

Bernd C. Bodenschatz

Entwicklung eines
Echtzeit-Ausbildungs-Simulators für
Fermentationen in Rührkesselreaktoren

Diplomarbeit

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek: Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de/> abrufbar.

Dieses Werk sowie alle darin enthaltenen einzelnen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsschutz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlanges. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen, Auswertungen durch Datenbanken und für die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronische Systeme. Alle Rechte, auch die des auszugsweisen Nachdrucks, der fotomechanischen Wiedergabe (einschließlich Mikrokopie) sowie der Auswertung durch Datenbanken oder ähnliche Einrichtungen, vorbehalten.

Copyright © 2002 Diplom.de
ISBN: 9783832455293

Bernd C. Bodenschatz

Entwicklung eines Echtzeit-Ausbildungs-Simulators für Fermentationen in Rührkesselreaktoren

Bernd C. Bodenschatz

Entwicklung eines Echtzeit- Ausbildungs-Simulators für Fermentationen in Rührkesselreaktoren

Diplomarbeit
an der Fachhochschule Jena
Fachbereich Medizintechnik
März 2002 Abgabe



Diplomica GmbH ———
Hermannstal 119k ———
22119 Hamburg ———

Fon: 040 / 655 99 20 ———
Fax: 040 / 655 99 222 ———

agentur@diplom.de ———
www.diplom.de ———

ID 5529

Bodenschatz, Bernd C.: Entwicklung eines Echtzeit-Ausbildungs-Simulators für Fermentationen in Rührkesselreaktoren / Bernd C. Bodenschatz - Hamburg: Diplomica GmbH, 2002
Zugl.: Jena, Diplomarbeit, 2002

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Die Informationen in diesem Werk wurden mit Sorgfalt erarbeitet. Dennoch können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden, und die Diplomarbeiten Agentur, die Autoren oder Übersetzer übernehmen keine juristische Verantwortung oder irgendeine Haftung für evtl. verbliebene fehlerhafte Angaben und deren Folgen.

Diplomica GmbH
<http://www.diplom.de>, Hamburg 2002
Printed in Germany

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	Zieldefinition	6
3	Realisierung	6
4	Grundlagen	7
4.1	Grundlagen der Simulationstechnik	7
4.1.1	Simulation bioverfahrenstechnischer Prozesse	8
4.1.2	Schulungs- und Trainingssimulatoren	9
4.1.3	Anforderungen an die Echtzeitsimulation	10
4.1.4	Grundlagen zu WinErs	10
4.2	Aufgaben des Rührkesselreaktors	15
4.2.1	Leistungseintrag in homogener Flüssigkeit	16
4.2.1.1	Pneumatischer Leistungseintrag in homogener Flüssigkeit	16
4.2.1.2	Rührleistung in homogener Flüssigkeit	17
4.2.2	Sauerstoffeintrag in Fermentationsbrühen	18
4.2.2.1	Vorgänge an der Phasengrenze gasförmig/flüssig – Zweifilmtheorie	19
4.2.2.2	Stoffaustausch in dispersen Gas/Flüssigsystemen	20
4.2.2.3	Reinsauerstoffbegasung und Erhöhung des Gesamtdruckes im System	21
4.2.3	Grundlagen der Wärmeübertragung	22
4.2.3.1	Wärmeleitung	23
4.2.3.2	Konvektiver Wärmetransport	23
4.2.3.3	Wärmestrahlung	23
4.2.3.4	Wärmedurchgang	23
4.2.4	Schaumentstehung und Schaumbekämpfung am Rührkesselreaktor	24
4.3	Stand des Wissens zu <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	25
4.3.1	Physiologie von <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	25
4.3.2	Stoffwechsel von <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	26
4.3.2.1	Stofftransport durch die Zellmembran	27
4.3.2.2	Oxidativer Stoffwechsel auf Glucose	27
4.3.2.3	Oxidativer Stoffwechsel unter Crabtreeeffekt	27
4.3.2.4	Oxidativer Stoffwechsel auf Ethanol	28
4.3.2.5	Pasteureffekt, reduktiver Stoffwechsel auf Glucose	28
5	Modell	30
5.1	Modell zur Volumenbilanz	31
5.2	Modell zum Leistungseintrag in homogener Flüssigkeit	34

