

VF		Versuchsstand mit Spritz- oder Sprühfahrzeug, Meßstelle Atembereich am Fahrerplatz
hochgesetzte		
a		atembare Wirkstoffanteil beim Sprühen
g		gesamter Wirkstoffanteil beim Sprühen
20		Wirkstoffgehalt oder Verdünnungsfaktor beim Sprühen, wenn im Trägerluftstrom an der Quelle ein Wirkstoffgehalt von $\xi_Q = 20 \text{ mg/m}^3$ vorliegt
Emissionen		
$\dot{E}_W$	kg/h	Emissionsstrom aus Wirkstoff; Wirkstoff = aktiver Bestandteil im Präparat, d.h. im Pflanzenbehandlungs- und Schädlingsbekämpfungsmittel
$\dot{E}_{W1}$	kg/m h	Emissionsstrom aus Wirkstoff pro m Spritzbreite
$\dot{E}_L$	$\text{m}^3/\text{h}$	Gebläse-Luftstrom beim Sprühen
Luftbewegungen und Luftzustände		
$v_{rw}$	m/s	relative Windgeschwindigkeit
$v_w$	m/s	Windgeschwindigkeit
$v_{w \text{ max}}$	m/s	obere zugelassene mittlere Windgeschwindigkeit (Verteilung nach Bild 19)
$\alpha$	°	Windeinfallswinkel (relative Windrichtung), Winkel zwischen Fahrzeuglängsachse und Windrichtung (bei axialem Gegenwind ist $\alpha = 0$ )
$\varphi$	%	relative Luftfeuchte
$\vartheta$	°C	Lufttemperatur
Abmessungen		
b	m	Spritzbreite = Anzahl der Düsen x Düsenabstand
h	m	lotrechter Abstand vom Boden
$h_B$	m	Abstand zwischen Boden und Spritzbalken
$s_A$	m	horizontaler Abstand zwischen Meßstelle und Spritzbalken bzw. Sprühgerät

V	$\text{m}^3$	Behälterfüllung
andere Formelzeichen		
$A_W$	kg/ha	Aufwand an Wirkstoff je Hektar
c	%	Massenanteil des Wirkstoffes in der Spritzflüssigkeit
p	bar	Spritzdruck — gemessen vor der Düse
t	s, h	Spritzdauer
$v_F$	m/s, m/h	Fahrgeschwindigkeit
$\rho$	$\text{kg/m}^3$	Dichte

### Schrifttum

Bücher sind durch ● gekennzeichnet

- [ 1 ] ● *Lee, R.E. jr. (Hrsg.): Air pollution from pesticides and agricultural processes. (264 Seiten, 12 Verfasser, 995 Schrifttumhinweise). Boca Raton, Florida: CRC Press INC, 1976.*
- [ 2 ] *Batel, W.: Belastung des Arbeitsplatzes durch Wirkstoffe beim Ausbringen von Pflanzenbehandlungsmitteln. Grundl. Landtechnik Bd. 31 (1981) Nr. 3, S. 94/108.*
- [ 3 ] *Rosßbauer, G. u. M. Heindl: Die Gebläsespritze im Hopfenbau. Hopfen-Rundschau Bd. 32 (1981) Nr. 14, S. 283/87.*
- [ 4 ] ● *Lüders, W.: Pflanzenschutzmaschinen und deren Einsatz. Stand 1979. Bezugsquelle: Landesanstalt für Pflanzenschutz Stuttgart.*
- [ 5 ] *Miller, M.L., A.W. Eissler u. J.W. Ackley: Tractor operator enclosure environment during pesticide application operations. ASAE-Paper No. 79-1009.*
- [ 6 ] *Vorsicht beim Umgang mit Pflanzenbehandlungs- und Schädlingsbekämpfungsmitteln. AID Schrift Nr. 136.*

## Mikroprozessorsteuerung der Äthanolgärung

Von A.G. Meiering, R.E. Subden und C.L. Pen, Guelph, Kanada\*)

DK 663:62-523

Die Steuerung der Äthanolgärung zielt darauf ab, den Gärungsprozeß in Hinsicht auf kleine Verweilzeit und gute Rohstoffausnutzung optimal ablaufen zu lassen. Die für die absätzig und kontinuierliche Äthanolgärung von Traubenmost entwickelten Simulations- und Steuerungsprogramme zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen simulierten und gemessenen Daten für Mostdichte, Mosttemperatur, Zellkonzentration und Kohlendioxidkonzentration. Mostdichte und Mosttemperatur

lassen sich mit geringem technischem Aufwand kontinuierlich messen und für die Prozeßsteuerung über einen Mikroprozessor nutzen. Solche Steuersysteme können ihre Entscheidungen außer auf die momentan erfaßten Meßwerte auch auf Vorausberechnungen von Simulationsdaten stützen; sie sind bezüglich der Erweiterungs- und Anpassungsfähigkeit herkömmlichen Systemen überlegen und dürften daher in Zukunft vermehrt zum Einsatz kommen.

\*) Dr. A.G. Meiering ist Professor für Biological Engineering und Dr. R.E. Subden Professor für Botanik und Genetik an der Universität Guelph in Guelph, Ontario, Kanada. Dr. C.L. Pen ist Professor an der Landtechnik-Abteilung der Chunghsin Universität in Taichung, Taiwan.

Forschungsmittel für die in diesem Aufsatz beschriebenen Arbeiten wurden vom National Science and Engineering Research Council of Canada, der Weinindustrie Ontarios und dem Ministerium für Landwirtschaft und Ernährung von Ontario zur Verfügung gestellt.

## 1. Einführung

Technischer Fortschritt und Massenproduktion integrierter Schaltsysteme haben zu einer deutlichen Verbilligung und entsprechenden Verbreitung der Computeranwendung geführt. Speziell programmierte Mikroprozessoren und Minicomputer fanden Eingang in alle Betriebsgrößen und -arten sowohl auf dem Verwaltungssektor als neuerdings verstärkt auch auf dem Sektor der Prozeßoptimierung und -steuerung. Die Gärungsindustrie mit der Herstellung von Antibiotika, Enzymen, Hefen, mikrobiellem Eiweiß, Brennspritus, sowie veredelten Milchprodukten und alkoholischen Getränken stellt in diesem Zusammenhang keine Ausnahme dar [1 bis 4].

