytische Quotient (AAQ) herangezogen (Rau 1990, Senn et al. 1991):

$$\text{AAQ} = \frac{\text{Alkoholausbeute (l Alkohol/100 kg Korn-Trockenmasse) im Gärversuch ohne Fremdenzymzusatz}}{\text{Alkoholausbeute (l Alkohol/100 kg Korn-Trockenmasse) im Gärversuch mit Fremdenzymzusatz}} \times 100$$

2.3 Auswertung

Die technologisch ermittelte Größe Liter Alkohol/dt Trockenmasse wurde varianzanalytisch überprüft. Jede Analyse enthielt den Faktor „Enzyme" mit den Stufen „ohne Fremdenzymzusatz" (im weiteren o. E.) und „mit Fremdenzymzusatz" (im weiteren m. E.). Das einortig-zweijährig vorliegende Datenmaterial mehrerer Sorten jeder Wintergetreideart (Tab. 1, Gruppen 1—3) wurde jeweils in eine Varianzanalyse zusammengefaßt. Darüber hinaus wurden aus den Datengruppen 1—6 in Tabelle 1 soweit möglich orthogonale Kerne gebildet, die weitere Aussagen zu den Umwelteffekten auf die Alkoholausbeute zuließen. Teilweise wurden hierbei Standorte und Jahre zu „Umwelten" kombiniert. Das Erntegut aus den Sortenversuchen war durchgängig nur in Form von Mischproben aus Feldwiederholungen erhältlich. Aus jeder Mischprobe wurden zwei repräsentative Teilproben gezogen, separat analysiert und zur Fehlerermittlung in die Varianzanalysen einbezogen. Die so ermittelten Fehlervarianzen und damit auch die Grenzdifferenzen für Mittelwerte bleiben insgesamt gering.

Schließlich wurden die verfügbaren Daten zur Alkoholausbeute je dt Trockenmasse bzw. je ha bei jeder Getreideart (Datengruppen 1 bis 3 und 5 bis 7, Tab. 1) zusammengenommen und in Beziehung zu den Kornerträgen (dt/ha) gesetzt. Die Datengruppe 4 konnte nicht einbezogen werden, da hier keine Kornerträge vorlagen. Dieses Verfahren setzt die Annahme voraus, die einzelnen Datensätze stellten bezüglich der sorten- und aufwuchsabhängigen Variabilität nach dem Zufallsprinzip entnommene und repräsentative Stichproben dar. Insbesondere hinsichtlich aufwuchsbedingter Variabilität war diese Forderung sicher nur mit erheblichen Einschränkungen erfüllt. Andererseits vermitteln die Beziehungen erste Anhaltspunkte, die allerdings mit Vorsicht zu interpretieren sind.

3. Ergebnisse

3.1 Sorteneffekte auf die Alkoholausbeute

Fremdenzymzusatz bewirkte bei allen Getreidearten gegenüber der autoamylolytischen Vergärung höhere Alkoholausbeuten. Die Konversion mit Fremdenzymzusatz führte bei Winterweizen und Wintertriticale zu einem Ausbeuteniveau um 44 l (Abb. 1, 2), bei Winterroggen (Abb. 3) um 42 l Alkohol/dt Trockenmasse. Bei allen Getreidearten blieben Sortenunterschiede in der Alkoholausbeute unter Verwendung von Fremdenzymen deutlich geringer als bei ausschließlich autoamylolytischem Stärkeabbau (Abb. 1—3). Folglich zeigten sich hinsichtlich der Ausbeutedifferenzen zwischen einer Konversion mit und ohne Fremdenzymzusatz durchgängig Sortenunterschiede. Bei Winterweizen ergab das Kornmaterial von fünf Sorten im Mittel von zwei Erntejahren sortenspezifische Ausbeutedifferenzen zwischen den Verarbeitungsvarianten mit und ohne Fremdenzymzusatz von 3 bis 9,2 l Alkohol (Abb. 1). Bei Wintertriticale lagen die relevanten Differenzen zwischen 1,6 und 6,9 l (Abb. 2). Bei Winterroggen, der allgemein über eine hohe autoamylolytische Aktivität zum Erntezeitpunkt verfügt, bewegten sich die Werte zwischen 1,2 und 5,3 l (Abb. 3). Die Eigenenzymaktivität einzelner enzymstarker Sorten reduzierte somit den durch Fremdenzymierung gewinnbaren Ausbeutezuwachs artspezifisch auf 1,2 bis 3 l Alkohol/dt Trockenmasse.