5.2.1	Modell zum pneumatischen Leistungseintrag in homogener Flüssigkeit	34
5.2.2	Modell zum Rührerleistungseintrag in homogener Flüssigkeit	34
5.2.3	Modell zum Rührerleistungseintrag in homogener, begaster Flüssigkeit	36
5.2.4	Rührerleistungseintrag bei Überflutung des Rührwerkes	38
5.3	Modell zum volumenbezogenen Stofftransportkoeffizienten k_{La}	40
5.3.1	Korrelationsgleichung für den k_{La} -Wert bei gerührten und begasten Rührkesselreaktoren	41
5.3.2	Korrelationsgleichung für den k_{La} -Wert bei Blasensäulenbetrieb	42
5.4	Modell zum Wärmehaushalt	43
5.4.1	Wärmebilanz	43
5.4.2	Temperaturverläufe der Medien im Bioreaktor und im Temperiermantel	44
5.4.3	Wärmedurchgang	45
5.4.3.1	Mittlere logarithmische Temperaturdifferenz	45
5.4.3.2	Volumenabhängige Wärmeaustauschfläche	46
5.4.3.3	Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten	46
5.4.3.3.1	Wärmeübergang an die äußere Behälterwand	47
5.4.3.3.2	Wärmeübergang an die innere Behälterwand	48
5.4.4	Verlustwärmeströme	51
5.4.4.1	Verlustwärmestrom über den Reaktordeckel	51
5.4.4.2	Verlustwärmestrom über den Temperieraußenmantel	53
5.4.5	Edukt- und Produktwärmestrom, Wärmeträgerströme	54
5.4.6	Sonstige Wärmeströme	55
5.4.7	Einfluss der Temperatur des Fermentermediums auf das Gesamtmodell	55
5.4.7.1	Temperatureffekte auf das Zellwachstum	55
5.4.7.2	Sauerstofflöslichkeit als Funktion der Temperatur	56
5.4.7.3	k_{La} -Wert als Funktion der Temperatur	57
5.4.7.4	Physikalische Eigenschaften des wässrigen Mediums als Funktion der Temperatur	57
5.4.7.5	Physikalische Eigenschaften des Wärmeträgers als Funktion der Temperatur	59
5.4.7.6	Physikalische Eigenschaften der Luft als Funktion der Temperatur	60
5.4.7.7	Dampfdruck von Wasser als Funktion der Temperatur	61
5.5	Modell zur Schaumbildung	62
5.6	Modell zum Wachstum von <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	65
5.6.1	Biotransformation	66
5.6.2	Energiestoffwechsel	67
5.6.3	Wachstumskinetik	67
5.6.4	Metabolitumsatzraten	70
5.6.5	Stoffbilanzen der Gas- und Flüssigphase	75
5.7	Beschleunigte Berechnung der Differentialgleichungssysteme	77
5.8	Verrauschen der Ausgangssignale, realistische Signaldarstellung	77