Die Fähigkeit der Computer, Signale mit sehr hoher Frequenz zu verarbeiten und ausgedehntes Datenmaterial zu speichern, ermöglicht schnelle und genaue Simulationsverfahren mit einer bisher nicht gekannten Genauigkeit. Solche Verfahrenssimulationen können die Entscheidungskriterien für die Optimierung der interaktiven Prozeßsteuerung mit Computern bereitstellen. Die Steuerung kann sich somit auf die in der Vergangenheit registrierten und zusätzlich auf die dauernd überprüfbareren Daten von Simulationsvorausagen stützen.

Das Ziel der Computersteuerung bei der alkoholischen Gärung ist ein berechenbarer und reproduzierbarer Gärverlauf bei Optimierung von Reaktionskinetik, volumetrischer Produktivität und Energieausnutzung. Dadurch erhalten Qualitätskriterien und Transparenz des Prozeßverlaufs eine hohe Rangordnung im Vergleich zu Verwaltungsaspekten. Diese Priorität dürfte kaum Datenschutzprobleme, wie sie bei der Verarbeitung personenbezogener Informationen aufgetreten sind, verursachen. Es steht daher zu erwarten, daß die Computersteuerung rein technischer Prozesse mit weiteren Verbesserungen der funktionellen Sicherheit und Überschaubarkeit und mit fortschreitender Kostendegression anhaltend starken Zuspruch finden wird [1]. Die Grenzen dieses Wachstums werden eher durch Beschränkungen im Angebot an geeigneten Meßgeräten, Meßfühlern (Sensoren) und Software einschließlich von Prozeßanalyse und -simulation gezogen als durch Computerhardware.

Die Auswahl von Sensoren für Gärungskenngrößen wie Wärmezeugung, Gasbildung und -austausch, Substratverbrauch und Konzentration von Enzymen, Stoffwechselprodukten und Zellen ist abhängig von der Kompatibilität mit den technischen Rechnerfunktionen und von der Verfügbarkeit passender Rechnerprogramme. Sensoren herkömmlicher Bauart benötigen generell zusätzliche Geräte für die Signalaufbereitung, die unter Umständen erhebliche Kosten verursachen können. In Neuentwicklungen wurden die Funktionen der Signalaufbereitung in integrierten Schaltungen eines winzigen Bausteines zusammengefaßt, der im Sensor untergebracht ist. Temperatur- und Druckaufnehmer dieser Art kosten zum Beispiel nicht mehr als konventionelle Sensoren, erfordern aber keine zusätzlichen Aufwendungen für die Signalaufbereitung. Ähnliche Neuentwicklungen und Kosteneinsparungen können in Zukunft generell auch für andere Arten von Sensoren erwartet werden.

## 2. Simulationsmodell der alkoholischen Gärung

Das einschlägige Schrifttum enthält eine große Zahl theoretischer Modelle, die absätzige und kontinuierliche Gärprozesse in aeroben und anaeroben, festen und flüssigen Substraten beschreiben. Die meisten dieser Modelle basieren auf den Theorien von *Michaelis-Menten* und *Monod* für mikroheterogene Reaktionssysteme. Für die Beschreibung der alkoholischen Gärung bedeutsame Konzepte unterscheiden sich hauptsächlich in der Definierung der Hemmfaktoren von Ausgangs- und Endprodukten und in den statistischen Methoden der Parameterauswertung [5 bis 10]. *Boulton* [11] und *Wachtler* [12] haben Modelle für die absätzige Vergärung von Traubenmost vorgeschlagen, von denen Elemente in die folgende ausführlichere Beschreibung von Hefezellenwuchs, Kohlendioxid- und Äthanolproduktion, sowie Gärtemperaturregelung übernommen wurden:

$$\frac{dX_v}{dt} = D(X_{v_o} - X_v) + (y_g - d) X_v \quad (1a)$$

$$\frac{dX_m}{dt} = D(X_{m_o} - X_m) + y_g X_v \quad (1b)$$

$$\frac{dX_s}{dt} = D(X_{s_o} - X_s) - y_s X_v \quad (1c)$$

$$\frac{dX_a}{dt} = D(X_{a_o} - X_a) + c_1 y_s X_v \quad (1d)$$

$$\frac{dV_c}{dt} = D(V_{c_o} - V_c) + c_2 y_s X_v \quad (1e)$$

$$\frac{dE}{dt} = D \bar{\rho} c (T_o - T) + c_3 y_s X_v \quad (1f)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{V \bar{\rho} c} \left[ \left( \frac{dE}{dt} V - U_e A_T (T - T_L) - Q_c \rho_c c_c \Delta T_1 (1,0 - \exp(-c_K)) \right) \right] \quad (1g);$$

$$y_g = \frac{X_s}{K_s + X_s} y_m \quad (2a)$$

$$K_{s_a} = \left[ 1,0 - \frac{X_a}{K_a} \right] K_s \quad (2b)$$

$$K_s = K_{s_o} \exp(11000 a) \quad (2c)$$

$$y_m = 0,08 \exp(14200 b) - 0,0054 \exp(121000 a) \quad (2d)$$

$$y_s = c_y y_g \quad (2e)$$

$$c_y = [1 + 0,1 \exp(-9000 a)] \frac{1}{y_c} \quad (2f)$$

$$a = \frac{T - 287,3}{293,3 R T} \quad (2g)$$

$$b = \frac{T - 300,0}{300,0 R T} \quad (2h)$$

$$c_K = \frac{U_c A_c}{Q_c \rho_c c_c} \quad (2i)$$

$$d = d_o [\exp 200 (0,01 - y_g)]; \text{ für } y_g < 0,0125 \quad (2j)$$

Die im System Gln. (1) beschriebene Dynamik der Äthanolgärung basiert auf der Annahme, daß im gesamten Gärraum einheitliche Gärungsbedingungen herrschen. System Gln. (2) beschreibt die Konstanten und Parameter der in den Gärversuchen benutzten Hefe *Saccharomyces cerevisiae*. Die Aktivierungsenergien der Zellvermehrung und der Erhaltungsbedarf, der mit 10 % des Zucker Verbrauchs angenommen wurde, entsprachen den von *Boulton* [11] ermittelten Daten. Sie zeigten gute Übereinstimmung mit den von *Meiering u.a.* für *Kluyveromyces fragilis* veröffentlichten Werten [6]. Bei den mäßigen Zuckergehalten des in den Gärversuchen verwendeten Traubenmostes wurde die Substrathemmung des Zuckers vernachlässigt. Auch die Kohlendioxidhemmung, die bei höheren CO<sub>2</sub>-Drücken zum Beispiel in der Schaumweinherstellung eine deutliche Rolle spielt, blieb ohne Berücksichtigung. Die Hemmung durch Äthanol wurde im Einklang mit klassischen Kinetikkonzepten als lineare Funktion beschrieben [13]. Unter normalen Gärbedingungen bei  $y_g > 0,01$  wurden über 90 % der Zellen als