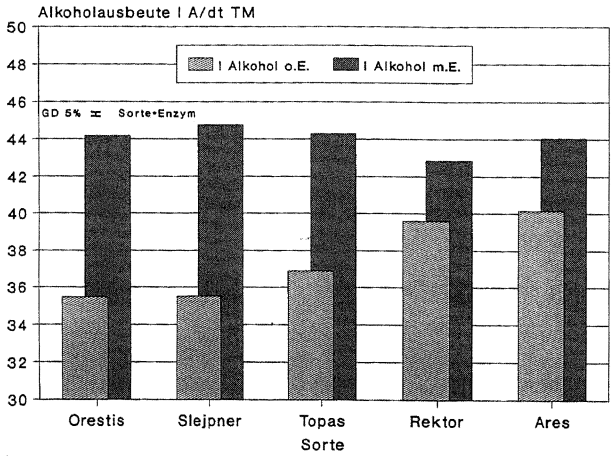

Abb. 1: Sorteneffekte auf die Alkoholausbeute ohne (o. E.) und mit Fremdenzymzusatz (m. E.) bei Winterweizen am Standort Neuler ($\bar{x}$-Werte über die Erntejahre 1990 und 1991)

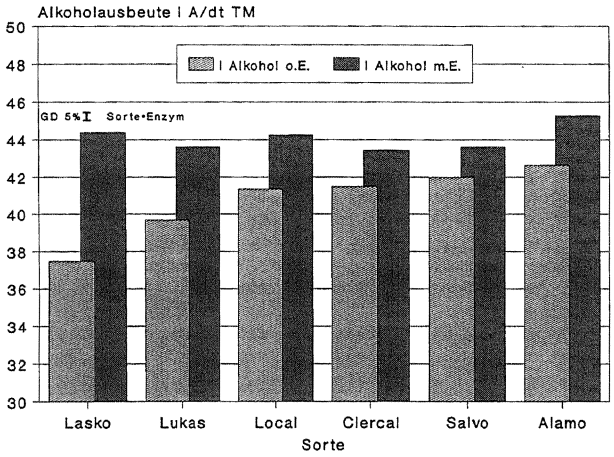

Abb. 2: Sorteneffekte auf die Alkoholausbeute ohne (o. E.) und mit Fremdenzymzusatz (m. E.) bei Wintertriticale am Standort Hohenheim ($\bar{x}$-Werte über die Erntejahre 1990 und 1991)

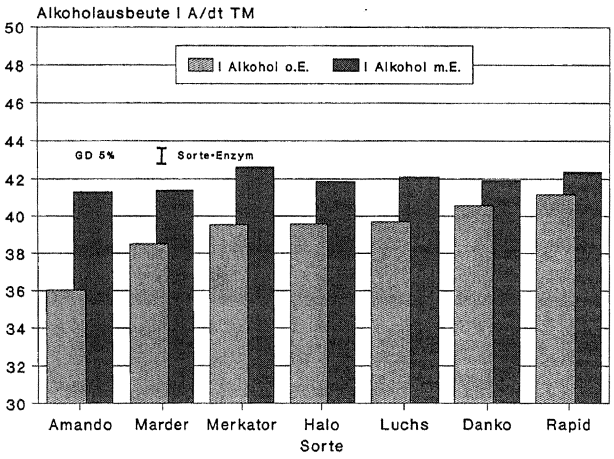

Abb. 3: Sorteneffekte auf die Alkoholausbeute ohne (o. E.) und mit Fremdenzymzusatz (m. E.) bei Winterroggen am Standort Neuler ($\bar{x}$-Werte über die Erntejahre 1990 und 1991)

