



Technische
Universität
Braunschweig



ENERGIE- UND
VERFAHRENSTECHNIK



Studienführer 2022

Energie- und Verfahrenstechnik

Impressum

Herausgeber

Institut für Bioverfahrenstechnik (ibvt),
Institut für Chemische und Thermische Verfahrenstechnik (ICTV),
Institut für Energie- und Systemverfahrenstechnik (InES),
Institut für Flugantriebe und Strömungsmaschinen (IFAS),
Institut für Partikeltechnik (iPAT) und
Institut für Thermodynamik (IFT)
Fachbereich für Maschinenbau
Technische Universität Braunschweig

Rechtsaufsicht

Ministerium für Wissenschaft und Kultur (www.mwk.niedersachsen.de)

Redaktion

Martin Buchholz, Dipl.-Ing, Institut für Thermodynamik
Dr.-Ing. Katrin Dohnt, Institut für Bioverfahrenstechnik
Annika Hohlen, M.Sc., Institut für Chemische und Thermische Verfahrenstechnik
Hassan Karaki, M.Sc., Institut für Energie- und Systemverfahrenstechnik
Sebastian Lück, M.Sc., Institut für Flugantriebe und Strömungsmaschinen
Ann Kathrin Schomberg, M.Sc., Institut für Partikeltechnik

Zentrale Post-Anschrift (Besuchs- und Paketadresse)

Institut für Partikeltechnik
Volkmaroder Str. 5
38104 Braunschweig
+49 351 391 9

Webseite

www.evt-braunschweig.de

Stand

Januar 2022

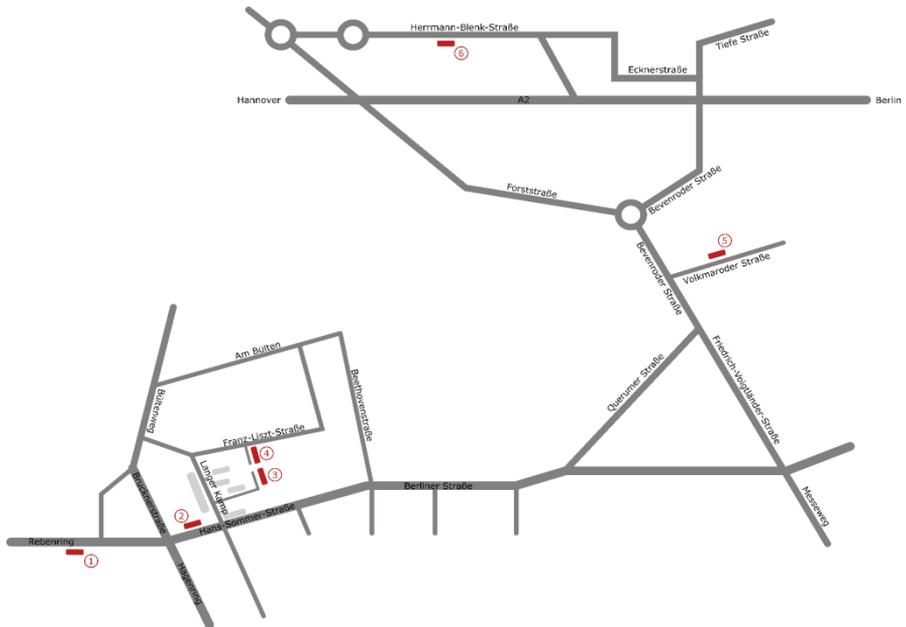
1 Inhaltsverzeichnis

	1
1 Inhaltsverzeichnis	1
2 Lageplan der Institute der Fachrichtung Energie- und Verfahrenstechnik	3
3 Studium der Vertiefungsrichtung EVT	4
3.1 Bachelor Maschinenbau	4
3.2 Bachelor Wirtschaftsingenieurwesen	5
3.3 Master Maschinenbau.....	7
3.4 Master Wirtschaftsingenieurwesen Maschinenbau	8
3.5 Weitere Masterstudiengänge auf Basis des B.Sc. mit Vertiefung EVT	9
4 Studienpläne Bachelor/Master	10
4.1 Curriculum Bachelor Maschinenbau Vertiefung EVT	10
4.2 Curriculum Bachelor Wirtschaftsingenieurwesen Vertiefung EVT	11
4.3 Curriculum Master Maschinenbau Vertiefung EVT	12
4.4 Curriculum Master Wirtschaftsingenieurwesen Maschinenbau Vertiefung EVT	13
5 Institut für Bioverfahrenstechnik	14
5.1 Module für Bachelor- und Masterstudiengänge	15
5.2 Inhalte der Lehrveranstaltungen	16
5.3 Arbeitsgebiete und Forschungen	18
5.4 Zusammenarbeit und Kooperation.....	21
5.5 Ausstattung des Instituts für Bioverfahrenstechnik	22
5.6 Themenbeispiele für Studien-, Bachelor- oder Masterarbeiten.....	23
6 Institut für Chemische und Thermische Verfahrenstechnik	25
6.1 Module für Bachelor- und Masterstudiengänge	26
6.2 Inhalte der Lehrveranstaltungen	27
6.3 Arbeitsgebiete und Forschungen	32
6.4 Themenbeispiele für Projekt-, Bachelor-, Studien- oder Masterarbeiten....	37
7 Institut für Energie- und Systemverfahrenstechnik	39
7.1 Module für Bachelor- und Masterstudiengänge	40
7.2 Inhalte der Lehrveranstaltungen	41
7.3 Arbeitsgebiete und Forschungen	42
7.4 Zusammenarbeit und Kooperation.....	47
7.5 Ausstattung des Instituts für Energie- und Systemverfahrens-technik.....	48
7.6 Themenbeispiele für Studien-, Bachelor- oder Masterarbeiten.....	48
8 Institut für Flugantriebe und Strömungsmaschinen	49
8.1 Module für Bachelor- und Masterstudiengänge	50
8.2 Inhalte der Lehrveranstaltungen	51
8.3 Arbeitsgebiete und Forschungen	54
8.4 Ausstattung des IFAS	60
8.5 Themenbeispiele für Bachelor-, Studien- oder Masterarbeiten.....	61
9 Institut für Partikeltechnik	63

9.1 Module für Bachelor- und Masterstudiengänge.....	65
9.2 Inhalte der Lehrveranstaltungen.....	66
9.3 Arbeitsgebiete und Forschungen	73
9.4 Zusammenarbeit und Kooperation	77
9.5 Ausstattung des Instituts für Partikeltechnik.....	78
9.6 Themenbeispiele für Studien-, Diplom-, Bachelor- oder Masterarbeiten.....	79
10 Institut für Thermodynamik	82
10.1 Module für Bachelor- und Masterstudiengänge.....	83
10.2 Inhalte der Lehrveranstaltungen.....	84
10.3 Arbeitsgebiete und Forschung	88
10.4 Kontakte, Zusammenarbeit und Kooperation	91
10.5 Ausstattung des Instituts für Thermodynamik	93
10.6 Themenbeispiele für Studien-, Bachelor- oder Masterarbeiten	94

2 Lageplan der Institute der Fachrichtung Energie- und Verfahrenstechnik

- | | |
|---|--|
| <p>1 Institut für Bioverfahrenstechnik
Rebenring 56</p> <p>3 Institut für Chemische und Thermische
Verfahrenstechnik
Langer Kamp 7</p> <p>5 Institut für Partikeltechnik
Volkmaroder Straße 5</p> | <p>2 Institut für Thermodynamik
Hans-Sommer-Straße 5</p> <p>4 Institut für Energie- und
Systemverfahrenstechnik
Franz-Liszt-Straße 35</p> <p>6 Institut für Flugantriebe und
Strömungsmaschinen
Herrmann-Blenk-Straße 37</p> |
|---|--|



3 Studium der Vertiefungsrichtung EVT

3.1 Bachelor Maschinenbau

Pflichtteil

Ingenieurwissenschaftliche Grundlagen

- Einführung in die Messtechnik
- Grundlagen der Strömungsmechanik
- Regelungstechnik
- Technische Mechanik 1
- Technische Mechanik 2
- Thermodynamik
- Werkstoffwissenschaften

Mathematische und naturwissenschaftliche Grundlagen

- Einführung in computergestützte Methoden für Ingenieure
- Grundlagen in Naturwissenschaft und Technik
- Ingenieurmathematik A
- Ingenieurmathematik B
- Ingenieurmathematik V

Ingenieur Anwendungen

- Grundlagen des Konstruierens
- Grundlagen komplexer Maschinenelemente und Antriebe

Wahlpflichtteile

Ingenieurwissenschaftliche Grundlagen

- Maschinendynamik
- Wärme- und Stoffübertragung

Fertigungstechnik Energie- und Verfahrenstechnik

- Fertigungstechnik

Konstruktionstechnik Energie- und Verfahrenstechnik

- Anlagenbau (MB)

Mechanik und Festigkeit Energie- und Verfahrenstechnik

- Grundlagen der Mechanischen Verfahrenstechnik (MB)

Numerik Energie- und Verfahrenstechnik

- Einführung in numerische Methoden für Ingenieure

Wahlpflichtteil Kompetenzfeld

Wahlpflichtmodule Kompetenzfeld Energie- und Verfahrenstechnik

- Auslegung und Anwendung mechanischer Verfahren
- Auslegung und Anwendung mechanischer Verfahren mit Labor
- Bioreaktoren und Bioprozesse
- Bioreaktoren und Bioprozesse mit Labor
- Chemische Reaktionstechnik
- Chemische Verfahrenstechnik
- Einführung in Stoffwandlungsprozesse
- Electrochemical Energy Engineering
- Elektrotechnik II für Maschinenbau
- Grundlagen der Energietechnik
- Grundlagen der Energietechnik mit Labor
- Grundlagen der Strömungsmaschinen
- Grundlagen der Strömungsmaschinen mit Labor
- Grundlagen der Umweltschutztechnik
- Grundoperationen der Fluidverfahrenstechnik
- Grundoperationen der Fluidverfahrenstechnik mit Labor

Die Bereiche

Fachübergreifende Lehrinhalte

- Überfachliche Profilbildung

Projektarbeit

- Die Projektarbeiten sind den einzelnen Kompetenzfeldern zugeordnet.

Betriebspraktikum

- Betriebspraktikum Maschinenbau

Abschlussmodul

- Abschlussmodul Bachelor Maschinenbau

3.2 Bachelor Wirtschaftsingenieurwesen

Pflichtteil

Mathematische Grundlagen

- Ingenieurmathematik A
- Ingenieurmathematik B

Natur- und ingenieurwissenschaftliche Grundlagen

- Grundlagen des Konstruierens
- Grundlagen in Naturwissenschaft und Technik für Wirtschaftsingenieure
- Regelungstechnik
- Technische Mechanik 1
- Technische Mechanik 2
- Thermodynamik

Wirtschaftswissenschaftliche Grundlagen

- Betriebliches Rechnungswesen
- Einführung in die Wirtschaftsinformatik
- Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre – Produktion & Logistik und Finanzwirtschaft
- Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre – Unternehmensführung und Marketing
- Grundlagen der Rechtswissenschaften
- Grundlagen der Volkswirtschaftslehre

Wahlpflichtbereich Ingenieurwissenschaften

Maschinenbauvertiefung Energie- und Verfahrenstechnik

- Anlagenbau (MB)
- Auslegung und Anwendung mechanischer Verfahren
- Auslegung und Anwendung mechanischer Verfahren mit Labor
- Bioreaktoren und Bioprozesse
- Bioreaktoren und Bioprozesse mit Labor
- Chemische Reaktionstechnik
- Chemische Verfahrenstechnik
- Einführung in die Messtechnik
- Einführung in numerische Methoden für Ingenieure
- Einführung in Stoffwandlungsprozesse
- Electrochemical Energy Engineering
- Elektrotechnik II für Maschinenbau
- Grundlagen der Umweltschutztechnik
- Grundlagen der Energietechnik
- Grundlagen der Energietechnik mit Labor
- Grundlagen der Mechanischen Verfahrenstechnik (MB)
- Grundlagen der Strömungsmaschinen
- Grundlagen der Strömungsmaschinen mit Labor
- Grundlagen der Strömungsmechanik
- Grundoperationen der Fluidverfahrenstechnik
- Grundoperationen der Fluidverfahrenstechnik mit Labor
- Wärme- und Stoffübertragung

Wahlpflichtbereich Wirtschaftswissenschaften

Wirtschaftswissenschaftliche Vertiefungen

- Bachelor-Vertiefung Wirtschaftsinformatik - Decision Support
- Bachelor-Vertiefung Wirtschaftsinformatik - Informationsmanagement
- Bachelor-Vertiefung Wirtschaftswissenschaften - Dienstleistungsmanagement
- Bachelor-Vertiefung Wirtschaftswissenschaften - Finanzwirtschaft
- Bachelor-Vertiefung Wirtschaftswissenschaften - Marketing
- Bachelor-Vertiefung Wirtschaftswissenschaften - Organisation und Führung
- Bachelor-Vertiefung Wirtschaftswissenschaften - Personal und Arbeit
- Bachelor-Vertiefung Wirtschaftswissenschaften - Produktion und Logistik
- Bachelor-Vertiefung Wirtschaftswissenschaften - Recht
- Bachelor-Vertiefung Wirtschaftswissenschaften - Unternehmensrechnung
- Bachelor-Vertiefung Wirtschaftswissenschaften - Volkswirtschaftslehre

Die Bereiche

Integrationsbereich Pflichtmodule

- Überfachliche Profilbildung Wirtschaftsingenieurwesen Maschinenbau
- Quantitative Methoden in den Wirtschaftswissenschaften

Integrationsbereich Wahlpflichtmodule

- Einführung in das Programmieren (für Nicht-Informatiker)
- Grundlagen der automatischen Informationsverarbeitung für den Maschinenbau

Betriebspraktikum

- Betriebspraktikum Wirtschaftsingenieurwesen Maschinenbau

Abschlussmodul

- Abschlussmodul Wirtschaftsingenieurwesen Maschinenbau

3.3 Master Maschinenbau

Kernbereich (alle Module sind Pflicht)

- Modellierung und Numerik von Differentialgleichungen
- Thermodynamik der Gemische
- Methoden der Prozessmodellierung und -optimierung

Profilbereich (3 Module auswählbar)

- Computer Aided Process Engineering I (Introduction)
- Computer Aided Process Engineering II (Design verfahrenstechnischer Anlagen)
- Einführung in die Mehrphasenströmung
- Elektrochemische Verfahrenstechnik und Brennstoffzellen
- Fahrzeugklimatisierung
- Formulierungstechnik
- Fundamentals of Nanotechnology
- Gestaltung nachhaltiger Prozesse der Energie- und Verfahrenstechnik
- Grundlagen der elektrischen Energietechnik
- Hybride Trennverfahren
- Hydraulische Strömungsmaschinen
- Industrielle Bioverfahrenstechnik
- Kultivierungs- und Aufarbeitungsprozesse
- Maschinen der mechanischen Verfahrenstechnik
- Mikroverfahrenstechnik
- Modellierung thermischer Systeme in MODELICA
- Numerische Simulation (CFD)
- Partikelsynthese
- Prozesstechnik der Nanomaterialien
- Regenerative Energietechnik
- Simulationsmethoden der Partikeltechnik
- Systeme der Windenergieanlagen
- Technische Verbrennung und Brennstoffzellen mit Labor
- Thermische Strömungsmaschinen
- Thermodynamics and Statistics
- Zerkleinern und Dispergieren

Laborbereich (3 Module auswählbar)

- Fahrzeugklimatisierung mit Labor
- Formulierungstechnik mit Labor
- Hybride Trennverfahren (mit Labor)
- Messtechnische Methoden an Strömungsmaschinen mit kleinem Labor
- Prozesstechnik der Nanomaterialien mit Labor
- Technische Verbrennung und Brennstoffzellen mit Labor

Wahlbereich

- Drei Wahlmodule (je 5 LP) sind frei aus dem gesamten Mastermodulangebot des Maschinenbaus wählbar.