vermehrungsfähig in Rechnung gestellt. Unterhalb dieser Schwelle wurde mit einem exponentiellen Anstieg des Verlustes der Teilungsfähigkeit nach Gl. (2j) gerechnet, um den Einfluß des zunehmenden Nährstoffmangels zum Ausdruck zu bringen. Der Wärmeaustausch des Gärbehälters bezieht sich auf freie Konvektionsströmung an den Tankoberflächen und auf einen logarithmisch gemittelten Temperaturunterschied zwischen Kühlmittel und Gärsubstrat am Zentralrohr.

## 2.1 Absätziges Gärverfahren

Implizite numerische Integration des Systems Gln. (1) mit  $D = 0$  führt zu folgender Lösung für das absätziges Gärverfahren:

$$X_{v_i} = \frac{X_{v_{i-1}}}{1,0 - (y_g - d) h_1} \quad (3a)$$

$$X_{m_i} = X_{m_{i-1}} + y_g X_{v_i} h_1 \quad (3b)$$

$$X_{s_i} = X_{s_{i-1}} - y_s X_{v_i} h_1 \quad (3c)$$

$$X_{a_i} = X_{a_{i-1}} + c_1 y_s X_{v_i} h_1 \quad (3d)$$

$$V_{c_i} = V_{c_{i-1}} + c_2 y_s X_{v_i} h_1 \quad (3e)$$

$$\Delta E = c_3 y_s X_{v_i} h_1 \quad (3f)$$

$$T_i = \frac{V \bar{\rho} c T_{i-1} + [\Delta E V + U_e A_T T_L + Q_c \rho_c c_c T_1 (1,0 - \exp(-c_K))] h_1}{V \bar{\rho} c + [U_e A_T + Q_c \rho_c c_c (1,0 - \exp(-c_K))] h_1} \quad (3g)$$

System Gln. (3) beschreibt die Änderungen der Zell-, Zucker- und Äthanolkonzentration, der Kohlendioxidproduktion, der mikrobiellen Wärmezeugung und der Gärtemperatur während der primären Gärperiode. Die im System Gln. (2) definierten Parameter wurden nach jedem Integrationsschritt mit den neuen Werten dieser Variablen dem jeweiligen Gärungszustand angepaßt.

Die auf das Volumen des Gärraums bezogene Gesamtmasse (Gesamtkonzentration) der Hauptbestandteile Wasser, Zucker, Hefezellen, Äthanol und der nicht am Gärprozeß teilnehmenden festen und flüssigen Extrakte und Trubstoffe beträgt

$$X_{ges} = X_w + X_s + X_m + X_a + X_E \quad (4)$$

Die insgesamt im Gärraum vorhandene Wassermasse, die Wasserkonzentration, ergibt sich aus den Anfangskonzentrationen als

$$X_w = (1,0 - \frac{X_E}{\rho_E} - \frac{X_{s_0}}{\rho_s}) \rho_w \quad (5)$$

Bei Vernachlässigung der unbedeutenden Verdunstungsverluste des Wassers und der relativ geringen Konzentrationsänderungen der Extraktstoffe, Säuren und festen Trubanteile während der alkoholischen Gärungsperiode mit *Saccharomyces cerevisiae* beträgt das Gesamtvolumen

$$V_{ges} = \frac{m_w}{\rho_w} + \frac{m_s}{\rho_s} + \frac{m_m}{\rho_m} + \frac{m_a}{\rho_a} + \frac{m_E}{\rho_E} \quad (6)$$

Aus Gln. (4) und (6) ergibt sich eine Substratdichte von

$$\bar{\rho} = \frac{m_{ges}}{V_{ges}} = X_{ges} \quad (7)$$

und weiterhin eine volumetrische Gesamtäthanolkonzentration von

$$X_{a_{vol}} = \frac{m_a}{\rho_a V_{ges}} = \frac{X_a}{\rho_a} \quad (8)$$

Die in Gl. (7) definierte Dichte entspricht dem allgemein gebräuchlichen Qualitätsindex des Grad Öchsle und läßt sich leicht während der Gärung mit einem korrosionsfesten Druckaufnehmer fortlaufend als Funktion der wichtigsten Prozeßvariablen messen. Sie diene daher in den Gärversuchen neben den ebenfalls kontinuierlich gemessenen Werten der Kohlendioxidproduktion und der Substrattemperatur als wichtigster Index des Gärungszustandes. Ein Vergleich der Meß- und Simulationsdaten dieser drei Größen und der nicht kontinuierlich meßbaren Zellkonzentration erlaubt eine kritische Bewertung des Simulationsmodells der absätziges Gärführung.

## 2.2 Kontinuierliches Gärverfahren

Der stationäre Zustand des kontinuierlichen Verfahrens läßt sich mit dem System der Gln. (1) beschreiben, wenn alle zeitlichen Ableitungen gleich Null gesetzt werden. Danach ergibt Einsetzen von Gl. (1c) in (1a) zunächst:

$$(y_g - d - D) (X_{s_0} - X_s) + c_y y_g X_{v_0} = 0 \quad (9)$$

Auflösen von  $y_g$  nach  $X_s$  durch Einsetzen von Gl. (1d) in Gl. (2b) und weitere Substitution dieses Ausdruckes in Gln. (2a) und (9) führt zu:

$$a X_s^2 + b X_s - c = 0 \quad (10a),$$

mit

$$a = (D + d) (1,0 - \frac{K_s}{K_a} c_1) - y_m \quad (10b)$$

$$b = y_m (X_{s_0} + c_y X_{v_0}) + (D + d) K_s (1,0 + \frac{X_{a_0}}{K_a} + 2,0 \frac{c_1}{K_a} X_{s_0} - \frac{X_{s_0}}{K_s}) \quad (10c)$$

$$c = (D + d) K_s X_{s_0} (1,0 + \frac{X_{a_0}}{K_a} + \frac{c_1}{K_a} X_{s_0}) \quad (10d)$$