3.2 Umwelteffekte auf die Alkoholausbeute

Die Wirkung der Fremdenzymierung auf die Alkoholausbeute aus arten- und sortenverschiedenem Korngut erwies sich von den Bedingungen, unter denen die Getreidebestände aufwuchsen, abhängig (Abb. 4). Interaktionen mit den Jahren lagen insbesondere bei Winterweizen vor. Im Erntejahr 1991 blieb die Alkoholausbeute/dt Trockenmasse ohne Fremdenzymzusatz um rund 4 l geringer als im Jahr 1990. Mit Fremdenzymzusatz betrug die Ausbeutedifferenz zwischen den Jahren nur 1 l. Dem Fremdenzymzusatz kam damit 1991 eine größere Bedeutung als im vorausgehenden Erntejahr zu (Abb. 4). Bei Wintertriticale blieb — von den vorliegenden Daten ausgehend — die jahresbedingte Modifikation des Effekts von Fremdenzymzusatz gering, da sich ohne Fremdenzymzusatz keine Ausbeuteunterschiede ergaben. Die Interaktion Umwelt × Enzym weist allerdings auf die Beteiligung von Standortfaktoren an den unterschiedlichen Rohstoffeigenschaften hin. Ohne Fremdenzymzusatz lag bei Triticale 1990 — im Gegensatz zum Standortvergleich im Jahr 1991 zwischen den Standorten Hohenheim und Nebringen — ein Ausbeuteunterschied von 3 l Ethanol/dt Trockenmasse zwischen den Standorten Hohenheim und Neuler vor. Die Ausbeutedifferenzen mit Fremdenzymzusatz blieben demgegenüber unbedeutend (Abb. 4). Bei Winterroggen lag keine Interaktion mit den Erntejahren vor. Jedoch zeichneten sich auch bei dieser Getreideart Standorteinflüsse auf die Effektivität der korneigenen Enzyme mit Auswirkung auf die Alkoholausbeute ohne Fremdenzyme ab (Abb. 4).

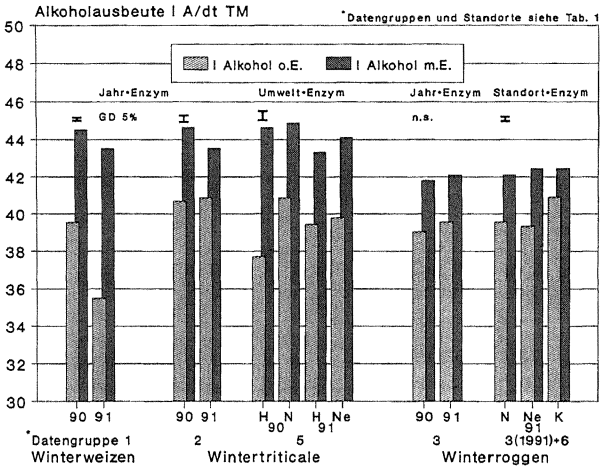

Abb. 4: Effekte der Aufwuchsbedingungen auf die Alkoholausbeute ohne (o. E.) und mit Fremdenzymzusatz (m. E.) bei Winterweizen, -triticale und -roggen ($\bar{x}$-Werte über Sorten)

3.3 Ethanolausbeute (Liter Alkohol/dt TM bzw. Liter Alkohol/ha) in Abhängigkeit vom Kornertrag/ha

In Abbildung 5 wurden die Daten zur Alkoholausbeute ohne und mit Fremdenzymzusatz artengetrennt den Korn-Flächenerträgen, denen das Probenmaterial für die Analysen entstammte, gegenübergestellt. Bei keiner der drei Getreidearten lag eine Beziehung zwischen der Höhe des Kornertrages und der Ethanolausbeute je dt Korntrockenmasse vor. Ein Kornertragsanstieg von ca. 65 auf 85 dt/ha bei Weizen, von 50 auf 75 dt/ha bei Triticale und von ca. 50 auf 80 dt/ha bei Roggen ließ keine Anzeichen einer Veränderung der ausbeuterelevanten Kornqualität erkennen. Dem vorliegenden Datenmaterial folgend, bedeuteten Zunahmen des Kornertrages je Hektar proportionale Zunahmen des Alkoholertrages/ha.