6	Simulation und Diskussion der Ergebnisse	78
6.1	Simulation des Rührerleistungseintrages und des Gasleistungseintrages	78
6.1.1	Einfluss der Prozesstemperatur auf den Rührerleistungseintrag	78
6.1.2	Simulation des Rührerleistungseintrages und des Gasleistungseintrages bei Begasung	79
6.1.3	Vergleich zwischen gemessener Antriebsleistung und simulierter Rührerleistung	80
6.2	Simulation des Sauerstoffüberganges	81
6.2.1	Verhalten des $k_L a$ bei Überflutung des Rührwerkes	81
6.2.2	Berechnung der Überflutungscharakteristik des 6-Blattscheibenrührers	82
6.2.3	$k_L a$ -Wert als Funktion der Rührerdrehzahl und der Begasungsrate	83
6.2.4	Einfluss der Prozesstemperatur auf den Sauerstoffübergang	84
6.3	Simulation des Wärmedurchganges und der Sterilisation	85
6.3.1	Einfluss der Flowrate des Temperiermantels auf den Wärmedurchgang	85
6.3.2	Einfluss der Rührerdrehzahl und der Begasungsrate auf den Wärmedurchgang	86
6.3.3	Sterilisation des Rührkesselreaktors	87
6.3.4	Einfluss verschiedener Eingangsvariablen auf den Temperaturverlauf im Reaktor	89
6.3.5	Wachstumsgeschwindigkeit der Kultur bei Temperaturabweichungen von der Idealtemperatur	90
6.4	Schaumverhalten beim Betrieb	91
6.5	Verifikation des Biologischen Modells	92
6.6	Interaktion zwischen Biologischem Modell und technischen Teilmodellen	93
6.6.1	Einfluss der Prozesstemperatur bei der Batchkultivierung	93
6.6.2	Einfluss der Zufütterungsrate auf den Kultivierungsverlauf bei unregelter Prozesstemperatur	95
6.6.3	Einfluss unterschiedlicher Verdünnungsraten auf den Kultivierungsverlauf	96
6.6.4	Vollständige Dokumentation einer (simulierten) Kultivierung	99
6.7	Prozessvisualisierung	103
6.7.1	Ansicht des Rührkesselreaktors während der Simulation	104
6.7.2	Dokumentationsseite	109
7	Zusammenfassung	111
8	Ausblick	113
9	Literaturverzeichnis	115
10	Abbildungsverzeichnis	123
11	Nomenklatur Rührkesselreaktormodell	125
12	Nomenklatur Biologisches Modell	133
13	Antrag auf Ausgabe des Diplomthemas	135

1 Einleitung

Ein wesentlicher Bestandteil der biotechnischen Ausbildung ist die Durchführung komplexer Kultivierungsexperimente, die allerdings vergleichsweise aufwendig und teuer sind.

Um Schülern, Auszubildenden und Studierenden den Zugang zu diesen vielschichtigen Experimenten zu erleichtern ist es zweckmäßig, Simulationsexperimente in die Ausbildung mit zu integrieren.

Während vor wenigen Jahren mit der vorhandenen Rechenleistung nur einfache Modelle zu berechnen waren, deren Kalkulation mit einem erheblichen Zeitaufwand verbunden und deren Ausgabe sich auf die Darstellung von numerischen Werten beschränkte, stehen mit der heutigen Rechentechnik und einer Vielzahl geeigneter Integrationsalgorithmen und grafischer Darstellungsmöglichkeiten, leistungsfähige Werkzeuge der Simulationstechnik für die Ausbildung zur Verfügung.

Die Simulation dynamischer biotechnischer Systeme, insbesondere die komplexe Interaktion zwischen technischen Reaktormodell und biologischen Wachstumsmodell erfordert einen hohen Grad an Modularität der Anwendung. Sollen die simulierten Prozesse in genau dem Zeitrahmen ablaufen, wie sie auch bei realen Prozessen zu beobachten sind, sind an die Simulatoren darüber hinaus Echtzeitanforderungen zu stellen.

Um den Auszubildenden den Einstieg in die Simulationstechnik mit deren Vorteilen (z.B. Kostenersparnis, Reproduzierbarkeit der Versuche) zu ermöglichen, ist es notwendig geeignete einfache Simulatoren zu entwickeln. Die darin enthaltenen Teilmodelle sollten sich auf wesentliche, bereits bekannte Grundoperationen (z.B. Stoff- und Wärmeübergang, Leistungseintrag), sowie die Anwendung von Modellorganismen für das Wachstumsmodell beschränken.

Einen besonderen Stellenwert nimmt die Prozessvisualisierung des Modells ein. Eingaben müssen fehlerfrei vorgenommen werden können, die Ausgabe sollte in leicht interpretierbarer Form als Absolutwerte oder Trajektorien über die Zeit erfolgen.

Mit der vorliegenden Diplomarbeit und der Entwicklung eines Echtzeit-Simulators wurde den o.g. Anforderungen Rechnung getragen. Der hier vorgestellte Simulator eignet sich zur dynamischen Simulation biotechnischer Fermentationsprozesse in Rührkesselreaktoren im Rahmen der Ausbildung. Er ist ohne weiteres beliebig erweiterbar und damit auch für zukünftige Anwendungen als Basis nutzbar.