und zu der technisch sinnvollen Lösung:

$$X_s = \frac{(4 a c + b^2)^{1/2} - b}{2 a} \quad (10e)$$

$$X_v = \frac{D}{y_s} (X_{s_0} - X_s) \quad (10f)$$

$$X_m = X_{m_0} + \frac{y_g}{y_s} (X_{s_0} - X_s) \quad (10g)$$

$$X_a = X_{a_0} + c_1 (X_{s_0} - X_s) \quad (10h)$$

$$V_c = c_2 (X_{s_0} - X_s) \quad (10i)$$

$$\Delta T_1 = \frac{D V \bar{\rho} c (T_0 - T) + V c_3 y_s X_v - U_e A_T (T - T_L)}{Q_c \rho_c c_c [1,0 - \exp(-c_K)]} \quad (10j)$$

$$T_1 = T - \Delta T_1 \quad (10k)$$

Das System der Gln. (10) beschreibt die Eigenschaften des Substrates am Ausgang des Durchlaufbehälters als Funktion der Eingangskonzentrationen, der Stoff- und Systemparameter und der Durchlaufgeschwindigkeit oder Verweilzeit. Gl. (10k) definiert ferner den Einfluß der Eingangstemperatur des Mostes und der Kenndaten des Kühlsystems auf die erforderliche Kühlmitteltemperatur. Kontinuierliche Verfahren spielen bisher bei der Mostvergärung nur eine geringe Rolle, könnten jedoch mit verbesserter Prozeßkontrolle bei stabilen Ausgangsprodukten wegen ihrer größeren volumetrischen Produktivität stärkere Bedeutung erlangen.

### 3. Gärversuche

In den Gärversuchen wurde Most der Traubensorte Elvira, einer Viniferahybride, verwendet. Um einheitliches Ausgangssubstrat einzusetzen, wurde der Most unmittelbar vor Versuchsbeginn aus Konzentrat zubereitet. Es wurde in die in Bild 1 dargestellten 100 l fassenden Edelstahlbehälter gefüllt und mit *Saccharomyces cerevisiae* beimpft. Die Versuche blieben auf das absätziges Verfahren begrenzt und wurden nach der primären Periode der alkoholischen Gärung von ca. 200–250 h beendet. Mostdichte, -temperatur und Kohlendioxidproduktion wurden fortlaufend von einem Mikroprozessor (AIM65 der Fa. Rockwell) aufgezeichnet, der auch über das doppelwandige Zentralrohr mit Rührwerk die Mosttemperatur und Hefeverteilung steuerte. Temperaturen wurden mit Cu-Konstantan-Thermoelementen, die Dichte mit einem Druckaufnehmer (P-500-Schaevitz) gemessen. Der Kohlendioxidfluß wurde mit einem nach dem Verdrängungsprinzip arbeitenden Gaszähler registriert, der nach jeder Achsdrehung einen Impuls abgibt. Das Prinzip der Signalaufnahme und Gärungssteuerung ist aus Bild 2 ersichtlich.

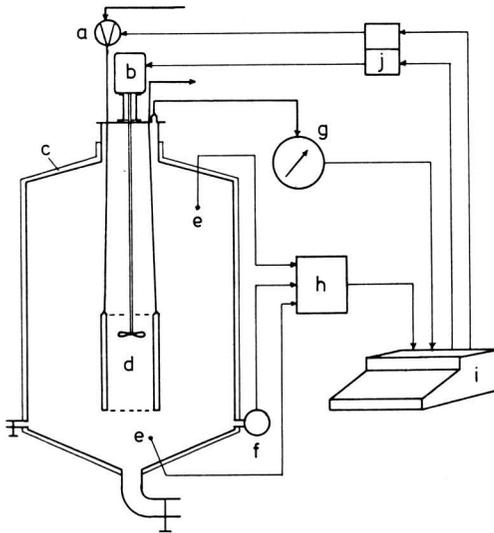


Bild 1. Anordnung für Gärversuche.

- |                               |                      |
|-------------------------------|----------------------|
| a Magnetventil für Kühlmittel | f Druckaufnehmer     |
| b Rührwerksmotor              | g Gaszähler          |
| c Wärmeisolierung             | h Signalaufbereitung |
| d Zentralrohr-Wärmetauscher   | i Mikroprozessor     |
| e Thermolemente               | j Optokoppler        |

### 4. Vergleich von Meß- und Simulationsergebnissen

Die Anfangsbedingungen der Gärung und die wichtigsten Prozeßkonstanten der Versuche sind in Tafel 1 angegeben. Bei einer relativen Höhe von 1,5 Tankdurchmessern ergab sich eine Tankoberfläche von 1,21 m<sup>2</sup>. Die durchschnittliche Wärmedurchgangszahl der isolierten Tankwände betrug 2,2 kJ/m<sup>2</sup> h K [14]. Das doppelwandige Zentralrohr hatte eine Gesamtaustauschfläche von 0,28 m<sup>2</sup> und eine Wärmedurchgangszahl von ca. 4000 kJ/m<sup>2</sup> h K bei einem stündlichen Kühlwasserdurchsatz von 0,5 Tankvolumen [15].

Der Betrieb des im Zentralrohr angeordneten Rührwerks wurde zusammen mit dem Kühlmittelumlauf vom Mikroprozessor geregelt. Er bewirkte neben der Verbesserung des Wärmeüberganges auch eine bessere Verteilung der Hefezellen im Gärsubstrat. Die Gärtemperatur wurde konstant auf 14 °C gehalten. Bei einem Meßintervall von 30 s blieben die Temperaturunterschiede zwischen den oberen und unteren Mostschichten auf 0,3 °C begrenzt. Unterschiede von 2 bis 5 °C wurden beobachtet, wenn das Rührwerk für längere Zeit außer Betrieb war. Die Mostdichte wurde in Intervallen von 30 min registriert.