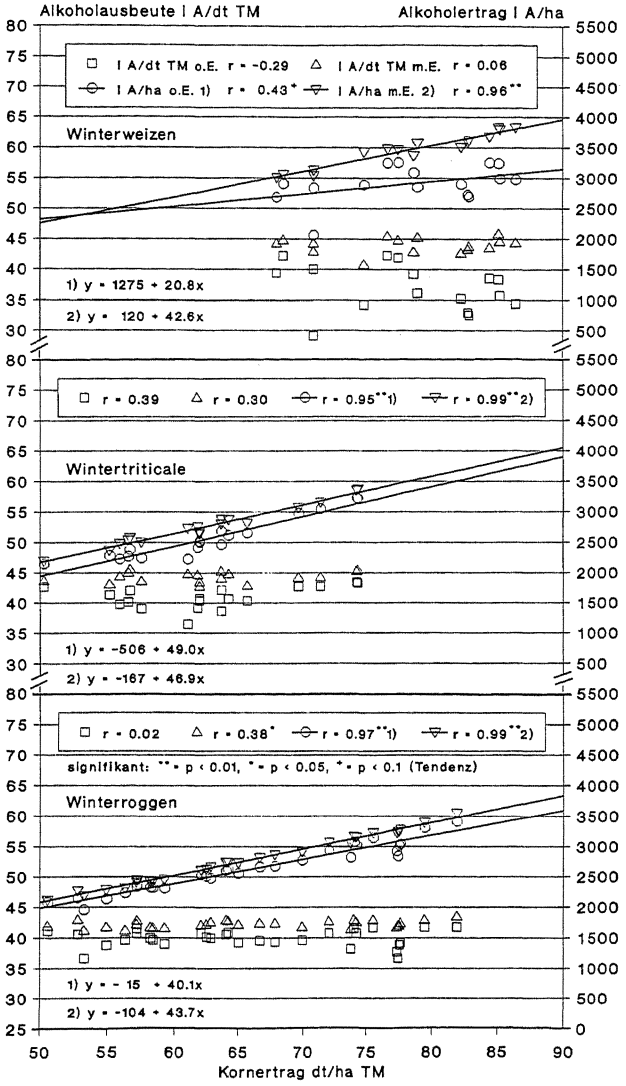

Abb. 5: Zusammenhang zwischen Kornertrag, Alkoholausbeute und Alkoholertrag bei Winterweizen, -triticale und -roggen

4. Diskussion

Die rentable Verwertung von Getreide als Rohstoff für die Bioethanolproduktion verlangt hohe Ausbeuten je dt Korntrockenmasse sowie hohe Kornerträge/ha. Der Verzicht auf technische Fremdenzympräparate zur Stärkeverzuckerung setzt darüber hinaus eine hohe autoamylolytische Aktivität voraus. Bei keiner der untersuchten Kornpartien der Sorten von Winterweizen, -triticale und -roggen reichte die autoamylolytische Aktivität für eine vollständige Verzuckerung der korneigenen Stärke aus. Der Verzicht auf Fremdenzymzusatz bedeutete damit Ausbeuteverluste sehr unterschiedlichen Umfangs.

Da die Alkoholausbeute, insbesondere die Ausbeute ohne Fremdenzymzusatz, sowohl Sorteneinflüssen als auch Umweltfaktoren unterlag, ist ein Artenvergleich nur mit Einschränkungen möglich. Zweijährig, jedoch nur einortig ist

dem Winterroggen der Winterweizen gegenüberstellbar. Im Mittel von zwei Jahren und zwei Standorten können Winterroggen und Wintertriticale verglichen werden (Tab. 2). Allerdings gehen die Triticalewerte nur auf zwei Sorten zurück, dies stellt zweifellos die Repräsentanz der Art in Frage. Mit Fremdenzymzusatz wurden bei Weizen und Triticale gegenüber Roggen höhere Ausbeuten erzielt. Da das eingesetzte Fremdenzympräparat nachgewiesenermaßen maximale Alkoholausbeuten gewährleistet (Pieper und Thomas 1989), dürften die Unterschiede ausschließlich auf höhere Gehalte an vergärbarer Substanz je dt Weizen- bzw. Triticale-Korntrockenmasse zurückgehen (Senn 1988). Bei Roggen tragen nicht nur Kornform- und -größe, sondern auch höhere Gehalte an nicht vergärbaren Pentosanen (Kreipe 1981) zu geringeren Ausbeuten bei. Unter ausschließlicher Nutzung korneigener Enzyme verschwanden die mit Fremdenzymzusatz erzielten Ausbeutevorteile bei Weizen und Triticale weitgehend (Tab. 2). Verglichen mit Roggen weist dies auf geringere Eigenenzymaktivität des Kornmaterials in Relation zum Gehalt an vergärbarer Substanz hin.