2 Zieldefinition

Ziel dieser Arbeit ist es, einen Simulator zur Echtzeitsimulation von Kultivierungs- und Fermentationsprozessen in begasteten Rührkesselreaktoren zu entwickeln. Als Beispielprozess soll sich der Simulator an der Fermentation von *Saccharomyces cerevisiae* in einem Laborfermenter orientieren. Der Simulator soll neben den biologischen auch die wichtigsten verfahrenstechnischen Prozesse und Effekte einer Fermentation sowohl qualitativ als auch quantitativ in Echtzeit abbilden. Außerdem soll den späteren Anwendern des Simulators ein möglichst realistisches Prozessverhalten vermittelt werden. Hierbei kommt es weniger auf die quantitativ präzise Abbildung von Einzeleffekten an, sondern auf die Darstellung des Gesamtverhaltens einer Kultivierung. Um später den Entwurf von Regelungs- und Prozessführungskonzepten anhand des Simulators zu ermöglichen, soll das zu entwerfende Modell in ein bereits vorhandenes Prozessleitsystem implementiert werden. Neben der Anwendung im Rahmen eines bioverfahrenstechnischen Praktikums zur Hochschulausbildung angehender Diplomingenieure der Biotechnologie und Umweltbioverfahrenstechnik, soll der im Rahmen dieser Arbeit zu entwickelnde Simulator auch an Berufsbildenden Schulen für naturwissenschaftlich-technische Assistenten und Chemielaboranten Verwendung finden.

3 Realisierung

Um das skizzierte Ziel zu erreichen soll folgendermaßen vorgegangen werden:

Nach eingehender Analyse des gesamten Fermentationsprozesses soll dieser in zweckmäßige elementare Teilsysteme zerlegt werden.

Jedem dieser realen Teilsysteme soll in einem weiteren Arbeitsschritt ein Teilmodell, i.d.R. bestehend aus Bilanzgleichungen für Masse, Energie und Impuls, auf phänomenologische Beziehungen, aus Korrelationen zur Modellierung von Stoffeigenschaften und schließlich aus Kinetiken zugeordnet werden.

Um eine hinreichend gute Qualität des Modells sicher zu stellen, soll bei der Auswahl und Entwicklung der Teilmodelle darauf geachtet werden, dass diese vorzugsweise auf Basis physikalischer, chemischer und biologischer Grundgesetze beruhen und möglichst weitgehend verifiziert wurden.

Die Auswahl und Formulierung der Teilmodelle erfordert in dieser Phase der Arbeit eine umfangreiche Erfassung und Bewertung des in der Literatur vorhandenen Wissens. Alle Teilmodelle sollen schließlich zu einem Gesamtmodell der Anlage zusammengefasst werden. Dabei soll sich ein Modell ergeben, das neben Ein- und Ausgangsgrößen auch die inneren Systemzustände enthält und damit zur Klärung von Verhalten und Funktion des Fermentationsprozesses herangezogen werden kann.

Nach erfolgreichem Abschluss der Modellierung steht am Ende der Arbeit die anwenderbezogene, übersichtliche Gestaltung der Benutzeroberfläche des Simulators innerhalb des Prozessleitsystems. Dem Anwender soll die Möglichkeit gegeben werden Eingaben sicher und fehlerfrei vorzunehmen. Ausgangsgrößen müssen in übersichtlicher und leicht interpretierbarer Form dargestellt werden. Zu jedem Zeitpunkt der (simulierten) Kultivierung muss der aktuelle Prozesszustand gut wiedergegeben werden.

4 Grundlagen

Zum besseren Verständnis der Arbeit, wird im vorliegenden Kapitel auf die theoretischen Grundlagen eingegangen. Um Überschneidungen mit dem Modellteil der Arbeit zu vermeiden, handelt es sich hierbei um eine primär verbale Beschreibung der Grundlagen. Die mathematische Herleitung wurde im Grundlagenteil auf ein Minimum reduziert, sie findet sich im Modellteil der Arbeit wieder.