Größe	Zahlenwert	Einheit	Quelle
$X_{s0}$	210,0	kg/m <sup>3</sup>	–
$X_{v0}$	0,5	kg/m <sup>3</sup>	–
$X_E$	40,0	kg/m <sup>3</sup>	[16]
$K_{s0}$ (absätz. Verf.)	100,0	kg/m <sup>3</sup>	[11]
$K_{s0}$ (kont. Verf.)	6,0+(66 D) <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	–
$K_a$	40–90	kg/m <sup>3</sup>	–
$\gamma_c$	0,09	kg/kg	[17, 18]
$c_1$	0,486	kg/kg	[16]
$c_2 \rho_{CO_2}$	0,466	kg/kg	[16]
$c_3$	547,1	kJ/kg	[18]
$\rho_s$	1580,0	kg/m <sup>3</sup>	[19]
$\rho_a$	789,2	kg/m <sup>3</sup>	[19]
R	8,314	kJ/kmol K	[19]

Tafel 1. Anfangsbedingungen und Prozeßkonstanten typischer Gärversuche.

Bild 3 zeigt im unteren Diagramm eine gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen und simulierten Werten von Mostdichte und CO<sub>2</sub>-Produktion, im oberen Diagramm eine annähernde Übereinstimmung der Zellkonzentration für einen typischen absätziges Gärversuch.

Das kontinuierliche Gärverfahren wurde von uns nicht experimentell untersucht. Simulationsdaten konnten allerdings mit gemessenen Werten aus der Schaumweinbereitung, die von Cahill u.a. [17] veröffentlicht wurden, verglichen werden. Es wurde angenommen, daß es sich dabei um eine Hefe mit wesentlich höherer Äthanoltoleranz und Wachstumsrate handelte. Außerdem wurde die Sättigungskonstante neu definiert, indem ihr Wert jetzt von einem niedrigeren Grundwert von ca. 6,0 kg/m<sup>3</sup> mit der dritten Potenz der Substratzufuhr D den im absätziges Verfahren benutzten Werten zustrebt. Dieser Trend, der nicht weiter analysiert werden konnte, ist wahrscheinlich einer komplementären Zuckerhemmung zuzuschreiben.

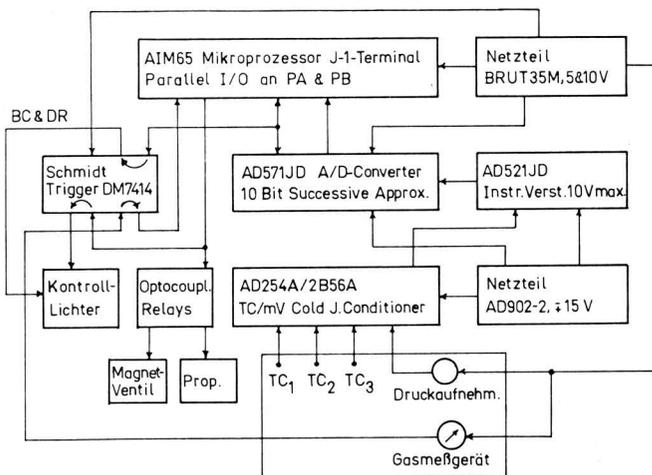
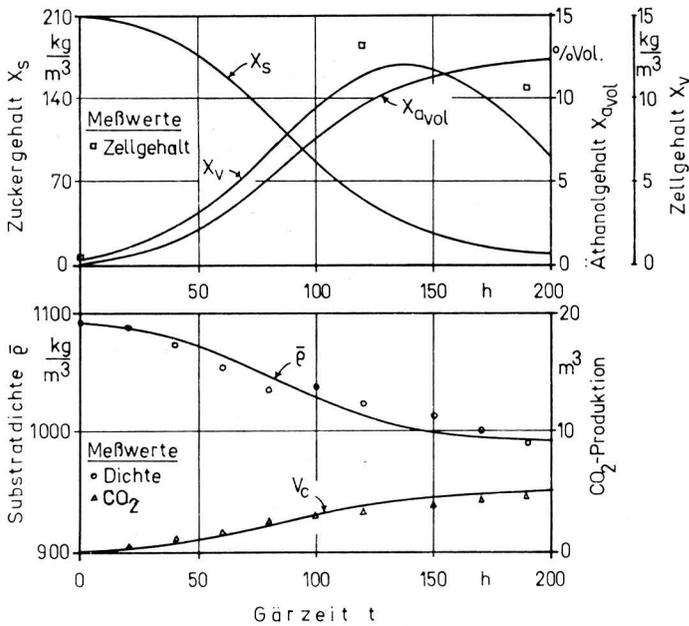


Bild 2. Flußdiagramm der Signalverarbeitung.



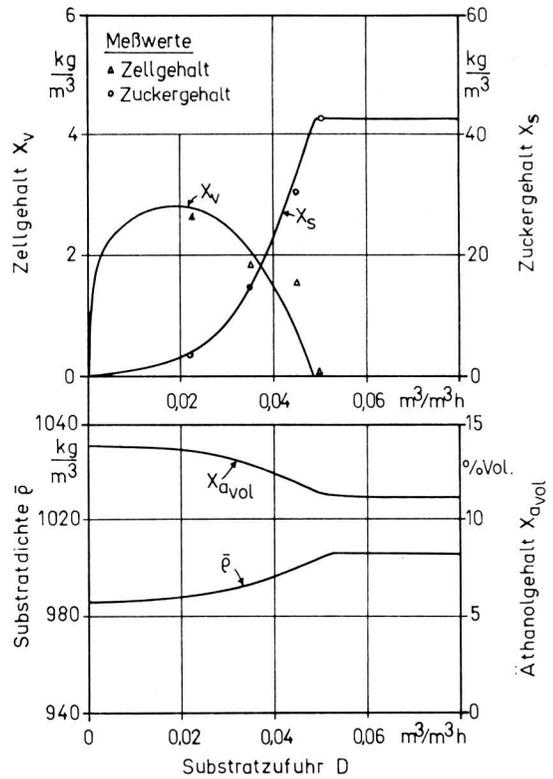
**Bild 3.** Absätziges Vergären von Traubenmost mit *Saccharomyces cerevisiae*; Vergleich gemessener Werte (eingetragene Punkte) mit durch Simulation bestimmten Werten (Kurven).