Die Bereiche

Überfachliche Profilbildung

- Überfachliche Profilbildung Master

Studienarbeit

- Studienarbeit

Abschlussmodul

- Abschlussmodul Master Maschinenbau

3.4 Master Wirtschaftsingenieurwesen Maschinenbau

Wahlpflichtbereich des Maschinenbaus

- Computer Aided Process Engineering I (Introduction)
 - Computer Aided Process Engineering II (Design verfahrenstechnischer Anlagen)
 - Einführung in die Mehrphasenströmung
 - Einführung in die Nanotechnologie
 - Elektrochemische Verfahrenstechnik und Brennstoffzellen
 - Fahrzeugklimatisierung*
 - Formulierungstechnik
 - Gestaltung nachhaltiger Prozesse der Energie- und Verfahrenstechnik*
 - Grundlagen der elektrischen Energietechnik
 - Hybride Trennverfahren
 - Hydraulische Strömungsmaschinen
 - Industrielle Bioverfahrenstechnik
 - Kultivierungs- und Aufarbeitungsprozesse
 - Maschinen der mechanischen Verfahrenstechnik
 - Methoden der Prozessmodellierung und -optimierung
 - Mikroverfahrenstechnik
 - Modellierung thermischer Systeme in MODELICA
 - Numerische Simulation (CFD)
 - Partikelsynthese
 - Prozesstechnik der Nanomaterialien
 - Regenerative Energietechnik
 - Simulationsmethoden der Partikeltechnik
 - Systeme der Windenergieanlagen*
 - Technische Verbrennung und Brennstoffzellen mit Labor
 - Thermische Strömungsmaschinen
 - Thermodynamics and Statistics
 - Thermodynamik der Gemische
 - Zerkleinern und Dispergieren
- *neu hinzugefügt

Wahlpflichtbereich der Wirtschaftswissenschaften

- Vertiefung Dienstleistungsmanagement
- Vertiefung Decision Support
- Vertiefung Informationsmanagement
- Vertiefung Marketing
- Vertiefung Organisation und Führung
- Vertiefung Personal und Arbeit
- Vertiefung Produktion und Logistik
- Vertiefung Controlling
- Vertiefung Finanzwirtschaft
- Vertiefung Recht
- Vertiefung Volkswirtschaftslehre

Wahlbereich Maschinenbau

- Zwei Wahlmodule (je 5 LP) sind frei aus dem gesamten Mastermodulangebot des Maschinenbaus wählbar.

Wirtschaftswissenschaftliche Orientierung

Ergänzende wirtschaftswissenschaftliche Lehrveranstaltungen aus den nicht innerhalb des Wahlpflichtbereichs der Wirtschaftswissenschaften gewählten Master-Vertiefungen.

- Orientierung Dienstleistungsmanagement
- Orientierung Decision Support
- Orientierung Informationsmanagement
- Orientierung Marketing
- Orientierung Organisation und Führung
- Orientierung Personal und Arbeit
- Orientierung Produktion und Logistik
- Orientierung Controlling
- Orientierung Finanzwirtschaft
- Orientierung Recht
- Orientierung Volkswirtschaftslehre

Wirtschaftswissenschaftliche Professionalisierung

- Wissenschaftliches Arbeiten - Seminar

Die Bereiche

Überfachliche Profilbildung

- Überfachliche Profilbildung Master Wirtschaftsingenieurwesen Maschinenbau

Studienarbeit

- Studienarbeit

Abschlussmodul

- Abschlussmodul Master Wirtschaftsingenieurwesen Maschinenbau

3.5 Weitere Masterstudiengänge auf Basis des B.Sc. mit Vertiefung EVT

Der Bachelor Maschinenbau mit Vertiefung Energie- und Verfahrenstechnik bzw. der entsprechende Wirtschaftsingenieurwesen-Studiengang bereitet nicht nur den Weg für die analogen Master-Studiengänge Maschinenbau oder Wirtschaftsingenieurwesen mit Vertiefung Energie- und Verfahrenstechnik.

Er ebnet auch den Weg für verwandte Studiengänge wie Bio- und Chemieingenieurwesen, Nachhaltige Energietechnik oder Pharmaingenieurwesen. Weitere Informationen und mögliche Auflagenfächer finden Sie auf der Homepage der EVT und der Fakultät. Sprechen Sie uns auch gerne direkt an.

Achtung

Die aktuell gültige Angabe über die Verteilung der notwendigen zu erreichenden Punkte in den einzelnen Bereichen entnehmen Sie bitte Anlage 1 der jeweils gültigen Prüfungsordnung. Die in diesem Studienführer gezeigten Ausführungen wurden nach besten Wissen und Gewissen erstellt, erheben jedoch keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Für prüfungsrechtliche Fragen sind stets das offizielle Modulhandbuch, die Ausführungsbestimmungen Ihres Studienganges sowie die aktuell gültige Prüfungsordnung maßgeblich.

4 Studienpläne Bachelor/Master

4.1 Curriculum Bachelor Maschinenbau Vertiefung EVT

Semester 1		Semester 2		Semester 3	
Modul	LP	Modul	LP	Modul	LP
Ingenieurmathematik A Analysis 1 & Lineare Algebra	8	Ingenieurmathematik B Analysis 2 & Differentialgleichungen	8	Ingenieurmathematik 5 Analysis 3	4
Grundlagen in Naturwissenschaften und Technik mit Labor	8	Grundlagen in Naturwissenschaften und Technik mit Labor	2	Grundlagen der Strömungsmechanik	5
Werkstoffkunde	4	Werkstofftechnologie 1	4	Thermodynamik	6
Technische Mechanik 1 Statik und Festigkeitslehre	8	Technische Mechanik 2 Dynamik und Schwingungen	8	Einführung in die Messtechnik	5
		Grundlagen des Konstruierens	8	Grundlagen komplexer Maschinenelemente und Antriebe	10

Semester 4		Semester 5		Semester 6	
Modul	LP	Modul	LP	Modul	LP
Einführung in computergestützte Methoden für Ingenieure	6	Einführung in numerische Methoden für Ingenieure	5	Wahlpflichtbereich Kompetenzfeld	5
Wärme und Stoffübertragung oder Maschinendynamik	5	Anlagenbau	5	Labor Wahlpflichtbereich Kompetenzfeld	2
Regelungstechnik	5	Projektarbeit	6	Bachelorarbeit	14
Fertigungstechnik	5	Wahlpflichtbereich Kompetenzfeld	5		
Grundlagen der Mechanischen Verfahrenstechnik	5	Wahlpflichtbereich Kompetenzfeld	5		
Modul Überfachliche Profilbildung	4			Praktikum	10

4.2 Curriculum Bachelor Wirtschaftsingenieurwesen Vertiefung EVT

Semester 1		Semester 2		Semester 3	
Modul	LP	Modul	LP	Modul	LP
Ingenieurmathematik A Analysis 1 & Lineare Algebra	8	Ingenieurmathematik B Analysis 2 & Differential- gleichungen	8	Thermodynamik	6
				Einführung in die Wirtschaftsinformatik	5
Technische Mechanik 1 Statik und Festigkeitslehre	8	Technische Mechanik 2 Dynamik und Schwingungen	8	Quantitative Methoden in den Wirtschafts- wissenschaften OR & Statistik	8
Grundlagen in Natur- wissenschaften und Technik für Wirtschaftsingenieure	5	Grundlagen in Natur- wissenschaften und Technik für Wirtschaftsingenieure	5	Überfachliche Profilbildung: Arbeitswissenschaft	4
Grundlagen der BWL Unternehmensführung und Marketing	6	Grundlagen der BWL Produktion & Logistik und Finanzwirtschaft	6	Betriebliches Rechnungswesen	6
Grundlagen der Volkswirtschaftslehre	3	Grundlagen der Volkswirtschaftslehre	3	Grundlagen der Rechtswissenschaften	3

Semester 4		Semester 5		Semester 6	
Modul	LP	Modul	LP	Modul	LP
Grundlagen des Konstruierens	8	Wahlpflichtbereich Kompetenzfeld	5	Wahlpflichtbereich Kompetenzfeld	5
Regelungstechnik	5	Wahlpflichtbereich Kompetenzfeld	5		
Informatik im Maschinenbau oder Einführung in das Programmieren (für Nicht- Informatiker)	4	Wahlpflichtbereich Kompetenzfeld	5		
Überfachliche Profilbildung: Planspiel (2 LP) Pool- Veranstaltung freie Wahl	4	Wirtschaftswissenschaftlich e Vertiefung 2	6		
Wirtschaftswissenschaftlich e Vertiefung 1	6	Wirtschaftswissenschaftlich e Vertiefung 3	6	Bachelorarbeit	14
Grundlagen der Rechtswissenschaften	3	Überfachliche Profilbildung: Wissenschaftliches Arbeiten (ab WS 16/17)	2	Praktikum	10

4.3 Curriculum Master Maschinenbau Vertiefung EVT

Bereich	1. Semester	2. Semester	3. Semester	4. Semester	LP
Vertiefungsrichtungs-spezifische Module	Modellierung und Numerik von Differentialgleichungen und 2 Module je 5 LP	Kernbereich 2 Module je 5 LP			51
		3 Module zur Wahl je 5 LP	Profilbereich		
		1 Modul mit 11 LP plus 2 Module je 5 LP	Laborbereich		
Wahlmodule		Wahlbereich 15 LP			15
Überfachliche Profilbildung		Überfachliche Module 9 LP			9
Studien / Masterarbeit		Studienarbeit 15 LP		Masterarbeit 30 LP	45
Summe LP	30	30	30	30	120

4.4 Curriculum Master Wirtschaftsingenieurwesen Maschinenbau Vertiefung EVT

Bereich	1. Semester	2. Semester	3. Semester	4. Semester	LP
Maschinenbau Wahlpflichtmodule	Maschinenbau Module je nach Vertiefung 5 mal 5 LP				25
Maschinenbau Wahlmodule	Maschinenbau Module 2 mal 5 LP				10
Wirtschafts- wissenschaften	WiWi Master Vertiefung 1 10 LP	WiWi Master Vertiefung 2 10 LP			25
		WiWi Master Orientierung 5 LP			
WiWi Professionalisierung	Wissenschaftliches Arbeiten - Seminar 4 + 4 LP				8
Überfachliche Profilbildung	Überfachliche Module 7 LP				7
Studien / Masterarbeit	Studienarbeit 15 LP			Masterarbeit 30 LP	45
Summe LP	30	30	30	30	120



5 Institut für Bioverfahrenstechnik

Technische Universität
Braunschweig

Rebenring 56
38106 Braunschweig
Tel.: (0531) 391-55311
Fax: (0531) 391-55313
www.ibvt.de

Institutsleitung:	Kommissarische Leitung Prof. Dr.-Ing. Arno Kwade	391-9610
Akademischer Direktor:	Prof. Dr. habil. Rainer Krull	391-55311
Buchhaltung:	Frau Christl Kahmann	391-55315
Technische Mitarbeiter:	BTA Yvonne Göcke PTA Cord Hullmann Dip.-Ing. (FH) Rochus Jonas BTA Elena Kempf CTA Detlev Rasch	391-55330 391-55330 391-55319 391-65566 391-8331

Wissenschaftliche Mitarbeiter:			
M. Sc. Jonathan Block	391-55320	M. Sc. Sarah Brune	391-55298
M. Sc. Anna Dinius	391-65561	Dr.-Ing. Katrin Dohnt	391-55317
M. Sc. Leopold Heydorn	391-55314	M. Sc. Kevin Pierre Hoffmann	391-65564
M. Sc. Zuzanna Kozanecka	391-65561	M. Sc. David Lammers	391-55333
M. Sc. Jonas Lohr	391-55333	M. Sc. Gábor Schultz	391-65562
M. Sc. Kevin Viebrock	391-65564	M. Sc. David Vorländer	391-55334

Studienfachberatung:	Dr.-Ing. Katrin Dohnt	391-55317
Beratung zum Auslandsstudium (u.a. University of Waterloo, Kanada, Technion, Haifa, Israel)	Prof. Dr. habil. Rainer Krull	391-55211

5.1 Module für Bachelor- und Masterstudiengänge

Module für Bachelorstudiengänge Maschinenbau, Wirtschaftsingenieurwesen, Bio-, Chemie-, und Pharmaingenieurwesen

Bioprozesskinetik (mit Labor)	SS	5 LP (7 LP)	2 VL/2 Ü (2 L)	Prof. Dr. Krull, wiss. Mitarbeiter
Bioreaktoren und Bioprozesse (mit Labor)	WS	5 LP (7 LP)	2 VL/2 Ü (2 L)	Prof. Dr. Krull, wiss. Mitarbeiter
Bioverfahrenstechnik mit Labor	WS	6 LP	2 VL/2 Ü	Prof. Dr. Krull, wiss. Mitarbeiter
Chemische Reaktionskinetik	SS	5 LP	2 VL/1 U	Prof. Dr. Krull
Mikrobiologie für Ingenieure mit Labor	WS	5 LP	2 VL	Dr.-Ing. Dohnt
Pharmaverfahrenstechnik mit Labor	WS	7 LP	2VL/2 Ü	Dr.-Ing. Dohnt

Module für Masterstudiengänge Maschinenbau, Wirtschaftsingenieurwesen, Bio-, Chemie-, Pharma- und Bioingenieurwesen

Industrielle Bioverfahrenstechnik	SS	5 LP	2 VL/1 Ü	Dr.-Ing. Dohnt, wiss. Mitarbeiter
Kultivierungs- und Aufarbeitungsprozesse	WS	5 LP	2 VL/1 Ü	Prof. Dr. Krull
Nachhaltige Bioproduktion	SS	2,5 LP	1 VL	Dr.-Ing. Dohnt
Vom Gen zum Produkt	WS/SS	2,5 LP	1 VL	Dr.-Ing. Dohnt

Fachlabore

Angewandte Mikrobiologie	WS
Bioprozesskinetik	SS
Bioreaktoren und Bioprozesse	WS
Bioverfahrenstechnik	WS
Interdisziplinäres Forschungsmodul „Vom Gen zum Produkt“	WS/SS
Mikrobiologie für Ingenieure	WS/SS
Pharmaverfahrenstechnik	WS

5.2 Inhalte der Lehrveranstaltungen

Das Institut für Bioverfahrenstechnik (ibvt) ist in der Fakultät Maschinenbau durch Vorlesungen, Übungen, Praktika sowie die Betreuung von studentischen Arbeiten wie Bachelor-, Master-, Studienarbeiten und Forschungspraktika eng in die Lehre in den Studiengängen Bio-, Chemie- und Pharmaingenieurwesen / Pharmaingenieurwesen / Maschinenbau und Wirtschaftsingenieurwesen Maschinenbau eingebunden. Darüber hinaus werden Lehrveranstaltungen sowie studentische Arbeiten auch in den Studiengängen Biotechnologie, Biologie und Chemie angeboten.

Das Spektrum der Vorlesungsinhalte umfasst sowohl verfahrenstechnisch-ingenieurwissenschaftliche als auch naturwissenschaftliche Themen.

Das ibvt koordiniert im Auftrag der Fakultät für Maschinenbau

- das 4-monatige Studierendenaustauschprogramm mit der University of Waterloo, Ontario, das durch den DAAD im Rahmen eines ISAP-Programms bei vollständiger Anerkennung der Studienleistungen finanziell unterstützt wird (Infoabend jeweils zu Beginn des Wintersemesters) sowie
- zwei- bis dreimonatige Forschungsaufenthalte am „MIT“ Israels, dem Technion in Haifa, die im Rahmen des Life-Science-Networks (lifescience.net) durch die Deutsche Technion-Gesellschaft (www.deutsche-technion-gesellschaft.de) finanziell unterstützt werden.