Tabelle 2

Vergleich der Alkoholausbeute (Liter Alkohol/dt Korntrockenmasse) von Winterroggen und Winterweizen bzw. von Winterroggen und Wintertriticale

Winterroggen (x̄-Werte aus 7 Sorten, Standort Neuler)				Winterweizen (x̄-Werte aus 5 Sorten, Standort Neuler)	
Erntejahr	ohne Fremdenzymzusatz	mit Fremdenzymzusatz		ohne Fremdenzymzusatz	mit Fremdenzymzusatz
1990	39,0	41,8		39,5	44,5
1991	39,6	42,1		35,5	43,5
GD 5% Jahr × Art × Enzym			0,38		

Winterroggen (x̄-Werte aus 7 Sorten von Standort Neuler 1990 und Standort Nebringen 1991)				Wintertriticale (x̄-Werte aus 2 Sorten von Standort Neuler 1990 und Standort Nebringen 1991)	
	ohne Fremdenzymzusatz	mit Fremdenzymzusatz		ohne Fremdenzymzusatz	mit Fremdenzymzusatz
	39,3	42,0		40,3	44,5
GD 5% Art × Enzym			0,51		

Das vorliegende Datenmaterial von 5 bis 7 Sorten je Wintergetreideart aus zweijährig-einortigen Versuchen (Abb. 1 bis 3) zeigt durchgängig den Einfluß der Sorte bei fremdenzymfreier Verarbeitung. Über die Arten hinweg betrugen die Sortenunterschiede in der Alkoholausbeute rund 4 bis 6 l/dt Trockenmasse. Die Ansicht von Wesenberg (1990), bei Roggen sei die Sorte verglichen mit den Aufwuchsbedingungen von untergeordneter Bedeutung, trifft auf der Basis der vorliegenden Ergebnisse nicht zu. An diesen Ergebnissen ist der Einbezug neuerer Winterroggensorten wie Amando und Marder beteiligt. Auch der Vergleich der autoamylolytischen Quotienten von Sortenspektren und von zwei Erntejahren kann eine grundsätzlich geringere Bedeutung der Sorten und eine größere der Aufwuchsbedingungen bei Roggen nicht bestätigen (Tab. 3). Der Einbezug der Alkoholerträge/ha führt zu gleichgerichteten Folgerungen (Tab. 4). Allerdings sei auf den eingeschränkten Informationsgehalt der Daten in den Tabellen 3 und 4 nochmals hingewiesen: bei Weizen ist nur ein kleiner Ausschnitt aus der nationalen Sortenliste erfaßt, darüber hinaus wuchsen nur Weizen und Roggen unter

vergleichbaren Bedingungen auf (Tab. 1). Die Sortenvariation des AAQ bewegte sich bei Roggen zwischen 87 und 97 %, bei Weizen mit Werten zwischen 79 und 92 % auf einem deutlich niedrigeren Niveau. Allerdings wurden auf einem anderen Standort an Kornmaterial der Weizensorten Adular und Sorbas (Tab. 1, Gruppe 4, Ergebnisse nicht gesondert dargestellt) ebenfalls AAQ-Werte über 95 % festgestellt. Jede der drei Arten enthielt für die autoamylolytische Verarbeitung besser und weniger geeignete Sorten. Untersuchungen von RAU (1990) und SENN et al. (1993) ließen erkennen, daß einige Weizen- und Triticalesorten in Abhängigkeit von den Aufwuchsbedingungen AAQ-Werte bis zu 100 % erreichen. In solchen Fällen wird ein vollständiger Ersatz von Fremdenzymen ohne jegliche Ausbeuteverluste möglich.