Unter den genannten Bedingungen ergab sich die in **Bild 4** gezeigte gute Übereinstimmung zwischen simulierten und gemessenen Werten eines bei atmosphärischem Druck abgelaufenen Versuches. Obwohl bei den in der Schaumweinbereitung höheren Drücken des Kohlendioxids die spezifische Wachstumsrate deutlich zurückgeht, **Bild 5**, so bleibt doch die volumetrische Produktivität beim kontinuierlichen Verfahren höher als beim absätzigen Verfahren, weil die nach dem Beimpfen eintretende Verzögerungsphase umgangen wird. Zellenabfluß und Restzucker begrenzen die Substratzufuhr auf Werte zwischen 0,005 und 0,025  $\text{m}^3/\text{m}^3 \text{h}$ . Sekundärstufen können zwar das Gärungsergebnis über längere Verweilzeiten qualitativ verbessern, verursachen aber eine schlechtere Gärraumproduktivität. Außerdem verlangt das kontinuierliche Verfahren ein stabiles Ausgangssubstrat, das bei der Schaumweinherstellung in Form des Grundweines gegeben ist, bei der Weinherstellung bei Mosten unterschiedlicher Ernten aber nicht leicht zu gewährleisten ist.

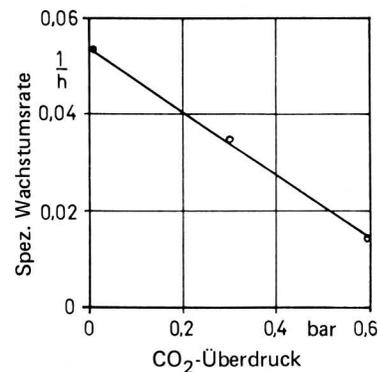
Die Simulations- und Regelprogramme hatten je einen Speicherbedarf von 4 K, also insgesamt 8 K Bytes im RAM. Die Optimierung kann vor Gärungsbeginn mit Hilfe der Simulationsprogramme erfolgen. Dabei läßt sich deutlich der Welleneffekt von Änderungen der Prozeßdaten erkennen und entsprechend bewerten. Ausgewählte Daten lassen sich als Entscheidungskriterien speichern und gegebenenfalls bei Abweichungen vom vorgesehenen Prozeßablauf auch während der Gärung im Simulationsverfahren berichtigen. Der Rechenzeitbedarf pro Tag Prozeßzeit liegt nämlich im Bereich von etwa einer Sekunde und kann daher während der Wartezeiten des Regelprogrammes bewältigt werden.

Die Temperaturregelung benutzte die vom Mikroprozessor berechnete Durchschnittstemperatur als Eingangsgröße. Der Zentralrohrdurchfluß ließ sich beenden, wenn in der Endphase der Äthanolgärung ein Absetzen der Trubstoffe und Hefezellen erforderlich wird. Eine genaue Messung der Kohlendioxidproduktion könnte in der Praxis wegen der damit verbundenen Abdichtungsprobleme in vielen Fällen zu schwierig werden, im Großbetrieb aber für eine eventuelle Nutzung auch der flüchtigen Gärprodukte Bedeutung erlangen. Der Gärverlauf läßt sich jedoch durch die technisch einfachen Messungen der Substratdichte und der Gärtemperatur soweit verfolgen, daß ein recht zuverlässiges Bild über die wichtigsten Qualitätsmerkmale, über den zeitlichen Gärablauf und den quantitativen Gärerfolg vermittelt wird. Zusätzliche Sensoren, zum Beispiel für Enzymtätigkeiten, Redoxpotential oder Zellflu-

oreszenz, und verbesserte Kenntnisse der Reaktionskinetik hochwertiger Ingredienzen wie Aroma- und Bukettstoffe können den Wirkungsbereich der Gärungsprozeßregelung mit Mikroprozessoren weiter verbessern, wenn die damit gegebenen Möglichkeiten zuverlässig in die Gesamtkinetik der Simulationsmodelle eingebunden werden.



**Bild 4.** Kontinuierliche Vergärung von Grundwein mit *Saccharomyces cerevisiae*; Vergleich von gemessenen Werten [17] mit Werten aus der Simulation;  $X_{s_0} = 42,7 \text{ kg/m}^3$ ,  $X_{a_0} = 11,3 \text{ Vol.-%}$ .



**Bild 5.** Spez. Wachstumsrate von *Saccharomyces cerevisiae* in Abhängigkeit vom Überdruck an Kohlendioxid, nach [17].

## 5. Schlußfolgerungen

Die Reaktionskinetik absätziger und kontinuierlicher Verfahren der alkoholischen Gärung läßt sich in Simulationsmodellen beschreiben, die als Software-Komponenten bei der Prozeßsteuerung durch Mikroprozessoren verwendbar sind.

Die Substrattemperatur und die Dichte lassen sich leicht mit konventionellen, säurefesten Sensoren messen und können in einfachen Regelsystemen als Kenngrößen des Gärungszustandes verwendet werden.

Ein Mikroprozessor mit 8 K Bytes RAM oder PROM kann sowohl einfache Simulations- als auch Datenverarbeitungsprogramme für eine elementare Computersteuerung des Gärverlaufs einer begrenzten Anzahl von Behältern aufnehmen. Zusätzliche Software und Sensoren würden bei etwa 32 K den Bedarf eines Klein- bis Mittelbetriebes decken können.

Die Verwendung von Sensoren mit kompatiblen, integrierten Schaltungen bietet größere Flexibilität und größere Einsatzmöglichkeiten als herkömmliche Steuersysteme. Daher dürfte vor allem mit den zu erwartenden Verbesserungen der Funktionssicherheit und Software in fest und verbraucherfreundlich programmierten PROM-Chips der Einsatzbereich von Mikroprozessoren in der Prozeßsteuerung sich weiter ausdehnen.