4.1 Grundlagen der Simulationstechnik

Die Simulationstechnik ist eine weit verbreitete Methode, reale Phänomene mit Hilfe eines Computers nachzuahmen. Vor allem dann, wenn die Vorgänge miteinander interagieren und zeitgleich ablaufen, vermag ihre Nachbildung auf dem Rechner Einsichten vermitteln, die bei bloßer Beobachtung der Wirklichkeit nicht zu erhalten wären.

Zusätzlich ermöglicht es die Simulationstechnik sehr variabel von außen auf die simulierten Vorgänge Einfluss zu nehmen, teilweise auf eine Art und Weise, die im realen Prozess aus Kosten- oder Sicherheitsgründen nicht in Betracht gezogen würde.

Die Simulation eignet sich zusätzlich hervorragend dazu, dynamische Vorgänge grafisch darzustellen und sie dadurch auch dem ungeübten Anwender zugänglich zu machen.

Die Vorteile der Simulationstechnik gegenüber der realen Prozessführung bestehen in:

- den geringeren Kosten,
- der Reproduzierbarkeit von Experimenten,
- dem Ausschließen von Risiken,
- der Zugänglichkeit der interessierenden Größen,
- der Zeitraffung und –dehnung,
- der Vorhersage,
- der Veränderbarkeit physikalischer und biologischer Parameter,
- der „Realisierung“ noch nicht existenter Systeme und
- der Prozessoptimierung.

Damit kann das Potenzial der Simulationstechnik mit seinen positiven Merkmalen hinreichend gut beschrieben werden [Kramer, U. und Neculau, M.; 1998].

Neben den Vorzügen der Simulationstechnik, dürfen die Nachteile und die daraus resultierenden Probleme nicht unbeleuchtet bleiben:

Die Grenzen und Probleme der Simulation sind dadurch gekennzeichnet, dass die Simulation niemals besser sein kann als das Modell auf dem sie beruht. Des Weiteren sind Simulationen immer von der Gefahr umgeben, relevante Effekte unberücksichtigt zu lassen oder als unwichtig erachtete Variablen zu vernachlässigen.

Die Güte der Simulation hängt darüber hinaus in hohem Maße davon ab, wie sauber die methodischen Vorarbeiten geleistet werden, d.h. wie gut die Voraussetzungen abgeklärt sind, unter denen die Simulationsmodelle entwickelt wurden.

Dies erfordert in jedem Fall zunächst einen Mehraufwand gegenüber intuitiven Vorgehen, der jedoch in jedem Fall durch die Qualität der intellektuellen Durchdringung des zu bearbeitenden Problembereiches mehr als ausgeglichen wird.

4.1.1 Simulation bioverfahrenstechnischer Prozesse

Gerade für die Zusammenarbeit in interdisziplinär besetzten Gruppen, wie sie in der Biotechnologie anzutreffen sind, bildet die Simulationstechnik ein wesentliches Hilfsmittel. So sind die durch die Simulation dargestellten Aussagen im Allgemeinen leicht verständlich und können auch von denjenigen, die die zu Grunde liegenden Theorien, Methoden und Berechnungsalgorithmen nicht beherrschen, auf ihre Plausibilität und ihren Wert für das gemeinsame Ziel überprüft werden. Die Simulationstechnik stellt somit also eines der wichtigsten Bindeglieder zwischen den Disziplinen dar.

Simulationsverfahren spielen bei der Auslegung der Prozessführung biotechnischer Systeme eine wichtige Rolle. Dies ist darin begründet, dass Wachstum und Produktbildung nichtlineare Kinetiken aufweisen und die Modellgleichungen sich dadurch einer analytischen Behandlung weitgehend entziehen. Hinzu kommt, dass nur in äußerst geringem Maße eine kontinuierliche Prozessführung an einem vorgegebenen Arbeitspunkt („Chemostat“) in Produktionsprozessen angewandt wird, da einerseits stets das Risiko einer Kontamination mit Fremdorganismen besteht und sich zum anderen unerwünschte Nebenprodukte akkumulieren können.