Bioprozesskinetik

- Kinetik enzymatischer Reaktionen: katalytische Wirkung, Substratlimitierung, Transformationen, Einfluss der Temperatur und des pH-Wertes, Effektoren, Mehrfach-Substratlimitierung
- Kinetik des mikrobiellen Wachstums: absatzweise (batch), fed batch- und kontinuierliche Kultivierung, Zellerhaltung, Zellimmobilisierung, Zellrückhaltung und -rückführung
- Mischpopulationen: Interaktionen, kinetische Ansätze
- Wachstum filamentöser Mikroorganismen
- Produktbildung: Kultivierungsprozesse und -produkte, Definitionen, Kultivierungstypen, kinetische Modelle, Hemmung des Wachstums durch Produkte

Bioreaktoren und Bioprozesse

- Einführung, Zielgrößen industrieller Bioprozesse
- Rührkessel als wichtigster Reaktortyp
- Instrumentierung und Peripherie
- Grundlegende Aufgaben von Bioreaktoren (Dispergieren, Suspendieren, Mischen, Rühren)
- Ähnlichkeitstheorie, Kennzahlen und Maßstabsübertragung
- Transportprozesse in Bioreaktoren
- Rohrströmung
- Turbulente Strömung
- Rheologie

Bioverfahrenstechnik

- Bioreaktoren: Reaktortypen, Aufbau technischer Kultivierungen
- Einführung, Zielgrößen industrieller Bioprozesse
- Grundlegende Aufgaben von Bioreaktoren (Dispergieren, Suspendieren, Mischen, Rühren)
- Wachstumsmodelle, Bilanzierung einer Kultivierung: batch, kontinuierlich, fed batch
- Ähnlichkeitstheorie, Kennzahlen und Maßstabsübertragung
- Bioprozessmodellierung, Bilanzierung
- Molekulare und konvektive Transportprozesse in Bioreaktoren
- Rheologie
- Mess- und Regelungstechnik

Chemische Reaktionskinetik

- Thermodynamik chemischer Reaktionen
- Kinetik chemischer Reaktionen - Mikrokinetik: Homogene Gas- und Flüssigkeitsreaktionen
- Makrokinetik, heterogene Katalyse,
- Chemische Reaktion und Transportvorgänge (Katalysatornutzungsgrad, Thiele-Modulus, Hatta-Zahl)

Industrielle Bioverfahrenstechnik

- Industrielle Produktionsverfahren an ausgewählten Beispielen aus folgenden Bereichen
 - Materialien und Rohstoff
 - Chemikalien
 - Biofuels
- Patente, Regularien und Einrichtung der biotechnologischen Produktion und Forschung
- Im Rahmen der Übungen werden Aspekte der Maßstabvergrößerung (Scale-Up) bzw. Maßstabverkleinerung (Scale-Down) betrachtet, sowie OMICS-Technologien und Methoden der Stammoptimierung erarbeitet

Kultivierungs- und Aufarbeitungsprozesse

- Einführung
- Kultivierung: Industrielle Produktionsorganismen, Bioreaktortypen, Transportphänomene in Bioreaktoren, Mikrobioreaktoren, Kultivierung schersensitiver Mikroorganismen (filamentöse Mikroorganismen, Pflanzenzellen, Säugerzellen)
- Aufarbeitung: Allgemeine Prinzipien, Sedimentation, Zentrifugation, Filtration, Zellaufschluss, Fällung und Extraktion, Adsorption, Chromatographie

Mikrobiologie für Ingenieure

- Eigenschaften von Mikroorganismen
- Struktur und Funktion pro- und eukaryotischer Zellen
- Wachstum von Mikroorganismen und die Möglichkeiten der Kultivierung
- Biologische Grundlagen wie Proteinbiosynthese, Stoffwechselwege, Nährstoffansprüche, Teilung von Mikroorganismen, Transportmechanismen
- Anwendung von Mikroorganismen

Nachhaltige Bioproduktion

- Prinzipien der biotechnologischen Wertstoffproduktion
- Konzepte zur Nutzung nachwachsender Rohstoffe
- Bewertung von Nachhaltigkeit und Bioverträglichkeit mittels Ökoeffizienz-Analyse
- Beispiele aus der industriellen Anwendung

Pharmaverfahrenstechnik - Arzneiformenlehre

- Grundlagen der Pharmazeutischen Technologie, Physik und Statistik
- Grundlagen der Biopharmazie
- Stoffeigenschaften, Prüfungen der Pharmazeutischen Technologie
- Pflanzliche Arzneiformen
- Herstellung und Prüfung verschiedener fester und halbfester Arzneiformen
- Grundlagen und Umsetzung des GMP Konzepts (Good Manufacturing Practice)

Vom Gen zum Produkt (Vortragsreihe - Einzeltermine)

Behandlung aktueller Forschungsschwerpunkte aus den Bereichen systemorientierter, ganzheitlicher Ansätze und Konzepte zur Stamm- und Prozessoptimierung, die natur- und ingenieurwissenschaftliche, insbesondere gen- und verfahrenstechnische Methoden verknüpfen.

5.3 Arbeitsgebiete und Forschungen

Bioprozesse sind mehrphasige Reaktionssysteme und sind aufgrund vorhandener Grenzflächen und möglicher Wechselwirkungen meist von einer großen Heterogenität innerhalb der Systeme gekennzeichnet. Mit unseren Forschungsarbeiten möchten wir die zugrundeliegenden molekularen Phänomene heterogener Bioprozesse verstehen, um mit diesem Verständnis neue Prozessstrategien und Produkte entwickeln zu können. Für einen rationalen Ansatz werden (bio-) verfahrenstechnische Werkzeuge, wie die Modellierung und die System-Bioproszesstechnik, mit naturwissenschaftlichen Werkzeugen, wie die technische Biochemie und die molekulare Mikrobiologie, kombiniert. Dieser interdisziplinäre Ansatz des Instituts innerhalb der Ingenieur- und Lebenswissenschaften erlaubt uns einen tiefen Einblick und grundlegendes Verständnis für relevante Fragen der Bioverfahrenstechnik.

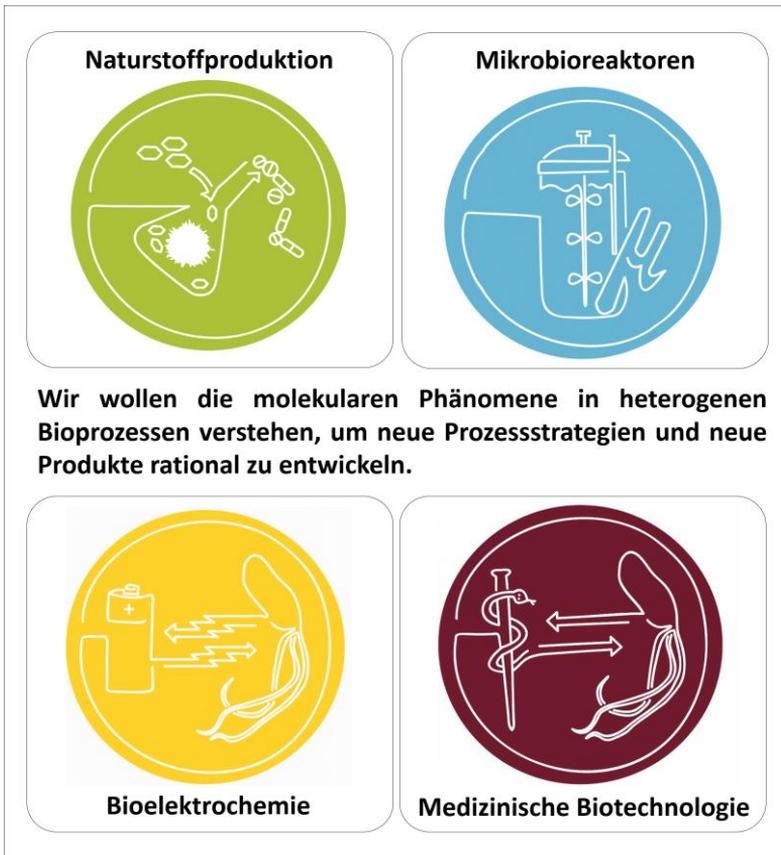


Abb. 5.1 Übersicht der Forschungsschwerpunkte am ibvt

Die Forschungsarbeiten werden durch öffentliche Drittmittelgeber (u.a. DFG, BMBF, DBU, AiF, DAAD) unterstützt, aber auch im Rahmen industrieller Forschungsk Kooperationen durchgeführt.

1. Produktion von Naturstoffen mit filamentösen biologischen Systemen

Naturstoffe sind Verbindungen, die von ganzen Zellen oder Enzymen synthetisiert werden. Die breite Palette an Produkten reicht beispielsweise von Nahrungsergänzungsmitteln (Aminosäuren, Vitamine) oder Enzymen für die Lebensmittel- und Wachmittelindustrie bis zu aktiven pharmazeutischen Wirkstoffen. Um bestehende Prozesse effizienter zu gestalten und weitere Anwendungsgebiete zu erschließen, gilt es, die Produktionsstämme zu analysieren und die Kultivierungsbedingungen sowie die Morphologie-beeinflussenden Parameter zu optimieren. Einen ibvt-Forschungsschwerpunkt bildet die Kultivierung und Charakterisierung filamentöser Mikroorganismen. Der Fokus der Forschungsarbeiten liegt dabei auf der quantitativen Untersuchung filamentöser Strukturen und ihrer Bioagglomeratstabilität und -variabilität unter verschiedenen Kultivierungsbedingungen (hydromechanische Beanspruchung, Stofftransfer, Rheologie, Produktivität). In aktuellen Arbeiten wird das Know-how von eukaryotischen Systemen (Pilze) auch auf filamentöse prokaryotische Systeme (Actinomyceten) übertragen, die neue Antibiotika produzieren. Darüber hinaus wird am ibvt ein breites Repertoire an Methoden für das *Morphology engineering* entwickelt, um die zelluläre Morphologie zu einer höheren Produktivität zu dirigieren. Zur Untersuchung der Morphologie von filamentösen Mikroorganismen wurden die Sauerstoffmikroelektrodenteknik, konfokale Laser Scanning Mikroskopie, Focused beam reflection microscopy, Laserdiffraktometrie, Bildanalyse, Kryomikrotomschnitttechnik sowie die Pelletsedimentation eingeführt. Um die Struktur von Pellets zu quantifizieren, wurden nichtdimensionale Morphologiemetriken entwickelt.



Abb. 5.2 Filamentöse wachsende Mikroorganismen in Form von Biopellets

2. Mikrobioreaktoren

Reaktionsgefäße im Mikrolitermaßstab bieten für die Bioprozessentwicklung ein erhebliches Potential zur parallelisierten und automatisierten Untersuchung von zellulären und enzymatischen Systemen. Dabei kann die Menge an eingesetzten Substraten reduziert und eine hohe Informationsdichte erhalten werden, wodurch die Effizienz erhöht und Entwicklungszeiten für biotechnologische Prozesse reduziert werden. Der Fokus der Arbeitsgruppe liegt dabei auf der Entwicklung von Mischtechniken, der Sensorintegration, der Maßstabsübertragung sowie der Anwendung der Mikrobioreaktoren in der Pharmabiotechnologie.

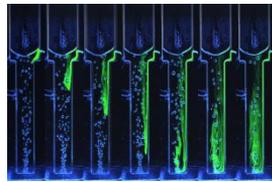


Abb. 5.3 Blasensäulen-Mikroreaktor mit 500 μL Arbeitsvolumen, hier die Bestimmung des Mischzeitverhaltens

3. Medizinische Biotechnologie

Mikroorganismen besiedeln Grenzflächen in der Natur häufig in Form von Biofilmen. Dies kann sowohl in Medizin oder Technik mit Risiken als auch mit Nutzen verbunden sein.

In dem am ibvt entwickelten *in vitro*-System des menschlichen Dickdarms (**peristaltic mixed tubular reactor**, PETR) ist es u. a. möglich, den pH-Gradienten und die Resorption dieses menschlichen Organs nachzustellen. Das Ziel des Forschungsschwerpunkts besteht darin, mit diesem Kultivierungssystem das Zusammenspiel der einzelnen Mikroorganismen des menschlichen Mikrobioms zu untersuchen, aber auch den Einfluss von Infektionen und/oder therapeutischen Maßnahmen auf das Mikrobiom zu beobachten. Weitere *in vitro*-Systeme, z. B. ein Harnwegskathetersystem, erlauben die Untersuchung der Behandlung medizinischer Biofilme, wobei hier als Modellorganismus unter anderem der humanpathogene Keim *Pseudomonas aeruginosa* eingesetzt wird.



Abb. 5.4 Schema des PETR zur Nachbildung des menschlichen Dickdarms

4. Bioelektrochemie – Bioelektrochemische Prozesse und Biopolymere für nachhaltige Energiespeichersysteme

Eine gezielte Bildung und Nutzung von Biofilmen auf Elektroden ist das Ziel der Bioelektrochemie. Die Elektrosynthese von Plattform- oder Feinchemikalien an einer Kathode oder die Stromerzeugung an einer Anode in einer mikrobiellen Brennstoffzelle mit Hilfe bioelektrochemischer aktiver Organismen wie *Geobacter sulfurreducens* stellen zukunftsweisende Technologien dar, an denen am ibvt geforscht wird. Darüber hinaus verbessern wir den limitierenden Elektronentransfer von oder zu der Elektrode und untersuchen die Produktion und den Einsatz (modifizierter) Biopolymere sowie ihre elektrochemischen und mechanischen Eigenschaften umfänglich über die gesamte Wertschöpfungskette mit dem Ziel, funktionalisierte Materialien für nachhaltige Energiespeichersysteme zu entwickeln.