#### Verwendete Formelzeichen

$A_c$	$m^2$	Wärmeaustauschfläche des Zentralrohres
$A_T$	$m^2$	Oberfläche des Gärbehälters
$c$	$\text{kJ/kg K}$	Spez. Wärme des Gärsubstrates
$c_c$	$\text{kJ/kg K}$	Spez. Wärme des Kühlmittels
$c_1$	$\text{kg/kg}$	Spez. Äthanolbildung (Äthanolmasse/Zuckermasse)
$c_2$	$\text{m}^3/\text{kg}$	Spez. $\text{CO}_2$ -Bildung ( $\text{CO}_2$ -Volumen/Zuckermasse)
$c_3$	$\text{kJ/kg}$	Mikrobielle Reaktionswärme (Wärmeenergie/Zuckermasse)
$D$	$\text{m}^3/\text{m}^3 \text{ h}$	Substratzufuhr
$d, d_0$	$1/\text{h}$	Inaktivierungsraten der Hefezellen
$E$	$\text{kJ/m}^3$	Stoffwechselwärme
$K_a$	$\text{kg/m}^3$	Konstante für Hemmwirkung des Äthanols
$K_s, K_{s_0}$	$\text{kg/m}^3$	Sättigungskonstanten
$Q_c$	$\text{m}^3/\text{h}$	Kühlmitteldurchsatz
$R$	$\text{kJ/kmol K}$	Gaskonstante
$T$	$^\circ\text{C}$	Substrattemperatur
$T_0$	$^\circ\text{C}$	Eingangstemperatur des Substrates
$T_1$	$^\circ\text{C}$	Eingangstemperatur des Kühlmittels
$\Delta T_1$	$^\circ\text{C}$	Unterschied der Eingangstemperaturen von Substrat und Kühlmittel
$T_L$	$^\circ\text{C}$	Lufttemperatur
$t$	$\text{h}$	Zeit
$U_c$	$\text{kJ/m}^2 \text{ h K}$	Wärmedurchgangszahl des Zentralrohres
$U_e$	$\text{kJ/m}^2 \text{ h K}$	Wärmedurchgangszahl der isolierten Tankoberfläche
$V$	$\text{m}^3$	Volumen des Gärbehälters
$V_c, V_{c_0}$	$\text{m}^3/\text{m}^3$	Kohlendioxidkonzentration
$X_a, X_{a_0}$	$\text{kg/m}^3$	Äthanolkonzentration
$X_m, X_{m_0}$	$\text{kg/m}^3$	Gesamthefezellenkonzentration
$X_s, X_{s_0}$	$\text{kg/m}^3$	Gesamtzuckerkonzentration
$X_v, X_{v_0}$	$\text{kg/m}^3$	Konzentration vermehrungsfähiger Hefezellen
$X_w$	$\text{kg/m}^3$	Wasserkonzentration
$y_c$	$\text{kg/kg}$	Mikrobielle Substratverwertung (Zellmasse/Zuckermasse)
$y_g$	$1/\text{h}$	Spez. Wachstumsrate
$y_m$	$1/\text{h}$	Max. Wachstumsrate
$\bar{\rho}$	$\text{kg/m}^3$	Mittlere Dichte des Substrates

$\rho_a$	$\text{kg/m}^3$	Mittlere Dichte des Äthanols
$\rho_c$	$\text{kg/m}^3$	Mittlere Dichte des Kühlmittels
$\rho_m$	$\text{kg/m}^3$	Mittlere Dichte der Hefezellen
$\rho_s$	$\text{kg/m}^3$	Mittlere Dichte des Zuckers
$\rho_E$	$\text{kg/m}^3$	Mittlere Dichte der Extrakte und Trubstoffe
$\rho_w$	$\text{kg/m}^3$	Mittlere Dichte des Wassers
$i$	—	Folgeindex der num. Integration und der Iterationsformel
$o$	—	Index für Zeitpunkt $t = 0$
$h_1$	$\text{h}$	Schrittweite der numerischen Integration

#### Schrifttum

Bücher sind durch ● gekennzeichnet

- [ 1 ] ● *Cooney, C.L.*: Computer application in fermentation technology — A perspective. In Proc. 2. Internat. Conf. on Computer Applic. in Ferment. Technol. Biotechnology & Bioengineering Symposium No. 9 New York: John Wiley & Sons, 1979, S. 1/11.
- [ 2 ] ● *Jefferis, R.P., S.S. Klein u. J. Drakeford*: Single board microcomputer for fermentation control. In Proc. siehe [1], S. 231/39.
- [ 3 ] ● *Mohler, R.D., P.J. Henniger, H.C. Lim, G.T. Tsao u. W.A. Weigand*: Development of computerized fermentation system having complete feedback capabilities for use in a research environment. In Proc. siehe [1], S. 257/68.
- [ 4 ] ● *Spruytenburg, R., I.J. Dunn u. J.R. Bourne*: Computer control of glucose feed to a continuous aerobic culture of *saccharomyces cerevisiae* using the respiratory quotient. In Proc. siehe [1], S. 359/68.
- [ 5 ] ● *Bosujak M., V. Topolovec u. V. Johanides*: Growth kinetics and antibiotic synthesis during repeated fed-batch culture of streptomycetes. In Proc. siehe [1], S. 155/65.
- [ 6 ] *Meiering, A.G., F.A. Azi u. K.F. Gregory*: Microbial protein production from whey and cassava. Transactions ASAE Bd. 21 (1978) Nr. 3, S. 586/93.
- [ 7 ] *Okuda, W., H. Fukuda u. H. Morikawa*: Kinetic expressions of ethanol production rate and ethanol consumption rate in bakers yeast cultivation. J. Ferment. Technol. Bd. 59 (1981) Nr. 2, S. 103/109.
- [ 8 ] ● *Raimbault, M.*: Fermentation en milieu solide. Croissance de champignons filamenteux sur substrat amylic. These Doctorat Univ. de Toulouse ORSTOM-Publication No. 127, Paris, 1981, 291 S.
- [ 9 ] ● *Weigand, W.A., H.C. Lim, C.C. Creagan u. R.D. Mohler*: Optimization of a repeated fed-batch reactor for maximum cell productivity. In Proc. siehe [1], S. 335/48.
- [ 10 ] ● *Endo, I., T. Nagamune u. I. Inoue*: Optimal strategy for batch alcoholic fermentation. In Proc. siehe [1], S. 321/33.
- [ 11 ] *Boulton, R.*: The prediction of fermentation behaviour by a kinetic model. Am. J. Enol. Vitic. Bd. 31 (1980) Nr. 1, S. 40/45.
- [ 12 ] ● *Wachtler, I.*: Kinetik der Traubensaftgärung. Mitteilungen Klosterneuburg, Jahrg. 29 (1979) Nr. 6, S. 248/52.
- [ 13 ] ● *Cornish-Bowden, A.*: Principles of enzyme kinetics. London: Butterworths, 1976.
- [ 14 ] ● *Wong, H.Y.*: Heat transfer for engineers. London: Longman, 1977.
- [ 15 ] ● *Hell, F.*: Grundlagen der Wärmeübertragung. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1973.

[ 16 ] ● *Vogt, E.*: Weinchemie und Weinanalyse. Stuttgart: Ulmer-Verlag, 1970.  
 [ 17 ] *Cahill, J.T., P.A. Carroad u. R.E. Kunkee*: Cultivation of yeast under carbon dioxide pressure for use in continuous sparkling wine production. Am. J. Enol. Vitic. Bd. 31 (1980) Nr. 1, S. 46/52.