Daraus resultiert, dass eine Linearisierung der Modellgleichungen um einen Arbeitspunkt nicht möglich ist, da der Prozess von Beginn der Kultivierung bis zu deren Abbruch ein großes Gebiet des Zustandsraumes, also weite Bereiche der Konzentrationen an Zellen, Substraten und Produkten durchläuft [Munnack, A.; 1995].

Eine weitere Schwierigkeit, die insbesondere bei biotechnologischen Systemen auftritt, darf an dieser Stelle ebenfalls nicht unerwähnt bleiben:

Während das Wachstum der Mikroorganismen, mit Verdopplungszeiten etwa im Bereich von 0,2-10 h vorliegen, weisen Begasungssystem und Stoffübergangsverhalten für die Ermittlung der Gelöstaauerstoffkonzentration in der Flüssigphase Zeitkonstanten von wenigen Sekunden auf. Will man also Bilanzen als Differentialgleichungssysteme gleichzeitig simulieren, so sind geeignete Verfahren für steife Systeme z.B. [Gear, C.W.; 1971] zu verwenden.

Eine weitere Möglichkeit des Vorgehens ist diejenige, dass die schnellen physikalischen Vorgänge als quasistationär betrachtet werden, so dass neben den dynamischen, biologischen Gleichungen statische Beziehungen zu berücksichtigen sind.

Ein zusätzliches Problem bei der parallelen Modellierung und Simulation technischer und biologischer Systeme liegt in der Anwendung unterschiedlicher Einheiten:

Während zur Berechnung technischer Systeme i.d.R. SI-Einheiten Verwendung finden, werden in der Bioverfahrenstechnik zunehmend unterschiedliche Einheitenkombinationen (z.B. Volumenstrom l/h anstatt m^3/sec) verwendet. Hinzu kommt, dass alle Umsatzraten (aus Gründen der Praktikabilität) bei Biolo-

gischen Modellen pro Stunden angegeben werden, während bei technischen Systemen Sekunden als Zeitbasis zur Berechnung von Differentialgleichungen Verwendung finden.

Um dennoch die Übersicht zu behalten, werden in der vorliegenden Arbeit primär SI-Einheiten verwendet. Nur an der Schnittstelle (Übergabe von Werten) zwischen technischen Teilmodellen und Biologischem Modell erfolgt eine Transformation (z.B. Umrechnung der Verdünnungsrate von 1/sec in 1/h).

Um die Simulation auch für Newcomer übersichtlich zu gestalten, erfolgt die Ein- und Ausgabe am Simulator partiell in praxisbezogenen Einheiten (z.B. Rührerdrehzahl 1/min anstatt 1/sec. oder l/h anstatt m³/sec bei Volumenströmen).

4.1.2 Schulungs- und Trainingssimulatoren

Gut ausgebildetes Personal mit ausreichendem Verständnis des Prozesses und der Automatisierungseinrichtungen ist eine Grundvoraussetzung für einen sachgemäßen und optimalen Betrieb von Produktionsanlagen.

Im Rahmen der Ausbildung von Biotechnologen und Umweltbioverfahrenstechnikern muss deshalb ein möglichst tiefgehender Einblick in den Ablauf bioverfahrenstechnischer Grundoperationen gegeben werden. Schulungssimulatoren bieten sich hier auch zu Vertiefung theoretischer Grundlagenforschungen an. Diese modernen Schulungsmittel werden allerdings in der Lehre erst vereinzelt eingesetzt [Sinclair, C.G. and Kristiansen, B.; 1993].

Angesichts immer knapper werdender Mittel der öffentlichen Haushalte, kann in den kommenden Jahren mit einer Steigerung der Anwendungen gerechnet werden.