Tabelle 3

Autoamylolytische Quotienten (AAQ) bei verschiedenen Sorten und in verschiedenen Erntejahren von Winterweizen, -triticale und -roggen (errechnet aus Abb. 1—4, Datengruppe 1—3)

Winterweizen Sorten	(AAQ %)	Wintertriticale Sorten	(AAQ %)	Winterroggen Sorten	(AAQ %)
Orestis	80,3	Lasko	84,5	Amando	87,2
Slejpner	79,3	Lukas	91,0	Marder	93,0
Topas	83,3	Local	93,4	Merkator	92,7
Rektor	92,4	Clercal	95,5	Halo	94,5
Ares	91,2	Salvo	96,3	Luchs	94.1
		Alamo	94,2	Danko	96,3
				Rapid	97,2
Erntejahre					
1990	88,8		91,1		93,4
1991	81,6		93,9		94,0

Tabelle 4

Bioethanolerträge (Liter Alkohol/ha) bei verschiedenen Sorten ($\bar{x}$-Werte aus den Erntejahren 1990, 1991) und in verschiedenen Erntejahren ($\bar{x}$-Werte aus den Sorten) von Winterweizen, -triticale und -roggen (errechnet aus Abb. 1—4 und den Kornerträgen/ha)

Winterweizen Sorten	o. E.[1])	m. E.	Wintertriticale Sorten	o. E.	m. E.	Winterroggen Sorten	o. E.	m. E.
Orestis	2979	3707	Lasko	2339	2764	Amando	2434	2705
Slejpner	2786	3523	Lukas	2456	2700	Marder	2558	2753
Topas	2825	3416	Local	2205	2366	Merkator	2486	2621
Rektor	2958	3202	Clercal	2810	2940	Halo	2436	2580
Ares	3249	3569	Salvo	2662	2763	Luchs	2530	2678
			Alamo	2945	3126	Danko	2293	2373
						Rapid	2919	3003
Erntejahre								
1990	2974	3352		2688	2936		2232	2357
1991	2944	3614		2451	2617		2813	2989

[1]) o. E. = ohne Fremdenzymzusatz, m. E. = mit Fremdenzymzusatz

Zur Bewertung einer Sorte trägt aber nicht nur der Relativwert des AAQ, sondern auch das absolute Ausbeuteniveau bei. Ausbeute und Kornertrag ergeben den Alkoholertrag/ha. Im Rahmen der vorliegenden Daten deutete die ohne Fremdenzymzusatz hinsichtlich des Alkoholertrags/ha leistungsfähigste Weizensorte (Ares) gegenüber der entsprechend definierten Triticalesorte (Alamo) bzw. der Roggensorte (Rapid) einen Mehrertrag von ca. 300 l/ha an. Mit Fremd-

enzymzusatz zeichnete sich teils bei anderen Sorten das jeweils höchste Alkoholertragsniveau/ha ab. Hier lag der Alkoholmehrertrag der leistungsfähigsten Weizensorte bei 580 bis 700 l/ha (Tab. 4). Dieses Beispiel zeigt, welche Bedeutung verschiedenen Eigenschaften einer Art bzw. einer Sorte unter einerseits technologischen, andererseits agronomischen Aspekten zukommen kann.

Zusammenhänge zwischen steigenden Kornerträgen je Hektar und der Alkoholausbeute je dt Trockenmasse wurden im vorliegenden Datenmaterial nicht festgestellt. Dies bedeutet, weder der Anteil vergärbaren Substrats je dt Trokkenmasse noch die Relation zwischen Eigenenzymaktivität und vergärbarem Substrat veränderten sich entscheidend. Nach Untersuchungen von Flamme (1991) und Wolski (1991) zeigte die Überprüfung mehrerer Triticalegenotypen eine positive Korrelation zwischen Kornertrag und Eigenenzymaktivität. Dies läßt möglicherweise die Selektion für die Bioethanolproduktion besonders geeigneter, ertragreicherer Triticalesorten zu. Die vorliegenden Untersuchungen verschiedener Triticalesorten zeigen bestenfalls andeutungsweise eine positive Korrelation zwischen dem Kornertrag/ha und der autoamylolytischen Bioethanolausbeute (Abb. 5). Negative Beziehungen zwischen Kornertrag und Korn-Proteingehalt, wie sie — gleiche Aufwuchsbedingungen vorausgesetzt — z. B. im Vergleich unterschiedlich leistungsfähiger Weizensorten auftreten (Spanakakis 1991), kamen im vorliegenden Material nicht zum Tragen. Steigender Proteingehalt je Gewichtseinheit Rohstoff führt auf Grund abnehmenden Stärkeanteils zu einem Rückgang der Ethanolausbeute (Schäfer 1990). Jedoch begrenzt das vorliegende Material differenziertere Aussagen. Hier sind weitere Untersuchungen auf der Basis zielorientiert angelegter Feldversuche erforderlich.