Abb. 5.5 Anodenbiofilm von *Geobacter sulfurreducens*

5.4 Zusammenarbeit und Kooperation

Zusammenarbeit mit Universitäten im In- und Ausland

- *Prof Böl*, Institut für Mechanik und Adaptronik (TU Braunschweig)
- *Prof. Bolivar*, Department of Chemical Engineering (Complutense University, Madrid, Spain)
- *Prof. Briesen*, Systemverfahrenstechnik (TU München)
- *Prof. Büchs*, AVT – Bioverfahrenstechnik (RTWH Aachen)
- *Prof. Dietzel*, Institut für Mikrotechnik (TU Braunschweig)
- *Profs. Galindo, Peña and Corkidi*, Institute of Biotechnology (Universidad Nacional Autónoma de México, (UNAM) Cuernavaca, Mexico)
- *Profs. Garnweitner und Kwade*, Institut für Partikeltechnik (TU Braunschweig)
- *Profs. Gernaey and Krühne*, Department of Chemical and Biochemical Engineering (Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark)
- *Prof. Herwig*, Biochemical Engineering (TU Vienna, Vienna, Austria)
- *Dr. Holtmann*, Fachbereich LSE (Technische Hochschule Mittelhessen, Gießen)
- *Prof. Jahn und Dr. Biedendieck*, Institut für Mikrobiologie (TU Braunschweig)
- *Prof. Kraume und Dr. Böhm*, Fachgebiet Verfahrenstechnik (TU Berlin)
- *Prof. Mayr*, Institute of Analytical Chemistry and Food Chemistry (Graz University of Technology, Graz, Austria)
- *Prof. Meyer*, Fachgebiet Angewandte und Molekulare Mikrobiologie (TU Berlin)
- *Prof. Schröder*, Lehrstuhl für Elektrobiologie (Universität Greifswald)
- *Dr. Sesay*, Wyss Institute (Harvard University, Boston, USA)
- *Prof. Szita und Dr. Marques*, Biochemical Engineering (University College London, United Kingdom)

Zusammenarbeit mit Forschungseinrichtungen im In- und Ausland

- *Dr. Fillaudeau*, Toulouse Biotechnology Institute (Toulouse, France)
- *Prof. Harnisch* Elektrobiotechnologie (Helmholtz Zentrum für Umweltforschung, Leipzig, Germany)

Industriepartner

- Boehringer Ingelheim, Biberach
- Chr. Hansen, Nienburg
- Deutsche Tiernahrung Cremer GmbH & Co KG, Düsseldorf
- IBALifescience GmbH, Göttingen
- Leiber GmbH, Bramsche
- Volkswagen AG, Wolfsburg

5.5 Ausstattung des Instituts für Bioverfahrenstechnik

An den zwei Standorten des Instituts (BRICS, Rebenring 56 / PVZ, Franz-Liszt-Straße 35a) werden die Forschungsschwerpunkte mit folgender Ausstattung durchgeführt:

- Kultivierungssysteme vom Mikromaßstab (Eigenentwicklungen, Biolector) über 0,5 L (DasGIP) bis hin zu 100 L (Infors) sowie eine automatisierte Plattform zur Kultivierung und Aufarbeitung (Robotic-Plattform: Tecan; Biolector)
- Sensorik zur Überwachung der Kultivierungen, u.a. Abgassensoren, fseroptische Sensoren für pH, optische Dichte, Gelöstsauerstoff, Glucose etc.
- Werkzeuge zur Aufarbeitung von biologischen Proben wie Filtrationseinheiten, Zentrifugen, Aufschlussgeräte, Rotationsverdampfer und Vakuumkonzentrator
- Potentiostaten für bioelektrochemische Experimente
- Geräte zur optischen Analyse der Biomasse wie Lichtmikroskopie und Konfokale Laserscanning Mikroskopie (CLSM)
- Instrumentelle Analytik
 - Chromatographische Methoden (HPLC, GC, GC-MS, LC-MS, Äkta)
 - Osmometer
 - Rheometer
 - Durchfluscytometer
 - Fluoreszenz-und Extinktions-Messgeräte
 - Quarzkristallmikrowaage

Das Institut unterhält darüber hinaus eine leistungsfähige mechanische und elektronische Werkstatt.

5.6 Themenbeispiele für Studien-, Bachelor- oder Masterarbeiten

- Partikel-supplementierte Produktion des Wirkstoffs Rebeccamycin im blasenfreien Bioreaktor
- Einfluss der Viskosität von Kulturbrühen filamentöser Mikroorganismen auf den Sauerstoffeintrag in verschiedenen Bioreaktoren
- Einfluss der Inokulumkonzentration auf Kultivierungen mit dem Actinomyceten *Actinomadura namibiensis*
- Untersuchungen zum Adsorptionsverhalten pharmazeutisch aktiver Peptide in der Mixed-Mode Chromatographie
- Untersuchungen zum Aggregationsverhalten von elektrochemisch aktiven Mikroorganismen unter Einfluss unterschiedlicher Desaggregationsmethoden
- Etablierung und Kultivierung von CHO-Zellen im Mikroblasensäulen-Reaktor
- Entwicklung einer modularen Begasungsdüse für einen Mikroblasensäulen-Reaktor
- Integration optischer Sensoren in einen Kapillarwellen-Mikrobioreaktor
- Anwendung eines Kapillarwellen-Mikrobioreaktors für biopharmazeutische Assays in tierischen Zellkulturen
- Validierung der quantitativen Analyse verschiedener Darmbakterien mittels Polymerasekettenreaktion
- *Pseudomonas aeruginosa* in einem *in vitro*-Lungeninfektionsmodell
- Anwendung und elektrochemische Charakterisierung von Biopolymeren in nachhaltigen Batterien

Weitere Themen können Sie auch auf der Homepage des ibvt (www.ibvt.de) unter „Abschlussarbeiten“ finden.



6 Institut für Chemische und Thermische Verfahrenstechnik

Technische Universität
Braunschweig
Prof. Dr.-Ing. Stephan Scholl

Langer Kamp 7
38106 Braunschweig
Tel.: (0531) 391-2781
Fax: (0531) 391-2792
ictv@tu-braunschweig.de
www.ictv.tu-braunschweig.de

Institutsleitung:	Prof. Dr.-Ing. Stephan Scholl	391-2780
Emeritus	Prof. Dr.-Ing. Matthias Bohnet	
Akademischer Direktor:	Dr.-Ing. Wolfgang Augustin	391-2789
Junioprofessur:	Prof. Dr. rer. nat. Julia Großheilmann	391-65581
Lehrbeauftragte:	Dr.-Ing. Jan Kuschnerow	391-8584
	Dr.-Ing. Detlev Markus	592-3500
	Dr.-Ing. Martin Schöler	391-8584
Sekretariat:	Anike Altschwager	391-8584
	Julia Cholewa	391-7083
	Marion Harms	391-2781
Technische Mitarbeiter:	Karl Karrenführer	391-2791
	Sven Lorenzen	391-2791
	Christopher Lange (Auszubildender)	391-2791
	Jörg Leppelt	391-2787
	Sabine Knoblauch	391-65588
	Anke Schmidt-Radeleff	391-2788
	Simone Schulze	391-2788
Wissenschaftliche Mitarbeiter:		
David Appelhaus, M. Sc.	391-8580	Conrad Meyer, M.Sc. 391-65582
Felicitas Aselmeyer	391-2793	Andrea Mildner, M.Sc. 391-65585
Lars Biermann, M.Sc.	391-2795	Clemens Müller, M.Sc. 391-7085
Esther Brepohl, M.Sc.	391-2795	Dr.-Ing. Mandy Paschetag 391-8587
Sven Gutperl, M.Sc.	391-2782	Hannes Schneider, M. Sc. 391-2783
Caroline Heiduk, M.Sc.	391-65583	Lukas Rohwer, M. Sc. 391-2783
Annika Hohlen, M.Sc.	391-65582	Natalie Schwerdtfeger, M.Sc. 391-2784
Niklas Jarmatz, M.Sc.	391-7085	Christoph Spiegel, M.Sc. 391-2796
Dr.-Ing. Katharina Jasch	391-8588	Rolf Staud, M.Sc. 391-8582
Luca Jäger, M.Sc.	391-65583	Laura Strottmann, M.Sc. 391-8582
Mathias Kirchner, M.Sc.	0162-3277058	Franziska Teubner, M. Sc. 391-65584
Charlotte Lücking, M. Sc.	0162-3277058	Hanna Wiese, M.Sc. 391-7085
Yan Lu, M.Sc.	391-2782	
Studienfachberatung:	David Appelhaus, M.Sc.	391-8580

6.1 Module für Bachelor- und Masterstudiengänge

Module für Bachelorstudiengänge Maschinenbau, Bio-, Chemie- und Pharmaingenieurwesen

Chemische Verfahrenstechnik	SS	5 LP	2 V/1 Ü	Scholl
Chemische Verfahrenstechnik mit Labor	SS	7 LP	2 V/1 Ü/L	Scholl
Grundoperationen der Fluidverfahrenstechnik	WS	5 LP	2 V/1 Ü	Scholl
Grundoperationen der Fluidverfahrenstechnik mit Labor	WS	7 LP	2 V/1 Ü/L	Scholl
Membrantechnologie	WS	5 LP	2 V/1 Ü/L	Großeheilmann

Module für Masterstudiengänge Maschinenbau, Bio- und Chemieingenieurwesen, Pharmaingenieurwesen, Biotechnologie

Advanced Fluid Separation Processes	SS	5 LP	2 V/1 Ü	Scholl
Advanced Fluid Separation Processes with Laboratory	SS	7 LP	2 V/1 Ü/L	Scholl
Computer Aided Process Engineering I (Introduction)	SS	5 LP	2 V/1 Ü	Scholl
Computer Aided Process Engineering II (Design verfahrenstechnischer Anlagen)	WS	5 LP	2 V/1 Ü	Augustin, Scholl
Digitale Technologien in der Verfahrenstechnik	SS	5 LP	Block	Jasch
Einführung in die Mehrphasenströmung	SS	5 LP	2 V/1 Ü	Augustin, Scholl
Gestaltung nachhaltiger Prozesse der Energie- und Verfahrenstechnik	SS	5 LP	2 V/1 Ü	Paschetag, Scholl
Grundlagen der thermischen Verfahrenstechnik	WS	5 LP	2 V/1 Ü/L	Scholl
Industrielle Prozesse und Technische Katalyse	WS	5 LP	2 V/Ü	Großeheilmann
Interdisziplinäres Forschungsmodul „Vom Gen zum Produkt“	WS/SS	5 LP	Block	Kwade, Scholl, Krull
Mikroverfahrenstechnik	WS	6 LP	2 V/L	Kwade, Jasch, Scholl
Pharmazeutisch-Chemische Reaktionstechnik	SS	5 LP	2 V/1 Ü	Großeheilmann
Thermische Verfahrenstechnik für Fortgeschrittene	SS	10 LP	2 V/1 Ü/L	Scholl
Neue Technologien: Pharmazeutisches Containment	WS	2,5 LP	Block	Schöler
Neue Technologien: Ionische Flüssigkeiten - Innovative Prozessfluide in der Verfahrenstechnik	SS	2,5 LP	Block	Kuschnerow
Neue Technologien: Prozess- und Anlagensicherheit	SS	2,5 LP	Block	Markus

6.2 Inhalte der Lehrveranstaltungen

Advanced Fluid Separation Processes

This course is held in English language and deals with the chemical engineering unit operations of absorption/gas scrubbing, chromatography, drying and membrane processes. As basis for an in-depth understanding of the governing mechanisms mass transport models according to Ficks 1st and 2nd law as well as Stefan-Maxwell are presented and discussed. In the following, the combination of reaction and separation processes as hybride or reactive separations are addressed. Specifically reactive absorption, reactive adsorption, both also referred to as chemisorption, as well as reactive extraction are presented. In all cases the approach and methods to apply for design and operation of new or the revamp of existing processes are discussed. This also refers to the design of new or assessment of existing equipment, its functionality and application for a given task.

Chemische Verfahrenstechnik

In der Vorlesung werden die wesentlichen Aspekte zur Realisierung von Reaktionsschritten in chemischen Produktionsverfahren sowie zur Integration von Reaktion und Stofftrennung vermittelt:

- Grundlagen chemischer Reaktionen
- Modellierung chemischer Reaktionen
- Strömung und Mischen in idealen Systemen
- Makromischverhalten realer Systeme
- Überlagerung von Reaktion und Stofftransport

Computer Aided Process Engineering I (Introduction)

Based on the theory for thermal separation processes as presented in Grundoperationen der Fluidverfahrenstechnik and/or Grundlagen der Thermischen Verfahrenstechnik the typical workflow for process design and optimization is demonstrated. Commercial software products are employed for modelling and simulation of the following tasks:

- Physical properties and phase equilibria: Data retrieval, regression of experimental data, parameter estimation
- Two phase flash: Single stage separations, integral vs. differential operation mode
- Rigorous modelling of a rectification column: Binary mixture, multicomponent mixture, design specifications
- Flow sheet simulation for multistage separation: Feed forward, recycles
- Equipment design: Selection and sizing for distillation columns, heat exchangers, reboilers, condensers
- Costing, process optimization

The lecture is presented in English language with the exercises at the Institutes Electronic Classroom.

Computer Aided Process Engineering II (Design verfahrenstechnischer Anlagen)

Die Vorlesung vermittelt die Grundlagen der Anlagenplanung und wird durch eine Projektarbeit zum Design eines vollständigen verfahrenstechnischen Prozesses begleitet. Dabei wird eine kommerzielle Software für die Fließbildsimulation verwendet. Hauptthemen der Vorlesung sind:

- Prozessdatenbeschaffung, z.B. physikalische Eigenschaften, Sicherheitsdaten, Kapazitätsdaten
- Prozessentwicklung anhand von Reaktionsgleichungen
- Wärme- und Massenbilanzen
- Fließbildsimulation
- Dimensionslose Kennzahlen für die überschlägige Dimensionierung von Apparaten
- Auswahl und genaue Dimensionierung geeigneter Apparate (z.B. Kolonnen, Wärmeübertrager)
- Computer Aided Process Engineering
- Kostenschätzung
- Rechtliche Aspekte wie Umweltauflagen oder Genehmigungsverfahren

Digitale Technologien in der Verfahrenstechnik

Das Modul greift aktuelle Themen aus dem Kontext der Digitalisierung und der Industrie 4.0 auf und skizziert anhand von industriellen und forschungsnahen Beispielen, wie das zukünftige Berufsfeld eines Verfahrensingenieurs aussehen kann. Im Fokus der Veranstaltung stehen u.a. Methoden des Maschinellen Lernens. Lernziel ist es, dass die angehenden Ingenieure geeignete Verfahren für gegebene

Problemstellungen auswählen, anwenden und mit ihrem ingenieurtechnischen Wissen interpretieren können. Die Vorgehensweise bei der Datenaufbereitung und Datenanalyse von Betriebs- und Prozessdaten, sowie die Bewertung von Algorithmen und Modellen hinsichtlich ihrer Vorhersagegenauigkeit und Sensitivität stehen im Fokus. In vorlesungsbegleitenden Übungsböcken werden die erlernten Kenntnisse auf Praxisbeispiele abgestimmt. Geeignete Tools und die zur Datenaufbereitung und Visualisierung erforderliche Programmierumgebung werden vorgestellt und angewendet. Einfache Algorithmen der statistischen Datenanalyse, des maschinellen Lernens sowie Neuronale Netze werden programmiert, ausgeführt und analysiert. Durch Beiträge von ausgewählten Industrievertretern, die Einblicke in aktuelle und zukünftige Tätigkeitsfelder und Geschäftsmodelle geben, wird das Modul abgerundet.

Wesentliche Inhalte:

- Begrifflichkeiten, Definitionen und thematische Zuordnungen zur Digitalisierung im Allgemeinen und im Kontext Industrie 4.0 mit Fokus auf verfahrenstechnische Anwendungen
- Anforderungen an die Sensorik und Anlagen von morgen
- Datengetriebene, hybride Modellierung
- Methoden und Techniken des Maschinellen Lernens (überwachtes, unüberwachtes Lernen)
- Data Mining und Datenanalyse (CRISP-DM, Merkmalsextraktion, -selektion, Clustering, Visualisierung)
- Grundlagen Neuronale Netze und Deep Learning
- Treiber, Potentiale, Initiativen in der chemischen Prozessindustrie im Kontext Digitale Transformation
- Vorstellung von Praxisbeispielen aus Industrie und Forschung
- Programmieren mit Python

Einführung in die Mehrphasenströmung

Neben den einphasigen Strömungen sind in der Verfahrenstechnik die zwei- und dreiphasigen Strömungen von großer Bedeutung. Diese treten nicht nur beim Transport der Stoffe zwischen den einzelnen Apparaten der thermischen Trenntechnik und den Reaktoren auf, sondern bestimmen auch die Konstruktion der Apparate selbst, z. B. Wirbelschicht- und Rührreaktoren. Weitere Anwendungsgebiete der Mehrphasenströmungen sind die pneumatische und hydraulische Förderung, sowie die damit verbundenen Aufgabe- und Abscheidevorrichtungen, z. B. Injektoren und Zykloone. In der chemischen Reaktionstechnik, der Biotechnologie und anderen Gebieten der Verfahrenstechnik findet man in zunehmendem Maße auch Dreiphasenströmungen aus Gas, Feststoff und Flüssigkeit, z. B. in Dreiphasen-Wirbelschicht-Reaktoren. Nach einer Darstellung der strömungstechnischen Grundlagen (Rohrströmung, Ähnlichkeitstheorie, Partikelumströmung, Bildung von Blasen und Tropfen) erfolgt eine Beschreibung der wichtigsten Verfahren und Apparate der Mehrphasenströmungen wie beispielsweise Blasensäulen, Strömungen durch Blenden, Austauschböden und Füllkörpersäulen.