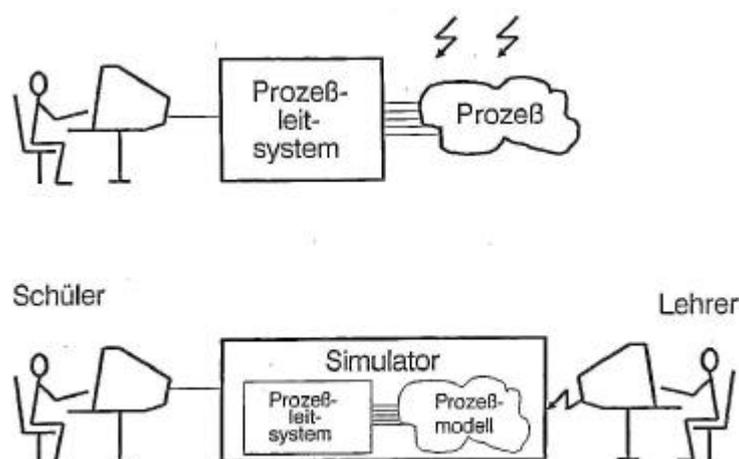


Abbildung 1: Unterschied zwischen Schulung am Simulator und am realen Prozess.

Im Gegensatz zu Schulungssimulatoren, wird in den Trainingssimulatoren das Abbild einer konkreten Anlage als Simulationsmodell verwendet. Dies folgt aus der anders gearteten Ausrichtung der Simulationen: Mit Trainingssimulatoren soll die Bedienung und Führung eines konkreten, realen Prozesses geübt werden. Dieses Ziel setzt voraus, dass das hinterlegte Prozessmodell die Anlage exakt wiedergibt.

Das in dieser Arbeit vorgestellte technische Modell kann einerseits als Schulungssimulator, andererseits, nach individueller Anpassung und Validierung im Rahmen des jeweils angegebenen Gültigkeitsbereiches, auch als Trainingssimulator Anwendung finden.

4.1.3 Anforderungen an die Echtzeitsimulation

Bei der Echtzeitsimulation dynamischer Prozesse werden an die Simulatoren, die heute primär aus Computer inkl. Software bestehen, besondere Anforderungen gestellt.

Eine typische Anforderung besteht darin, die nachgebildeten Prozesse in genau dem Zeitrahmen ablaufen zu lassen, wie sie auch bei realen Prozessen zu beobachten sind.

Nach [Schnieder, E.; 1982] unterscheidet man hierbei im einzelnen:

- Schritthaltend
- Vollständigkeit
- Rechtzeitigkeit
- Gleichzeitigkeit

Entsprechend den charakteristischen Zeitkenngrößen der realen Prozesse, innerhalb deren ein Simulator arbeiten soll, muss also gewährleistet sein, dass Reaktions- und Unterbrechungszeiten bestimmte Schranken unter keinen Umständen überschreiten.

Daraus resultiert, dass dies nur durch geeignete, allgemein hinreichend schnell arbeitende Hardware, sowie entsprechende Software (Betriebs- als auch Anwendungssoftware) erreicht werden kann.

Um mit Hilfe der Simulationstechnik einen realen Prozess hinreichend gut abbilden zu können, muss dieser systematisch in Teilsysteme, und diese wiederum in Teilmodelle zerlegt und analysiert werden.

Die Analyse des Systems „Rührkesselreaktor“, mit seinen Teilsystemen wird im folgenden Kapitel soweit durchgeführt, dass für die jeweils relevanten Teilprozesse alle mathematischen Beschreibungen der Teilmodelle vorliegen.

4.1.4 Grundlagen zu WinErs

Die vorliegende Beschreibung bezieht sich auf die aktuelle und auch zur Simulation verwendete WinErs-Version 4.11.A Professionell.

WinErs ist ein Programmpaket, das gleichermaßen als Messwerterfassungssystem, Prozessleitsystem und als Simulationssystem einsetzbar ist. Es eignet sich für die Realisierung von Echtzeitregelungen und Echtzeitsteuerungen, zur Messdatenerfassung und Dokumentation, Prozessvisualisierung sowie für die Simulation dynamischer Systeme.

Die Eingaben für die Steuerungen, Regelungen und Simulationen erfolgen interaktiv und grafisch, in Form von Blockschaltbildern unter einer leicht erlernbaren, Windows-konformen Benutzerführung und Oberfläche mit den unter Windows üblichen Markierungs-, Cut- und Paste-Mechanismen. Die Mächtigkeit von WinErs liegt in den vordefinierten Standardblöcken, sowie in der Möglichkeit, anwenderspezifische