Danksagung

Die Autoren danken für die freundliche Mithilfe bei der Beschaffung von Kornmaterial zur Durchführung der vorliegenden Untersuchungen Frau Dr. Oettler, Landessaatzuchtanstalt Stuttgart-Hohenheim, sowie den Pflanzenbauberatern Herrn Bohnacker, Landwirtschaftsamt Biberach, Herrn Gaugler, Landwirtschaftsamt Ellwangen, und Herrn Kossytorz, Landwirtschaftsamt Sigmaringen.

Darüberhinaus gilt unser Dank Herrn Dr. Senn für die Beratung bei den Laboruntersuchungen.

Literatur

Derera, A. F., 1989: The effects of preharvest rain, 1—14. In: Derera, N. F. (ed.): Preharvest field sprouting in cereals. CRC Press, Boca Raton, Florida.

Detje, H., 1988: Untersuchungen zur α-Amylase-Aktivität, primären Dormanz und Auswuchsresistenz von Weichweizen *(Triticum aestivum* L.*)*, Roggen *(Secale cereale)* und Triticale (×Triticosecale Wittmack) unter besonderer Berücksichtigung des N-Angebots. Diss. Christian-August-Universität, Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung, Kiel.

Detje, H. und G. Geisler, 1989: Einfluß eines variierten N-Angebots auf α-Amylase-Aktivität, primäre Dormanz und Auswuchsresistenz von Weichweizen *(Triticum aestivum* L.*)*, Roggen *(Secale cereale)* und Triticale (×Triticosecale Wittmack). J. Agron. and Crop Sci. *162*, 201—213.

Echtermann, K.-W., U. Zimare, K. Kirste, P. Lietz, J. Wesenberg, S. Nowak, K. Goeck, W. Flamme, B. Stoelken and A. Winkel, 1988: The use of triticale as grain alcohol plants. Tag.-Ber. Akad. Landwirtsch.-Wiss. *266*, 625—633.

Flamme, W., 1991: Getreide als Rohstoff für den Non-food-Bereich aus der Sicht der Qualitätsforschung und -züchtung. Feldwirtschaft *32*, 172—175.

Gordon, I. L., 1980: Germinability, dormancy and grain development. Cereal Res. Comm. *8*, 115—130.

Gruber, R. und W. Flamme, 1989: Zum Einfluß ausgewählter agrotechnischer Maßnahmen auf die amylolytische Aktivität und die Fallzahl von Triticale (Triticosecale Wittmack). Arch. Acker-Pflanzenbau Bodenkd. *33*, 767—774.