[ 18 ] ● *Trost, G.*: Technologie des Weines. Stuttgart: Ulmer-Verlag, 1972.  
 [ 19 ] ● *Weast, R. u. M.J. Astle (Hrsg.)*: CRC-Handbook of chemistry and physics. Boca Raton, Florida: CRC Press Inc., 1980.

## Restschleierbildung bei Pflanzenschutz-Feldspritzungen

Von Horst Göhlich und Zülfü Selcan, Berlin\*)

DK 631.348:632.981.1

Spritzschleier hinter Feldspritzbalken haben über die Abdrift Bedeutung sowohl für die Belastung der Umwelt wie für die Belastung des Fahrers beim Ausbringen von Pflanzenbehandlungsmitteln.

In diesem Beitrag wird experimentell untersucht, wie sich verschiedene Parameter wie Fahrgeschwindigkeit, Spritzdruck, Düsenart und Düsengröße auf die räumliche Ausdehnung des Spritzschleiers auswirken. Es zeigt sich, daß von diesen Größen die Fahrgeschwindigkeit von größtem Einfluß auf die Länge des Spritzschleiers ist.

### 1. Die Schleierbildung hinter Spritzdüsen

Mit den Untersuchungen sollte experimentell das Verhalten der Spritzschleier hinter Feldspritzbalken dargestellt und bewertet werden. Es ist bekannt, daß höhere Fahrgeschwindigkeiten bei gleichen Spritzparametern eine größere Abdrift verursachen können. Eine solche Abdrift wird in der Regel durch die Geschwindigkeit des natürlichen Windes hervorgerufen, dessen Geschwindigkeit aus horizontalen und vertikalen Komponenten zusammengesetzt sein kann. Der natürliche Wind wird umso mehr Teilchen bzw. Wirkstoffsubstanz aus einem Spritzschleier herauslösen und mit sich führen, je größer die Zeit der Sedimentation zwischen Düse und Bestand bzw. Ablageort der Teilchen ist und je weiter der sedimentierende Spritzschleier auseinandergezogen ist.

Die Zeit der Sedimentation des Spritzschleiers hängt in erster Linie von der Teilchengrößenzusammensetzung ab, die Länge des Spritzschleiers hinter der Düse von der Fahrgeschwindigkeit.

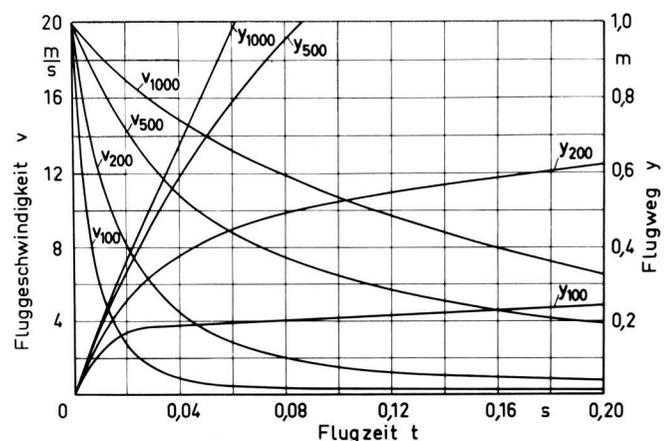
Solange der überwiegende Volumenanteil eines Spritzschleiers im Tropfengrößenbereich über etwa 100 µm liegt, wird dieser Anteil direkt, d.h. in kurzer Zeit und nur wenig vom Winde beeinflusst, in den Bestand gelangen. Der sich ausbildende Restschleier aus kleineren Tropfen folgt in seinem Bewegungsverhalten weitgehend den Sedimentationsgesetzen und dem herrschenden Strömungsfeld.

Aus Bild 1 wird die bekannte Tatsache ersichtlich, daß die kleinen Tropfen nach Verlassen der Düse je nach ihrer Größe (Indizes geben die Tropfengröße in µm an) mehr oder weniger schnell ihre Endgeschwindigkeit (die Schwebegeschwindigkeit) annehmen. Ein 100 µm-Tropfen erreicht seine Endgeschwindigkeit bereits nach 0,2 m, ein 200 µm-Tropfen etwa nach 0,6 m (im Bild Wert des zugehörigen y dort, wo v einen konstanten Wert annimmt). Alle grö-

ßeren Tropfen erreichen den Pflanzenbestand mit einer Geschwindigkeit, die wesentlich größer als die jeweilige Schwebegeschwindigkeit ist.

Was hinter der fahrenden Düse sichtbar wird, Spritzschleier oder auch Restschleier genannt, besteht somit überwiegend aus Tropfen, die kleiner als 100 µm sind. Hierbei ist anzumerken, daß durch Verdunstung die Tropfengröße während der Sinkzeit ständig abnimmt [2, 3].

Die Schleierbildung soll im folgenden außer durch die bekannten theoretischen Zusammenhänge durch experimentelle Ergebnisse verdeutlicht werden.



**Bild 1.** Fluggeschwindigkeit und Flugweg von Wassertropfen in der Luft in Abhängigkeit von der Flugzeit. Tropfenabgabe senkrecht nach unten mit einer Anfangsgeschwindigkeit  $v_0 = 20$  m/s, nach *Zaske* [1].

### 2. Analytische Betrachtung

Die Bewegung der durch die Zerstäubung erzeugten Tropfen in den Pflanzenbestand erfolgt nach den strömungstechnischen Gesetzmäßigkeiten. Die maßgebende Größe dafür bildet die Widerstandszahl:

$$c_w = f(\text{Re}); \quad \text{Re} = d v / \nu.$$

Nachdem der Tropfen mit einer Anfangsgeschwindigkeit  $v_0$ , die etwa der Strahlaustrittsgeschwindigkeit entspricht, die Düse verlassen hat, wird seine Fortbewegung infolge des Luftwiderstandes gebremst, so daß er nach einer gewissen Zeit mit einer konstanten Schwebegeschwindigkeit  $v_s$  sedimentiert.

\*) Prof. Dr.-Ing. H. Göhlich ist Leiter des Instituts für Maschinenkonstruktion – Bereich Landtechnik und Baumaschinen – der Technischen Universität Berlin, Dipl.-Ing. Z. Selcan ist wiss. Mitarbeiter an diesem Institut.