Gestaltung nachhaltiger Prozesse der Energie- und Verfahrenstechnik

Vor dem Hintergrund einer ganzheitlichen Nachhaltigkeitsstrategie, die sowohl ökologische, ökonomische als auch soziale Aspekte umfasst, veranschaulicht die Vorlesung, an welcher Stelle eines typischen Produktlebenszyklus Ingenieure einen entscheidenden Einfluss auf die Nachhaltigkeit nehmen können. Die Integration von Nachhaltigkeitsbetrachtungen in den Workflow einer Verfahrensbearbeitung, die dabei auftretenden Anforderungen an eine nachhaltige Prozessentwicklung, die Vorgehensweise bei einer ökologischen Betrachtung sowie Werkzeuge zur Ökobilanzierung werden in der Vorlesung ausführlich behandelt. In einer begleitenden Übung werden Grundkenntnisse im Umgang mit der Stoffstrommodellierungssoftware umberto® sowie neue Methoden zum Erstellen von Stoffstrommodellen und zur ökologischen Bewertung von verfahrenstechnischen Prozessen vermittelt.

Wesentliche Vorlesungsinhalte:

- Definition der Nachhaltigkeit, Quantifizierung von Nachhaltigkeit
- Beispiele nachhaltiger Produkte
- Historische Entwicklung, aktuelle Initiativen und zukünftige Ausrichtung
- Rahmenbedingungen und Förderungen
- Umweltmanagementsysteme in Unternehmen
- Ökobilanzierung (Leitlinien, Aufbau, Anwendung)
- Vorgehen bei ökologischer Bewertungen von Prozessen
- Datenerfassung (Ansätze, Qualität, Bewertung von Unsicherheiten)
- Allokation von Umweltwirkungen
- Werkzeuge zur Ökobilanzierung (Software, Datenbanken, Ansätze)
- Stoffstromnetzmodellierung als Grundlage für ökologische Betrachtungen
- Modularer Aufbau eines Stoffstromnetzmodells als Basis für Prozessbewertungen
- Elemente der Nachhaltigkeit in stoff- und energiewandelnden Prozessen
- Nachhaltigkeitsbetrachtungen im Workflow einer Verfahrensbearbeitung

- Nachhaltiges Prozess- und Anlagendesign
- Integration ökologischer Kriterien in die Entwicklung neuer bzw. die Verbesserung ausgeübter Prozesse
- Beispiele aus der Prozessindustrie (Chemische Prozesse, Lebensmittel- und pharmazeutische Produktion, Energiewandlungsprozesse)
- Übung und Gruppenarbeit mit der Stoffstromnetzmodellierungssoftware Umberto®

Grundoperationen der Fluidverfahrenstechnik

In der Vorlesung Grundoperationen der Fluidverfahrenstechnik werden die Grundlagen der Beschreibung von Stoffdaten und Phasengleichgewichten, der Wärmeübertragung und die wichtigsten fluiden Trennverfahren besprochen und erläutert. Im Einzelnen sind dies:

- Wärmeübertragung, Verdampfung und Kondensation
- Kristallisation
- Rektifikation
- Extraktion
- Adsorption

Die jeweiligen Themen bestehen aus den theoretischen Grundlagen, Apparaten für die Grundoperation und der prozesstechnischen Auslegung dieser.

Grundlagen der Thermischen Verfahrenstechnik / Thermische Verfahrenstechnik für Fortgeschrittene (für Biotechnologen und Pharmaingenieure)

In der Vorlesung Grundlagen der Thermischen Verfahrenstechnik für die Studiengänge Biotechnologie und Pharmaingenieurwesen werden die thermodynamischen Grundlagen des Stoffverhaltens und Phasengleichgewichts besprochen und erläutert. Eine Auswahl für die biotechnologische und pharmazeutische Industrie bedeutender fluiden Trennverfahren sowie das Themengebiet der Wärmeübertragung werden vorgestellt und diskutiert. Im Einzelnen sind dies:

- Verhalten von Reinstoffen und Stoffgemischen
- Phasengleichgewichte
- Wärmeübertragung
- Extraktion
- Kristallisation
- Trocknung
- Stoff- und Energiebilanzierung, Gleichgewichtsstufenmodell

In der Vorlesung "Thermische Verfahrenstechnik für Fortgeschrittene" werden Themen der Rektifikation unter Anwendung des McCabe-Thiele-Diagramms, der Adsorption, der Adsorption sowie der Membranverfahren mit Umkehrosmose, Mikrofiltration, Nanofiltration und Pervaporation vorgestellt.

Industrielle Prozesse und Technische Katalyse

Die Herstellung von Grund- und Vorprodukten sowie von Spezialprodukten wird an industriellen Beispielen erläutert. Es erfolgt eine Einführung in die Charakterisierung von katalytischen Reaktionen (Umsatz, Ausbeute, Selektivität, Aktivität). Die Prinzipien der homogenen Katalyse sowie Verfahren mit homogenen Katalysatoren in der chemischen Industrie werden erläutert. Die Grundlagen der heterogenen Katalyse sowie industriell heterogen-katalysierte Verfahren werden genauer betrachtet. Katalysatorherstellung, sowie Reaktoren der technischen Katalyse und technische katalysierte Verfahren werden behandelt.

Interdisziplinäres Forschungsmodul „Vom Gen zum Produkt“

Das interdisziplinäre Forschungsmodul im Masterstudiengang soll den Studierenden eine vertiefte Kenntnis verfahrenstechnischer Prozessabläufe Verfahrenstechnik ermöglichen. Die Interdisziplinarität wird insbesondere durch die logische Vernetzung verschiedener Vertiefungsgebiete innerhalb des Labors deutlich. Hierzu sollen praktische Versuche in drei verschiedenen Instituten durchgeführt werden; die Versuche sind dabei thematisch miteinander verknüpft. Mit diesem interdisziplinären Forschungsmodul werden die Studierenden die Wertschöpfungskette vom Gen zum Produkt kennen lernen. Deshalb gliedert sich dieses Modul in drei Teilabschnitte:

- Reaktorversuche (Produktbildung) im Institut für Bioverfahrenstechnik (IBVT)
- Anschlussversuche im Institut für Partikeltechnologie (IPAT)
- Aufreinigungsversuche im Institut für Chemische und Thermische Verfahrenstechnik (ICTV)

Membrantechnologie

Die Vorlesung gliedert sich in zwei Hauptteile. Im ersten Teil werden die Grundlagen, wie typische Merkmale

von Membranprozessen, Strukturen (Materialien, Herstellung) und Stoffaustauschvorgänge vermittelt. Hierbei werden auch Aspekte der Entwicklung organischer und anorganischer Membranen, sowie die Modifizierung von Membranen zur Erzielung verbesserter Trenneigenschaften betrachtet. Im zweiten Teil werden anwendungsorientierte Themen beleuchtet, dabei wird ein spezieller Fokus im Bereich der pharmazeutischen Industrie gelegt und der aktuelle Forschungsstand vermittelt. Das Wissen über Nanofiltration und Ultrafiltration wird am Ende der Vorlesung durch einen repräsentativen Versuch vertieft.

Mikroverfahrenstechnik

Die Umsetzung thermischer, mechanischer und chemischer Grundoperationen in den Mikromaßstab und deren Integration in verfahrenstechnische Anlagen wird den Studierenden dargestellt. Darüber hinaus werden folgende Inhalte behandelt:

- Skalierungseffekte bei der Miniaturisierung von Anlagenkomponenten und deren Auswirkungen auf die Fluid- und Thermodynamik
- Wärmeübertragung, Fouling, Mischen, Fällung und chemische Reaktionen in Mikrokomponenten
- Vor- und Nachteile der Mikroverfahrenstechnik sowie deren industrielle Bedeutung mit Blick auf zukünftige Einsatzgebiete von Mikrokomponenten
- Strategien zur Umsetzung verfahrenstechnischer Grundoperationen in den Mikromaßstab und deren Integration in einen Gesamtprozess mit zugehöriger Peripherie und Messtechnik.
- Mikroverfahrenstechnischer Apparate und deren Einsatz in Industrie und Forschung
- Vorlesungsbegleitende Laborversuche zum Thema Wärmeübertragung und Fällung in Mikrostrukturen

Neue Technologien: Ionische Flüssigkeiten - Innovative Prozessfluide in der Verfahrenstechnik

Ionische Flüssigkeiten („*ionic liquids*“ = „IL“) sind eine Gruppe von Stoffen, die etwa seit dem Jahr 2000 großes Interesse in der Forschung hervorrufen. Sie haben aufgrund besonderer Eigenschaften und ihrer Vielfältigkeit zahlreiche mögliche Einsatzgebiete in der Verfahrenstechnik, aber auch in anderen Ingenieur-anwendungen. In dieser Vorlesung werden die Eigenschaften und die Herstellung ionischer Flüssigkeiten vorgestellt. Weiterhin werden die wichtigsten möglichen Einsatzgebiete und Anwendungen vorgestellt. Diese Beispiele kommen aus dem Bereich der Katalyse, der thermischen Trennverfahren, der Biokatalyse und der pharmazeutischen Anwendungen. Darüber hinaus werden die Perspektiven ionischer Flüssigkeiten als sogenannte *Engineering Fluids*, zum Beispiel als Dicht- oder Schmierflüssigkeit erläutert. Neben dem Einsatz als Bulkflüssigkeit wird auch auf das zunehmend wichtige Technologiefeld dünner IL Filme und Schichten auf festen Oberflächen eingegangen. Schließlich werden in der Vorlesung die Möglichkeiten des Recyclings und Reinigung ionischer Flüssigkeiten vorgestellt und generelle Umweltaspekte erläutert und diskutiert.

Neue Technologien: Prozess- und Anlagensicherheit

Ziel der Prozess- und Anlagensicherheit ist die sichere und umweltverträgliche Herstellung von chemischen Produkten. Die Vorlesung vermittelt aufbauend auf der Analyse von historischen Störfällen die Grundlagen der sicherheitstechnischen Beurteilung von verfahrenstechnischen Anlagen. An praxisrelevanten Beispielen aus der Prozessindustrie werden sicherheitstechnische Fragestellungen diskutiert.

Inhalte der Vorlesung:

- Einführung in die Sicherheitstechnik
- Sicherheitsbeurteilung von gefährlichen Stoffen
- Brand- und Explosionsschutz
- Anlagensicherheitskonzepte
- Risikomanagement

Neue Technologien: Pharmazeutisches Containment

In der pharmazeutischen Industrie beschreibt der Begriff Containment die Gesamtheit der Schutzmaßnahmen vor den zu verarbeitenden Stoffen. Aufgrund der hohen Schädigungswirkung vieler Arzneiformen ist dieser Schutz nur durch umfangreiche Eingriffe in die Prozessgestaltung und die Konstruktion der Verarbeitungssysteme realisierbar. Im Rahmen der Vorlesung wird ein Verständnis für die arbeits-hygienischen Anforderungen an Maschinen und Anlagen in der pharmazeutischen Industrie vermittelt. Es werden Lösungsmöglichkeiten zur Erfassung der Containmentleistung diskutiert und ein Eindruck von den Schwierigkeiten bei der Durchführung von praktischen Messungen vermittelt. Weiterhin erfolgt eine Betrachtung der Wechselwirkungen zwischen Bedienschutz und GMP-Anforderungen sowie eine Vorstellung der gängigen technischen Lösungen für verschiedene Containmentanwendungen.

Pharmazeutisch-Chemische Reaktionstechnik

Ein typischer Produktionsprozess eines Medikaments vom Ausgangsmaterial zum API (*active pharmaceutical ingredient*) über chemische Synthesen und der Prozess vom Labor in die Produktion wird den Studierenden dargestellt. Diese Prozesse werden an industriell relevanten Beispielen erläutert und vertieft. Dabei wird ein spezielles Augenmerk auf verschiedene Reaktoren und deren Betriebsweisen, sowie auf das Verweilzeitverhalten verschiedener Reaktoren gelegt. Die Reaktionstechnik einphasiger komplexer Reaktionen, sowie die Reaktionstechnik mehrphasiger Reaktionen und der Mikroreaktionstechnik wird an pharmazeutisch relevanten Reaktionen vertieft. Den Studierenden wird weiterhin ein Einblick in „Green Chemistry“ und neue Innovationstechnologien gegeben.

6.3 Arbeitsgebiete und Forschungen

Am Institut für Chemische und Thermische Verfahrenstechnik werden Problemstellungen in den Forschungsgebieten Fouling und Reinigung, Nachhaltige Produktionstechnologien, Innovative Apparat- und Anlagenkonzepte, Prozesstechniken der Wirkstoffe sowie Pharmazeutisch-Chemische Reaktionstechnik bearbeitet. Dabei werden sowohl Problemstellungen der ingenieurtechnischen Grundlagenforschung als auch anwendungsorientierte Aspekte bearbeitet. Die Arbeiten werden in Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen wie auch mit der Industrie durchgeführt.

1. Fouling und Reinigung

Unter Fouling wird hier die Belagbildung auf wärmeübertragenden Flächen verstanden. Dies reduziert die Wärmeübertragungsleistung des Apparates, was zu erhöhten Investitionen und Betriebskosten wie auch zu Produktschädigungen führen kann. Am ICTV werden derzeit Arbeiten zum Kristallisations-, Partikel- und Biofouling sowie zu Fouling und Reinigung bei der Lebensmittelproduktion durchgeführt.

Kristallisationsfouling ist insbesondere bei der Meerwasserentsalzung und Trinkwasseraufbereitung, wie aber auch beim Einsatz von Wasser als Kühlmedium von großer industrieller Bedeutung. An verschiedenen Versuchsanlagen werden die bestimmenden stofflichen, apparativen und betrieblichen Parameter für den Foulingvorgang untersucht und modelliert. Ziel ist die Vorhersage des unter Prozessbedingungen zu erwartenden Foulingverhaltens und daraus abgeleitet Maßnahmen zur Vermeidung oder Minderung von Fouling. Der zur Prozessoptimierung interessanteste Zeitabschnitt ist die Anhaftung erster Kristalle in der sogenannten Induktionsphase. Um diese möglichst bis ins Unendliche zu verlängern und dadurch Standzeiten zu erhöhen und Kosten zu senken, ist die genaue Kenntnis des Kristallisationsvorgangs und der wirkenden Oberflächenkräfte von Nöten. Parameter dieser Wechselwirkungen sind u.a. Oberflächenenergie, Rauheit, Strömungsgeschwindigkeit. Eine Möglichkeit zur Foulingminderung ist das Aufprägen einer periodischen oder stochastischen Pulsation auf die Strömung. Dies führt zu einer Erhöhung der Wandschubspannung und somit zu einer Verminderung der Ablagerungsrate von in der Strömung befindlichen oder in Wandnähe gebildeten Partikeln. Ziel ist die Optimierung des Pulsationsaufwandes bzgl. Amplitude und Frequenz für eine möglichst weitgehende Unterdrückung der Ablagerung.