KREIPE, H., 1981: Getreide- und Kartoffelbrennerei. Handbuch der Getränketechnologie, Verlag Eugen Ulmer.
MARES, D. J. and G. OETTLER, 1991: α-Amylase Activity in Developing Triticale Grains. J. Cereal Sci. *13*, 151—160.
MATZIK, B., A. GENUIT und R. KOPP, 1984: Gewinnung von Ethanol aus Weizen. Stärke/Starch *36*, 378—389.
OETTLER, G., 1987: Pre-Harvest Sprouting in Rye and Triticale. In: MARES, D. J. (ed.): 4th Int. Sprouting Symp. on Pre-Harvest Sprouting in Cereals. Westview Press, Boulder, Co., 24—33.
OHNMACHT, B., 1991: Einfluß von Witterung, Reifestadium und Cytoplasma auf die α-Amylaseaktivität im Roggenkorn. Diss. Universität Hohenheim, Institut für Pflanzenzüchtung, Saatgutforschung und Populationsgenetik und Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig—Völkenrode (FAL).
PIEPER, H. J. und T. SENN, 1987: Das Ganzkorn-Maischverfahren — ein neues druckloses Verfahren zur Gewinnung von Gärungsalkohol aus stärkehaltigen Rohstoffen. Handbuch Brennerei- und Alkoholwirtschaft *34*, 275—291.
PIEPER, H. J. und L. THOMAS, 1989: Vergleichende Untersuchungen zur amylolytischen Wirkung von Handelsenzympräparaten in der Alkoholproduktion unter besonderer Berücksichtigung druckloser Maischverfahren. Branntweinwirtschaft *129*, 70—77.
PLETT, S. and N. LARTER, 1986: Influence of Maturation Temperature and Stage of Kernel Development on Sprouting Tolerance of Wheat and Triticale. Crop Sci. *26*, 804—807.
RAU, T., 1990: Das autoamylolytische Enzymsystem des Weizens, seine quantitative Erfassung und technologische Nutzung bei fremdenzymreduzierter Amylolyse unter besonderer Berücksichtigung der Ethanolproduktion. Diss. Universität Hohenheim, Institut für Lebensmitteltechnologie.
REBELEIN, H., 1973: Schnellverfahren zur Bestimmung des Alkohol-, Zucker- und Gesamt-SO_2-Gehaltes (durch Destillation) in Wein und Fruchtsäften, sowie des Blutalkoholgehaltes. Chem. Mikro-biol. Technol. Lebensm. 2, 112—121.
SCHÄFER, V., 1990: Einflüsse produktionstechnischer Maßnahmen auf die enzymatischen Eigenschaften des Korngutes von Weichweizen (Adular) und Triticale (Lasko) unter besonderer Berücksichtigung der Ethanolproduktion. Diplomarbeit, Universität Hohenheim, Institut für Pflanzenbau und Grünland.
SENN, T., 1988: Zur biotechnischen Amylolyse schwer aufschließbarer Getreidearten bei der industriellen Bioethanolproduktion. Diss. Universität Hohenheim, Institut für Lebensmitteltechnologie.
SENN, T., L. THOMAS und H. J. PIEPER, 1991: Bioethanolproduktion aus Triticale unter ausschließlicher Nutzung des korneigenen Amylasesystems. Wiss. Z. TH Köthen *2*, 53—60.
SENN, T., L. THOMAS und H. J. PIEPER, 1993: Zur Bedeutung autoamylolytischer Eigenschaften von Triticale-Sorten für die Gärungsalkoholgewinnung. Handbuch Brennerei- und Alkoholwirtschaft *40*, 383—401.
SPANAKAKIS, A., 1991: Weizenanbau mit reduzierter N-Düngung. Getreide, Mehl und Brot *45*, 163—167.
THOMAS, L., 1991: Enzymtechnische Untersuchungen mit Triticale zur technischen Amylolyse unter besonderer Berücksichtigung der fremdenzymfreien Bioethanolproduktion. Diss. Universität Hohenheim, Institut für Lebensmitteltechnologie.
WESENBERG, J., 1990: Der drucklose enzymatische Stärkeaufschluß von Roggen in der Getreidebrennerei. Branntweinwirtschaft *130*, 354—360 und 370—376.
WOLSKI, T., 1991: Persönliche Mitteilung.

(Manuskript eingelangt am 9. Februar 1993, angenommen am 10. März 1993)

Anschriften der Verfasser:

Prof. Dr. Walter AUFHAMMER, Dr. Hartmut STÜTZEL und Dipl.-Ing. agr. Volker SCHÄFER, Universität Hohenheim, Institut für Pflanzenbau und Grünland (340), Fruwirthstraße 23, Postfach 700562, D-W 7000 Stuttgart 70; Prof. Dr. Hans-Joachim PIEPER, Universität Hohenheim, Institut für Lebensmitteltechnologie (150), Garbenstraße 25, Postfach 700562, D-W 7000 Stuttgart 70