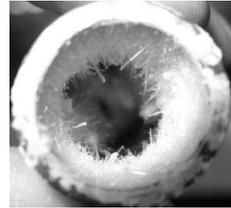


Abb. 6.1 CaSO_4
Kristallisation in einem Rohr

Die Bildung von Ablagerungen bei der Lebensmittelproduktion, beispielsweise bei der thermischen Behandlung von Milchprodukten, ist ein ernsthaftes Problem in der Lebensmittelverarbeitenden Industrie. Neben klassischen Untersuchungen im Makromaßstab werden am ICTV auf diesem Gebiet ebenfalls Experimente im Mikromaßstab durchgeführt. In beiden Fällen werden durch das auftretende Fouling nicht nur erhöhte Investitionen und Betriebskosten verursacht, auch das Verunreinigungsrisiko steigt erheblich an. Dies kann besonders in der Lebensmittelindustrie zu Sterilitätsverlust führen, welche unmittelbar die Produktqualität beeinträchtigen. Daher sind regelmäßige Reinigungszyklen fester Bestandteil der Produktion. Zur Erforschung des Reinigungsverhaltens ist zunächst eine exakte Beurteilung der Beläge notwendig, da die zu wählende Reinigungsmethode stark von der Art des Foulings abhängt. Eine notwendige Bedingung zur verbesserten Abtragung von Foulingschichten ist beispielsweise, dass die auf den Belag wirkenden Strömungskräfte größer sein müssen als die Haftkräfte zwischen Belag und Oberfläche.

Eine weitere Möglichkeit der Effizienzsteigerung von Wärmeübertragern wird durch das Einbringen von strukturierten Oberflächen, wie z.B. Dellen oder Rippen auf der wärmeübertragenden Oberfläche, erzielt. Die Strukturierung vergrößert die wärmeübertragende Fläche und führt zur Intensivierung der Turbulenzen in Wandnähe. Beides erhöht den Wärmeübergang bei gleichzeitig nur gering ansteigenden Strömungsdruckverlusten. Mit der Strukturierung wird jedoch häufig auch die ungewollte Ablagerung von suspendierten Partikeln aus dem Fluid, wie Rost, Sand oder Schlamm, auf der wärmeübertragenden Oberfläche begünstigt. Im Rahmen eines Forschungsprojektes werden die Wirkmechanismen des Partikelfoulings auf strukturierten Oberflächen experimentell untersucht.

2. Nachhaltige Produktionstechnologien

Ziel dieses Arbeitsgebiets ist die Entwicklung nachhaltiger Produktionsprozesse der stoffwandelnden Industrie. Dies wird durch die Betrachtung verfahrenskonzeptioneller und apparativer Aspekte unter dem Gesichtspunkten Energie- und Ressourceneffizienz sowie ökologischer und ökonomischer Vorteilhaftigkeit als auch sozialer Vertretbarkeit erreicht. Dabei werden sowohl die Entwicklung und der Aufbau neuer Prozesse als auch die Überarbeitung bestehender Prozesse untersucht. Die folgenden Konzeptpunkte werden dabei in den Mittelpunkt gerückt:

- Integration ökologischer Aspekte in die frühe Phase des Verfahrensentwurfs bzw. der -überarbeitung durch die quantitative ökologische Bewertung typischer verfahrenstechnischer Entscheidungsalternativen
- Einbindung neuartiger oder bisher wenig genutzter Prozessalternativen zu bewährten energieintensiven Verfahren sowie Bewertung dieser unter ökologischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten
- Entwicklung neuer Prozesse zur Lösung bestehender umweltrelevanter Problemstellungen, die durch nicht geschlossene Wertstoffkreisläufe entstehen
- Umstellung von Batch-Herstellungsprozessen hin zu einer kontinuierlichen Prozessierung zur Reduktion der energetischen und stofflichen Aufwendungen in Kombination mit wirtschaftlichen Verbesserungen
- Aufarbeitung von Nebenströmen zur Entlastung anfallender Abwässer bei gleichzeitiger Ausbeuteerhöhung

Die, für die Untersuchung der obenstehenden Aspekte notwendigen, experimentellen Untersuchungen werden durch methodisch-theoretische Modellierungen mit Hilfe von Fließbildsimulationen und Stoffstromnetzen vorbereitet und unterstützt. Diese Arbeiten bilden die Grundlage für die nachfolgenden Prozessbewertungen im Hinblick auf verfahrenstechnische, ökologische und ökonomische Aspekte. Die Prozesse müssen dabei in dem für die Verfahrensbearbeitung relevanten Detaillierungsgrad abgebildet werden, um die bei der Bewertung erhaltenen Ergebnisse analysieren und auf mögliche Potentiale untersuchen sowie bewerten zu können. Dabei gilt es, die Besonderheiten der Prozessführung genauso zu berücksichtigen, wie die unterschiedlichen Anforderungen der verschiedenen Industriezweige im Hinblick auf Energie- und Ressourceneinsatz, sowie anfallende Abwässer und Emissionen. Die Bewertung gelingt anhand von Key-Performance-Indikatoren und ökologischer Kennzahlen, die ebenso eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf größere Maßstäbe und vergleichbare Prozesse ermöglicht. Dies wird im Folgenden anhand zweier typischer Anwendungsgebiete verdeutlicht.

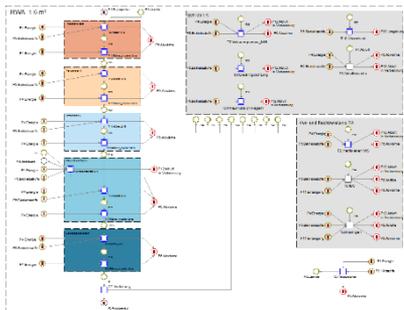


Abb. 6.2 Stoffstromnetz

erneute Produktion von PET ohne Qualitätsverlust und somit die Schließung des Wertstoffkreislaufs zu erreichen. Ausgangsprodukt sind bisher nicht recyclebare mehrschichtige Plastikverbunde, die unter Abtrennung von Begleitkunststoffe aufgearbeitet werden. Das dafür notwendige Verfahren wird zurzeit am ICTV entwickelt und die Machbarkeit anhand einer Technikumsanlage dargelegt.

Ein typischer Ansatzpunkt für die nachhaltige Produktion ist die Schließung bestehender unvollständiger Wertstoffkreisläufe. Dies zeigt sich besonders dramatisch in den Plastikmüllteppichen der Weltmeere. Bisherige Konzepte zur Verwendung dieses Mischplastik-Abfalls konzentrieren sich auf die thermische Verwertung und vernachlässigen dabei die Endlichkeit des Rohstoffs Erdöl. Deshalb arbeitet das ICTV zusammen mit weiteren industriellen wie akademischen Partnern an der Entwicklung eines kontinuierlichen Prozesses zum chemischen Recycling von PET, dem am weitesten verbreiteten Verpackungspolymer. Fokussiert wird die Rückgewinnung der Monomere Terephthalsäure und Ethylenglykol, um eine

Ein anderer Ansatzpunkt sind die bevorzugt diskontinuierlich arbeitenden Prozesse der spezialchemischen und pharmazeutischen Industrie. Durch die Überführung der Prozesse hin zu kontinuierlichen Prozessen

können hohe umweltbezogene und wirtschaftliche Verbesserungen generiert werden. Dies kann beispielsweise an den Produkten der Farben- & Lackindustrie verdeutlicht werden.

Die bestehenden Verfahren sind oft mit einem hohen Einsatz an Personal, Energie sowie Reinigungsmitteln verbunden. Ein kontinuierliches Produktionsverfahren bietet höhere Produktionskapazitäten und mit einer entsprechenden Automatisierung der Anlage konstante und hohe Produktqualitäten. Besondere Herausforderung hierbei ist es nun die fehlende Flexibilität in einer kontinuierlichen Fertigung zurückzuerlangen. Mittels Kampagnenfertigung oder entwickelten Produktwechselstrategien werden Mehrproduktanlagen generiert, die die Vorteile beider Produktionsverfahren vereinen.

3. Innovative Apparate- und Anlagenkonzepte

In dem Arbeitsgebiet werden neue Apparate- und Verfahrenstechnologien und Verfahren beleuchtet sowie Maßnahmen zur Erweiterung der Einsatzgebiete bekannter Apparate wie auch der Einsatz neuer Anlagenkonzepte mit dem Fokus auf thermische Trennverfahren untersucht. Hierbei werden klassische ingenieurstechnische Methoden zur Auslegung und modellbasierten Beschreibung relevanter physikalischer Mechanismen herangezogen, aber auch alternative Herangehensweisen, z.B. aus dem Bereich des Maschinellen Lernens, erprobt. Als Grundlage dafür stehen diverse Verdampfungs- und Kondensationsanlagen sowie Rektifikationskolonnen in unterschiedlichen Maßstäben zur Verfügung.

Naturumlaufverdampfer sind z.B. aufgrund ihrer Wirtschaftlichkeit und einfachen Bauweise einer der am häufigsten verwendeten Verdampferarten in der stoffwandelnden Industrie. Der charakteristische Selbstumlauf entsteht aufgrund von Dichteunterschieden zwischen einphasigem Zulauf und zweiphasigem Flüssigkeits-/Dampfgemisch im Verdampfer- und Brüdenrohr. Die Kopplung von Wärmeübertragung und Fluidmechanik schränkt allerdings den Betriebsbereich stark ein. Neue Apparattypen in Kissenplattenbauweise besitzen gute Wärmeübertragungseigenschaften bei geringen Druckverlusten, was zu einer Erweiterung des Betriebsbereichs auch unter Vakuumbedingungen führt und somit einen ökologisch-ökonomisch vorteilhaften Einsatz ermöglicht. Mittels neuer computergestützter Methoden kann eine weiterführende Prozessanalyse, z.B. zur Identifikation von Instabilitäten im Umlaufverhalten und einer Vorhersage von Störungen im Betriebsverhalten trotz komplexer wärme- und fluidmechanischer Zusammenhänge ermöglicht werden. Eine hybride Modellierung, welche mechanistisch gut beschreibbare mit statistisch modellierten Vorgängen vereint, wird am Beispiel der Naturumlaufverdampfung erprobt.

Dünnschichtverdampfer eignen sich besonders für thermisch sensible, hoch-viskose oder feststoffbeladene Stoffe, und eröffnen neue Wege bei der Wertstoffrückgewinnung, indem sie zur Lösemittelrückgewinnung und Aufreinigung eingesetzt werden. Aufgrund der Vielzahl von veränderlichen Betriebs- und Apparateparameter kann der Dünnschichtverdampfer zwar optimal auf die jeweiligen Produkteigenschaften eingestellt werden, eine Modellierung des Apparateverhaltens und letztendlich ein optimiertes Design stellen jedoch eine große Herausforderung und aktuellen Forschungsbedarf dar.

Bei der sogenannten Flash-Verdampfung findet die Bildung der Dampfphase nicht wie bei vielen anderen Verdampferarten an der heißen Übertragungsfläche im Wärmeübertrager statt, sondern erst während der Entspannung über ein Druckhalteorgan, wie z.B. einer Drossel. Aufgrund des Druckgefälles kommt es zu einer explosionsartigen partiellen Verdampfung, bei der die Gefahr sehr hoch ist, dass viele kleine Tropfen entstehen und in nachgeschalteten Trennkolonnen in den Dampfstrom mitgerissen werden. Der Tropfenmitriss während eines Gas-flüssig-Trennprozesses macht die zuvor investierte Trennleistung zunichte und beeinträchtigt nachgeschaltete Prozessstufen. Auf Basis experimenteller Untersuchungen in einem Entspannungsverdampfer wird eine Datenbasis und ein Kennzahlen-Modell geschaffen, um den Tropfenmitriss bei verschiedenen betrieblichen, stofflichen und apparativen Bedingungen zu bestimmen.

Die Rektifikation stellt das industriell wichtigste Verfahren zur Trennung von Stoffgemischen dar. Da bei vielen chemischen Reaktionen nicht nur das gewünschte Produkt entsteht, ist die Stofftrennung in vielen Prozessen der chemischen Industrie von höchster Wichtigkeit. Die Trennleistung einer Rektifikationskolonne und die Fluidmechanik im Apparat werden dabei wesentlich von Eigenschaften der zu trennenden Stoffe bestimmt. In Versuchen wird daher der Einfluss der Viskosität sowie wässrig-weitsiedender Eigenschaften quantifiziert und in Modellen abgebildet. Ziel ist es hier, Apparate in Zukunft besser und genauer auslegen zu können.



Abb. 6.3
Rektifikationskolonne

Thermische Trennverfahren zur Aufarbeitung flüssiger Stoffgemische stellen zentrale Technologien in allen Stoffwandlungsprozessen der Prozessindustrie dar. Bei Präsenz von grenzflächenaktiven Substanzen kann es dabei zu einer Schaumbildung kommen, welche den stabilen Betrieb eines Verdampfers und/oder einer Kolonne beeinträchtigen können. Der Schaum be- oder verhindert eine erforderliche Phasentrennung, kann beständig wachsen und damit im ungünstigsten Fall den Betrieb eines Apparates zum Erliegen bringen. In einem bundesweiten Forschungscluster wird das Ziel verfolgt, ein breitgefächertes physikalisches Instrumentarium zur Prävention, Inhibierung und Zerstörung unerwünschten Schaums in thermischen Anlagen zur Produktion von Chemikalien, Lebensmitteln und Getränken zu erarbeiten und zu erproben.

Weiteres Thema des Arbeitsgebietes ist die Untersuchung und Modellierung der Kondensation unter Anwesenheit von Inertgasen. Hierbei kommen u.a. neue faseroptische Messtechniken zum Einsatz, um das Temperaturprofil entlang des Kondensationsweges zu erfassen.

4. Prozesstechniken der Wirkstoffe

Die pharmazeutische Industrie ist ständig auf der Suche nach neuen Molekülen für medizinische Anwendungen sowie verbesserten Herstellungs- und Aufbereitungsverfahren. In dieser Arbeitsgruppe wird deswegen die chemische und biologische Herstellung von pharmazeutischen Wirkstoffen sowie deren Aufreinigung und prozesstechnischer Umsetzung untersucht. Dabei haben die meisten Projekte zum Ziel, bisher absatzweise betriebene Prozesse in eine kontinuierliche Betriebsweise zu überführen. Der größte Nachteil von batchweise betriebenen Prozessen, vor allem in Hinblick auf pharmazeutische Anwendungen, sind Batch-zu-Batch Qualitätsschwankungen der Produkte, welche durch eine Batch-zu-Konti Übertragung verhindert werden können. Voraussetzung für eine solche Übertragung ist ein tiefgehendes Verständnis der Prozesse. Dazu kann der Einsatz sog. Liquid-Handling-Systeme (LHS) genutzt werden. Diese Roboter dienen in erster Linie der automatisierten Dosierung von Flüssigkeiten, bieten darüber hinaus oft aber auch weitere Funktionen wie das Heizen, Kühlen, Mischen und Filtrieren von Flüssigkeiten oder die Dosierung von Feststoffen. Mit Hilfe eines solchen Systems können in der Arbeitsgruppe in kurzer Zeit zahlreiche Prozessparameter (z.B. in einem Design-of-Experiments) variiert und so optimale Bedingungen für eine Übertragung auf einen kontinuierlichen Prozess gefunden werden. Auch bei der Entwicklung gänzlich neuer Prozesse im Labormaßstab oder anderen Aufgaben wie die Löslichkeitsbestimmung kann das LHS eingesetzt werden. Außerdem ist für die Umstellung in den kontinuierlichen Betrieb oft eine entsprechende Online-Analytik notwendig. Daher liegt ein Schwerpunkt derzeit auf der Erprobung neuartiger Sensorsysteme zur Prozessüberwachung. Für die Überwachung von Kristallisationen wird z.B. ein neues Sensorsystem eingesetzt, mit dem der Kristallisationsfortschritt in-line verfolgt werden kann. Durch die Kombination verschiedener Messverfahren in einem System wird ein umfassendes Bild relevanter Prozessgrößen, wie z.B. der Temperatur oder Durchmischung, während des Prozesses ermöglicht. Hierbei wird neben der kontinuierlichen auch die disperse Phase berücksichtigt. Damit wird es möglich, den Kristallisationsprozess gezielt so zu führen, dass eine gleichbleibende Produktqualität gewährleistet wird.

Da die Kristallisation für die pharmazeutische Industrie eine vielfältig eingesetzte Grundoperation darstellt, ist die Erforschung geeigneter Kristallisationsverfahren ein weiterer Schwerpunkt der Arbeitsgruppe. So beschäftigt sich ein eigenes Forschungsprojekt mit der kontinuierlichen Kristallisation und der Entwicklung des sogenannten Archimedische Schraube Kristallisor / Reaktor (ASKR). Das Ziel ist es, durch eine geeignete Fluidodynamik die finalen Produkteigenschaften wie beispielsweise die Partikelgröße und -form gezielt zu beeinflussen und einstellen zu können. Der kontinuierliche Betrieb erfolgt dabei in einem stationären Gleichgewichtszustand, sodass die Kristalle unter

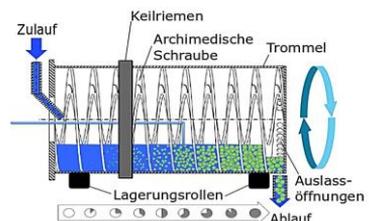


Abb. 6.4 Archimedische Schraube Reaktor

identischen Prozessbedingungen wachsen. Dies führt zu einer erhöhten Einheitlichkeit des Kristallisats gegenüber Batch-Kristallisatoren, die in Zyklen betrieben werden. Alleinstellungsmerkmale speziell des beforschten ASKR sind eine kontinuierliche, in Segmente unterteilte Förderung des Lösungsstroms und die Rotation des gesamten Kristallisators zur Suspendierung der Kristallphase. Dies visiert eine möglichst homogene Verweilzeit der Fluidelemente und Kristalle sowie die Vermeidung von Rührern zur Durchmischung an, die häufig die Ursache für unerwünschte Schäden an den Kristallen sind.

Besteht die Möglichkeit der Kristallisation nicht, sind Adsorption und Chromatographie oft geeignete Grundoperationen, um eine Wertkomponente aus einer komplexen Mischung zu gewinnen. Die Vorteile dieser Verfahren bei der Aufarbeitung komplexer Mischungen lassen sich insbesondere bei biotechnologisch hergestellten Produkten oder Naturstoffextrakten nutzen. Die Forschungsarbeiten am ICTV fokussieren sich in dieser Hinsicht auf die Charakterisierung von Adsorbentien, insbesondere bei geringer Materialverfügbarkeit, sowie der Entwicklung kontinuierlicher Verfahren zur energieoptimierten Produktion pharmazeutischer Wirkstoffe. Die Bestimmung von Adsorptionsgleichgewichten kann mittels sogenannter dynamischer Methoden schnell und materialsparend erfolgen, wobei der Aufwand mit steigender Genauigkeit zunimmt. Da diese Verfahren lange Zeit nur für chromatographische Systeme eingesetzt wurden, besteht ein zusätzlicher Forschungsbedarf zur Eignung bei verschiedenen Stoffsystemen sowie zur Auswahl der geeigneten Prozessbedingungen und den vorhandenen Messunsicherheiten, bevor eine breite Anwendung dieser nützlichen Methoden zu erwarten ist.

5. Pharmazeutisch-Chemische Reaktionstechnik

Der Bedarf an nachhaltigen, leistungsfähigen und zuverlässigen Methoden zur kontrollierten Freisetzung von Arzneistoffen aus Arzneiformen wächst kontinuierlich. Für diese anspruchsvolle Aufgabenstellung sind verschiedene Lösungsansätze in der Literatur bekannt, wozu auch der Einschluss von Arzneistoffen in Hydrogele gehört. Solche innovativen Systeme ermöglichen die „intelligente“ Abgabe von bioaktiven Molekülen aus Medikamenten. Nachteile bereits existierender intelligenter Hydrogele bestehen in gerin-



Abb. 6.5 Formstabile Hydrogele

ger mechanischer Stabilität, begrenztem und nicht vollständig reversiblen Quellvermögen und einer trägen Antwort auf externe Stimuli. Um diese Eigenschaften zu verbessern, sollen in Forschungsvorhaben neuartige Hydrogele synthetisiert, chemisch modifiziert und als Wirkstoffträger optimiert werden. Ziel ist es, Arzneistoffe aus den Hydrogelen über einen definierten Zeitraum und an einem bestimmten Ort gezielt freizusetzen, um so die Wirkdauer zu steuern und unerwünschte Wirkungen abseits des Wirkortes zu minimieren. Die Quellungseigenschaften eines Hydrogels stellen im Rahmen der Verwendung für diffusionsgesteuerte und chemisch kontrollierte Freisetzung einen wesentlichen Faktor dar und werden unter Variation verschiedener Parameter untersucht. Neben der hohen Fähigkeit zur Wasserspeicherung zeigen diese Materialien in wässrigen und organischen Medien ein unterschiedliches Quellungs- und Schrumpungsverhalten. Dieser Vorteil soll genutzt werden, um eine gezielte Wirkstofffreigabe („*Stimulus-responsiv*“) in Abhängigkeit von äußeren Einflüssen, wie pH-Wert, Temperatur, Licht, Druck etc. durch gezielte Funktionalisierung der Materialien zu erreichen. Neben den Freisetzungsprofilen und der Synthese neuartiger Hydrogele sollen Struktur-Eigenschaftsbeziehungen, Biokompatibilität, sowie die zelluläre Bioverteilung untersucht werden. Neben der Optimierung der Reaktionsbedingungen wird die Anwendungsbreite der Methode systematisch beleuchtet. Die synthetisierten Hydrogele mit den notwendigen mechanischen, biologischen und chemischen Eigenschaften werden für eine spätere Granulierung und Tablettierung untersucht. In-vitro-Freisetzungssysteme in physiologisch relevanten Medien für die Charakterisierung pharmazeutischer Eigenschaften, wie Freisetzung und Zerfall, werden entwickelt und für ein breites Wirkstofffeld anwendbar gemacht. Darüber hinaus soll ein grundlegendes Verständnis der neuen Arzneiformen und deren Interaktion mit den Wirkstoffen erarbeitet werden. Durch die Synthese innovativer human biokompatibler Wirkstoffträger als Drug-Delivery-System sowohl für Arzneistoffsysteme

als auch für neue Medizinprodukte müssen Verfahrenstechniken angepasst und technisch-analytische Methoden zur Charakterisierung geschaffen werden. Durch die Verarbeitung dieser neuartigen Materialien ergeben sich auch neue verfahrenstechnische Möglichkeiten in der Herstellung der Arzneistoffträger, wie z.B. neue Anlagen-/Reaktor-Konzepte und Automatisierungsmöglichkeiten. Weiterhin müssen z.B. temperaturgesteuerte Prüfumgebungen für quellbare Formkörper und geeignete Medien gefunden werden, um die Arten der steuerbaren Wirkstofffreisetzung durch verschiedene Stimuli, z.B. der Temperatur, abzudecken.

6.4 Themenbeispiele für Projekt-, Bachelor-, Studien- oder Masterarbeiten

Eine umfassende und aktuelle Liste offener Themen findet Ihr auf unserer Website unter <https://www.tu-braunschweig.de/ictv/studium-lehre/studentische-arbeiten>.

Fouling und Reinigung

- Entwicklung von Betriebsstrategien für das Monitoring von Lebensmittelverschmutzungen
- Untersuchung des Haftverhaltens von Lebensmittelverschmutzungen
- Untersuchungen zur Belagbildung im Mikromaßstab
- Bestimmung von Diffusionskoeffizienten bei der Reinigung
- Entwicklung von CIP-Reinigungsstrategien für Mikrokomponenten
- Optische Untersuchung von Foulingschichten im Makro- und Mikromaßstab
- Untersuchung veränderlicher Stoffeigenschaften von Milchbestandteilen
- Strömungsvisualisierung an Wärmeübertragern

Nachhaltige Produktionstechnologien

- Inbetriebnahme und Regelung kontinuierlicher Produktionsanlagen
- Abbildung von Prozessen mittels Fließbildsimulation
- Prozessbewertung hinsichtlich der potentiellen Umweltwirkungen
- Untersuchungen zur Einbindung neuer Technologien in bestehende Wertschöpfungsketten
- Experimentelle Arbeiten zum kontinuierlichen chemischen Recycling PET-haltiger Kunststoffverbunde
- Experimentelle Optimierung der Kristallisation von Terephthalsäure aus alternativen Rohstoffen
- Experimentelle Ausarbeitung von Prozessbausteinen zur Identifikation von Key Performance Indikatoren

Innovative Apparate- und Anlagenkonzepte

- Bestimmung der Trennleistung viskoser und wässrig-weitsiedender Gemische bei der Rektifikation
- Störende Schäume bei der Naturumlauferverdampfung – Entstehung, Inhibierung und Zerstörung

- Energieeffiziente Verdampfung- Naturumlaufverdampfer in Kissenplattenbauweise
- Brüdenkompression in der Chemischen Prozessindustrie- Bedarfe- Herausforderungen-Potentiale
- Entwicklung eines Berechnungstools zum wärmetechnischen Design von Verdampfern für Brüdenkompressionsszenarien aus der chemischen Industrie
- Untersuchungen zum Tropfenmitriss bei der Flash-Verdampfung zur Entwicklung von Auslegungs-, Modellierungs- und Skalierungsansätzen
- Innovative Technologien zur Intensivierung von Kondensationsvorgängen mit Inerten
- Optische Erfassung und Charakterisierung der Flüssigkeitsverteilung in Dünnschichtverdampfern
- Experimentelle Charakterisierung von Verweilzeit und Flüssigkeitsvolumen in Dünnschichtverdampfern
- Untersuchung der Verdampfungsleistung und Lastgrenzen von Dünnschichtverdampfern
- Modellierung des Betriebsverhaltens von Naturumlaufverdampfern mittels Machine Learning

Prozesstechniken der Wirkstoffe

- Kristallisation chemisch-/pharmazeutischer Wertprodukte in einem neuartigen Kristallisator
- Untersuchung der hydrodynamischen Beanspruchung von Kristallisationsprozessen
- Prozessführung von Kristallisationen basierend auf neuronalen Netzen
- Durchführung von Extraktionsprozessen schwer trennbarer flüssig/flüssig Stoffgemische
- Erstellung von Gleichgewichts- und Kinetikdaten von Flüssigphasenadsorptionen

Pharmazeutisch-Chemische Reaktionstechnik

- Synthese neuartiger PILs-basierter Hydrogele
- Wirkstofffreisetzungsuntersuchungen an PILs-basierten Hydrogelen
- Morphologische und Chemische Charakterisierung neuer PILs-basierter Hydrogele
- Kontinuierliche Aufreinigung PILs-basierter Hydrogele



7 Institut für Energie- und Systemverfahrenstechnik

Technische Universität
Braunschweig
Prof. Dr.-Ing. Daniel Schröder

Langer Kamp 19b
38106 Braunschweig
Tel.: (0531) 391-3043
Fax: (0531) 391-5932
ines@tu-braunschweig.de
www.tu-braunschweig.de/ines

Institutsleitung:	Prof. Dr.-Ing. Daniel Schröder	391-3043
Seniorprofessor:	Prof. Dr.-Ing. Petr Novák	391-3028
Emeritus:	Prof. Dr. techn. Reinhard Leithner	391-3024
Lehrbeauftragte:	Prof. Dr.-Ing. Lars Kühl	05331 939-39610
	Prof. Dr.-Ing. Henning Zindler	05331 939-39680
Sekretariat:	Frau Ina Schunke	391-3043
Controlling	Frau Beatrice Hippe	391-3033
Technische Mitarbeiter:	Herr Willi Tobiaschus	391-63650

Wissenschaftliche Mitarbeiter:

Dr. Fenila Francis Xavier	391-65604	Dr.-Ing. Adnan Tasdemir	391-3038
Dr.-Ing. Xin Gao	391-66669	Dr.-Ing. Balakrishnan Munirathinam	391-3031
M. Sc. Binbin Zhu	391-3037	M. Sc. Dominik Emmel	391-3040
M. Sc. Walter Cistjakov	391-3034	M. Sc. Hassan Karaki	391-3039
M. Sc. Niklas Bless	391-3023	M. Sc. Yingying Yang	391-3035
M. Sc. Min Li	391-66669	M. Sc. Tina Reuter	391-3036
M. Sc. Neil Jacques Bartie	391-3032	Dr. Ulf Breddemann	391-3024

Studienfachberatung:	M. Sc. Walter Cistjakov	391-3034
-----------------------------	-------------------------	----------

7.1 Module für Bachelor- und Masterstudiengänge

Module für Bachelorstudiengänge Maschinenbau, Wirtschaftsingenieurwesen Maschinenbau, Bio-, Chemie- und Pharmaingenieurwesen

Einführung in numerische Methoden für Ingenieure	WS	5 LP	2 VL/1 Ü	Schröder, wiss. Mitarbeiter
Electrochemical Energy Engineering	WS	5 LP	2 VL/1 Ü	Munirathinam, Gao, wiss. Mitarbeiter
Grundlagen der Energietechnik (mit Labor)	SS	5 LP (7 LP)	2 VL/1 Ü (2 L)	Schröder, wiss. Mitarbeiter
Regelungstechnik	SS	5 LP	2 VL/1 Ü	Schröder wiss. Mitarbeiter
Projektarbeit	WS/SS	6 LP		Schröder, wiss. Mitarbeiter
Abschlussarbeit Bachelor	WS/SS	14 LP		Schröder, wiss. Mitarbeiter

Module für Masterstudiengänge Maschinenbau, Wirtschaftsingenieurwesen Maschinenbau, Bio-, Chemie-, Pharmaingenieurwesen und nachhaltige Energietechnik

Interdisziplinäres Forschungsmodul Batterie	WS/SS	6 LP	4 L	Schröder, Köhler, Kwade, wiss. Mitarbeiter
Methoden der Prozessmodellierung und -optimierung	WS	5 LP	2 VL/1 Ü	Schröder, Kretschmer, wiss. Mitarbeiter
Regenerative Energietechnik	SS	5 LP	2 VL/1 Ü	Schröder, div. Dozenten, wiss. Mitarbeiter
Stationäre Simulation und Optimierung thermischer Energieanlagen	SS	5 LP	2 VL/1 Ü	Zindler
Moderne Batterien: Von elektrochemischen Grundlagen über Materialien zu Charakterisierungsmethoden	WS	5 LP		Novák
Thermische Energieanlagen	WS	5 LP	2 VL/1 Ü	Zindler, wiss. Mitarbeiter
Wärmetechnik der Heizung und Klimatisierung	WS	5 LP	2 VL/1 Ü	Kühl, wiss. Mitarbeiter
Studienarbeit	WS/SS	15 LP		Schröder, wiss. Mitarbeiter
Abschlussarbeit Master	WS/SS	30 LP		Schröder, wiss. Mitarbeiter

7.2 Inhalte der Lehrveranstaltungen

Einführung in numerische Methoden für Ingenieure

In der Vorlesung werden mathematische Grundlagen aufgegriffen und praxisorientiert ergänzt. Verfügbare kommerzielle und frei erhältliche Software, die zur Lösung numerischer Aufgaben aus der Praxis des Ingenieurs bzw. der Ingenieurin geeignet sind, wird vorgestellt. Die Vorlesung umfasst die Themen:

- Grundlagen zur Modellierung mit Matlab
- Lösung linearer und nichtlinearer Gleichungssysteme
- Approximation von Funktionen und Daten
- Numerische Differentiation und Integration
- Integration gewöhnlicher Differentialgleichungen

Electrochemical Energy Engineering

- Einsatzzweck und Funktionsprinzip von Brennstoffzellen, Batterien und Elektrolyseuren
- Thermodynamik, Potential und Spannung elektrochemischer Zellen
- Elektrochemische Reaktionen und Reaktionskinetik
- Transportprozesse, Betrieb und Charakterisierung in elektrochemischen Zellen
- Aufbau und Typen von Brennstoffzellen und von Batterien
- Brennstoffzellensysteme

Grundlagen der Energietechnik (mit Labor)

- Energieformen und ihre technische Nutzung, Energieträger und -speicher, Bilanzierung von Energieprozessen
- Chemische und elektrochemische Energiewandlung (Verbrennung, Vergasung, Brennstoffzelle, Batterie)
- Thermische Energiewandlung (Wärmeübertragung, geothermische Energiewandlung, solarthermische Energiewandlung)
- Mechanische Energiewandlung (Kompression/Expansion, Nutzung von Wasser- und Windenergie)
- Physikalische Energiewandlung (Photovoltaik, Thermoelektrik, nukleare Energiewandlung)
- Energiesysteme und Kreisläufe (klassische und regenerativ betriebene Energiesysteme)

Interdisziplinäres Forschungsmodul Batterie

Das Forschungsmodul vermittelt ein tiefgehendes Verständnis von Prozessen im Chemie- und Energieingenieurwesen. Durch die Herstellung eigener Batteriezellen sowie die experimentelle Charakterisierung und Simulation dieser werden theoretische Hintergründe und die praktische Umsetzung behandelt. Das Modul gliedert sich in drei Teile: Am iPAT werden von den Studierenden Elektroden für Batteriezellen hergestellt, charakterisiert und anschließend zu Laborpouchzellen verbaut. Am InES werden diese Zellen experimentell charakterisiert und ausgewählte simulative Studien zu Lithium-Ionen Batterien durchgeführt. Am IFT werden simulative Studien zum generellen thermischen Verhalten von Lithium-Ionen Batterien durchgeführt und ausgewertet.

Methoden der Prozessmodellierung und -optimierung

- Einführung in die Prozessmodellierung
- Physikalisch-deterministische Prozessmodellierung
- Empirische Prozessmodellierung und Prozessidentifikation
- Stochastische Modellierung
- Prozessoptimierung

Moderne Batterien: Von elektrochemischen Grundlagen über Materialien zu Charakterisierungsmethoden Einführung

- Physikalisch-chemische Grundlagen (Elektrolyte, Stofftransport, Potential, Phasengrenzen, Kinetik, poröse Elektroden)
- Lithiumionen-Batterien: Materialien, Elektroden, Zellen, Alterungsmechanismen
- Elektrochemische Grundlagen der Charakterisierung, spezielle Charakterisierungsmethoden

Regelungstechnik

- Grundlagen der Regelungstechnik, grundlegende Eigenschaften dynamischer Systeme, Steuerung und Regelung
- Systembeschreibung mit mathematischen Modellen
- Mathematische Methoden zur Analyse linearer DGL, lineare und nichtlineare Systeme
- Darstellung im Zeit- und Frequenzbereich, Laplace-Transformation, Übertragungsfunktion, Impuls- und Sprungantwort, Frequenzgang
- Zustandsraumbeschreibung linearer und nichtlinearer Systeme, Regelkreis, Stabilität von Regelsystemen, Steuerbarkeit, Beobachtbarkeit, Identifizierbarkeit
- Verfahren für Reglerentwurf, simultane Reglerauslegung und Prozessoptimierung

Regenerative Energietechnik

- Überblick über Formen und Umfang regenerativer Energien
- Biomasse, Biogas und Biokraftstoffe
- Geothermie, Solarthermie sowie thermochemische und elektrochemische Energiewandlung
- Photovoltaik, Windenergieanlagen und Wasserkraftanlagen
- Elektrisches Energieversorgungssystem, Netzbetriebsführung und Herausforderungen

Stationäre Simulation und Optimierung thermischer Energieanlagen

- Thermische Energieanlagen, Stationäre und instationäre Modellierung der Komponenten
- Numerischen Methoden zur Lösung der Gleichungssysteme

Thermische Energieanlagen

- Entwicklung der Kraftwerke, Dampfkraftprozess, Dampferzeuger, Wärmetechnische Berechnung und Konstruktion von Dampferzeugern, Werkstoffe und Festigkeitsberechnung
- Wärmeübertragung und Strömungsverluste, Funktion und Auslegung der Heizflächen
- Sicherheitsventile, Gebläse, Luftvorwärmer, Abgasreinigung
- Strömungsmaschinen in thermischen Energieanlagen, Kombianlagen und Mehrstoffprozesse
- Betriebs- und Lastverhalten, Regelung und Steuerung

Wärmetechnik der Heizung und Klimatisierung

- Physiologische Grundlagen der Heizung und Klimatisierung
- Meteorologische und Wärmetechnische Grundlagen
- Heiztechnische Bauelemente und Systeme
- Heiztechnische Berechnungen
- Klimatechnische Bauelemente, Systeme und Berechnungen
- Integration regenerativer Energien und Wärmerückgewinnung

7.3 Arbeitsgebiete und Forschungen

Forschen am Puls der Zeit: Das InES liefert mit der Entwicklung und Anwendung von systemverfahrenstechnischen Methoden und Konzepten wichtige Beiträge in den vier Forschungsbereichen

Batterien, elektrochemische Verfahrenstechnik, Pharma-Systemverfahrenstechnik und Brennstoffzellen für die Luftfahrt. Ein besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Analyse und Optimierung (elektro)chemischer Prozesse unter Verwendung von Multi-Skalen-Simulationen. Hierzu liefern unsere Labore die nötige Datengrundlage und ergänzen unsere modellgestützte Forschung durch umfangliche Validierungsexperimente. Die Forschungsaktivitäten werden ab April 2021 unter der neuen Institutsleitung, Dr.-Ing. Daniel Schröder, fortgeführt und auf dem Gebiet der Optimierung von elektrochemischen Systemen und der eingesetzten Materialien durch in-situ / operando Versuche als auch der modellbasierten Analyse ausgebaut. Weiterhin wird das InES Forschungsprofil ab März 2021 durch Prof. Petr Novák im Bereich der Entwicklung und Anwendung fortschrittlicher Charakterisierungsmethoden für Batteriematerialien und -zellen ergänzt.

1. Batterien

In dieser Gruppe werden Lithium-Ionen-Batterien sowie Batterien der nächsten Generation auf Zellebene erforscht. Das Ziel ist, durch ein detailliertes Verständnis der physikalischen und chemischen Prozesse, zukünftige Batterien hinsichtlich ihrer Kapazität, Performance, Lebensdauer und Sicherheit zu optimieren. Durch Entwicklung und Anwendung mathematischer Modelle in Kombination mit dynamischen Messmethoden können Phänomene und fundamentale Ursachen verknüpft und somit Batterien wissenschaftsbasiert weiterentwickelt werden. Als Mitglied in der Battery LabFactory Braunschweig (BLB), wird ein aktiver Beitrag bei der Weiterentwicklung von Batterien und deren Produktion und Diagnose geleistet.

Charakterisierung dynamischer Prozesse

Wir erforschen und entwickeln dynamische Messmethoden für die Anwendung an Batterien. Zu diesen Methoden zählen Cyclovoltammetrie, elektrochemische Impedanzspektroskopie und nichtlineare Frequenzganganalyse. Die Anwendung dieser Methoden erlaubt es uns, Prozesse, wie z.B. Feststoffdiffusion, Ionentransport oder elektrochemische Reaktionen, bezüglich ihrer Zeitkonstanten und Nichtlinearität aufzuschlüsseln und somit getrennt voneinander zu analysieren. Dies wird genutzt um Änderung der Elektrodenstruktur oder Zellchemie durch die Produktion oder Alterung einzelnen Prozessen zuzuordnen. Durch diese nicht destruktiven Methoden ist eine schnelle, kostengünstige und präzise in-situ Charakterisierung und Zustandsbestimmung von Batteriezellen möglich.

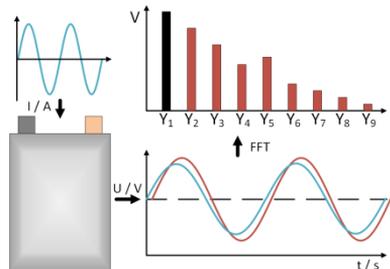


Abb. 7.1 Funktionsprinzip der nicht linearen Impedanzspektroskopie

Mathematische Modelle verknüpfen Phänomene mit physikalischen und chemischen Ursachen. In unseren Modellen werden Transportprozesse sowie chemische und elektrochemische Reaktionskinetik mathematisch abgebildet um die Simulation von Batterieperformance und Degradationsprozessen zu ermöglichen. Darüber hinaus erlaubt die Entwicklung innovativer Kopplungsalgorithmen, multiphysikalische (thermisch, elektrisch und chemisch) und multiskalare (atomistisch und makroskopisch) Simulationen durchzuführen. Auf Basis dieser neuen Modelle bilden wir physikalische Prozesse und deren komplexe Interaktion in Batterien mathematisch ab.

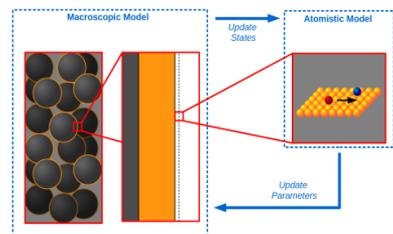


Abb. 7.2 Prinzipische Skizze Multiskalenmodellierung von Lithium-Ionen-Batterien

Während rein experimentelle Methoden oftmals keine eindeutige physikalische Erklärung erlauben, liefern rein theoretische Modelle oftmals keine quantitativen Aussagen für reale Systeme. Aus diesem Grund ist die Kombination von mathematischen Modellen und nicht destruktiven in situ Experimenten entscheidend um Batterien zu analysieren und zu optimieren. Mit dieser Vorgehensweise identifizieren wir Reaktionskinetik, Alterungsursachen sowie Produktions-einflüsse und quantifizieren deren dynamisches Verhalten. So ist es möglich, Ursache für Fehlfunktionen zu identifizieren oder das Zelldesign mathematisch zu optimieren.

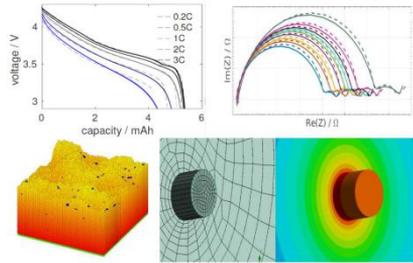


Abb. 7.3 Beispiele der simulationsbasierten Analyse von Batterien

2. Elektrochemische Verfahrenstechnik

Ein Kraftwerk für die Trage-/Handtasche? Mit Batterien, aber auch mit Brennstoffzellen ist dies möglich. Das InES erforscht intensiv, wie solche elektrochemischen Systeme aufzubauen sind, damit sie optimale Wirkungsgrade und Robustheit vorweisen.

Untersuchung der Reaktionskinetik an Elektroden

Die Reaktionskinetik an Elektroden ist oft der Zentrale Aspekt eines elektrochemischen Prozesses. Um diese Prozesse quantitativ beschreiben zu können ist eine geeignete Beschreibung der Kinetik und eine Bestimmung von Geschwindigkeitskonstanten essenziell. Dabei gehen wir über einfache Tafel- und Butler-Volmer Kinetik hinaus und betrachten auch die Bedeckung der Oberflächen mit Intermediaten. Ein besonderer Schwerpunkt liegt in der Untersuchung von technischen, porösen Elektroden, wie beispielsweise Gasdiffusionselektroden, die einen hohen Grad an Komplexität aufweisen.



Abb. 7.4 Versuchsaufbau für elektrochemische Messungen

Online-Diagnostik und dynamische Analysemethoden

Mit dynamischen Untersuchungsmethoden und Online-Diagnostik lassen sich wertvolle Informationen gewinnen. Mit stationären Methoden können oftmals unterschiedliche, sich überlagernde Prozesse nicht voneinander differenziert werden. Dynamische Analysen können anhand der unterschiedlichen Zeitkonstanten solche Prozesse differenzieren. Die getrennte Betrachtung erlaubt es, die limitierenden Prozesse zu identifizieren und Parameter besser zu bestimmen. Wir setzen dabei auf maßgeschneiderte Experimente in Kombination mit modellbasierter Analyse. Unter anderem verwenden wir elektrochemische Impedanzspektroskopie, Total Harmonic Distortion, Cyclovoltammetrie und differentielle elektrochemische Massenspektrometrie.



Abb. 7.5 Teststand eines Brennstoffzellenkatalysators

Wissensbasierte Prozessoptimierung

Auf Basis von quantitativen Modellen untersuchen wir systematisch, welche Limitationen elektrochemischer Prozesse vorliegen. Die experimentell validierte Reaktionskinetik und dynamische Analysen bilden die Grundlage für physikalisch fundierte Modelle von technischen Elektroden. Wo möglich, wenden wir systematische mathematische Optimierungsverfahren an, um gezielte Verbesserungen zu entwickeln. An anderen Stellen nutzen wir Szenarienanalysen um günstige Betriebsbereiche und Prozessdesigns zu identifizieren.

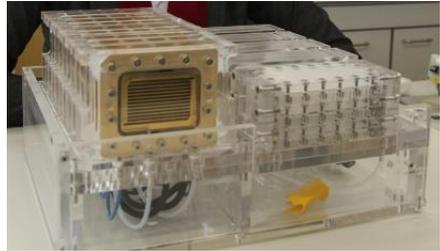


Abb. 7.6 Miniatur-Brennstoffzellensystem

3. Pharma-Systemverfahrenstechnik

Die pharmazeutische Industrie steht vor einer Technologierevolution. Herkömmliche Pharmaprodukte werden batch-weise (diskontinuierlich) produziert. Die batch-weise Produktion der Pharmazeutika ist zeitaufwendig, kostenintensiv, mit hohen Verlusten verbunden und führt zu einer schwankenden Produktqualität. Industrie und Forschung arbeiten deshalb an kontinuierlichen Produktionsprozessen. Gleichzeitig soll so die Produktionszeit sinken, die Qualität maximiert und Kosten reduziert werden.

So sollen die in den Arzneimitteln enthaltenen aktiven pharmazeutischen Wirkstoffe (APIs) mittels kontinuierlicher Synthese-Prozesse nachhaltig und kostengünstig hergestellt werden. Um dies zu erreichen, bedarf es einer optimalen Prozessauslegung. Wichtige Werkzeuge sind hierbei die modellgestützte Prozessanalyse und die intelligente Prozessüberwachung basierend auf Data-Mining-Methoden und der Prognosemodellierung.

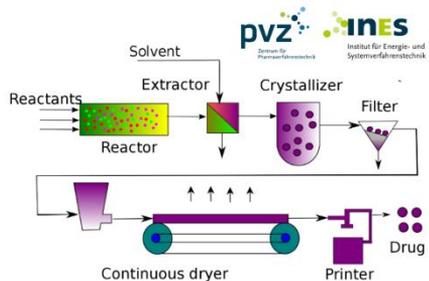


Abb. 7.7 Kontinuierliche Medikamenten-Herstellung in der Pharmaindustrie (CPM)

Am InES verwenden wir hierzu modellbasierte Ansätze und überprüfen die daraus resultierenden Simulationsergebnisse mit experimentellen Daten aus unserem Labor am Zentrum für Pharmaverfahrenstechnik (PVZ). Mit den modellbasierten Methoden und der Validierung im Labor stellen wir sicher, dass Produktionsschwankungen und deren Ursachen aufgedeckt und verstanden werden können. Im Bereich der Lehre bietet das InES in diesem Zusammenhang die Vorlesung Modellkalibrierung und optimale Versuchsplanung (MoVe) an.

4. Brennstoffzellen für die Luftfahrt

Am InES arbeiten wir auch mit Wasserstoff-Brennstoffzellen und -systemen, um die Makro-, Meso-, und Mikroprozesse und ihre Wechselwirkungen numerisch und experimentell zu interpretieren. Darüber hinaus führen wir die wissensbasierte Steuerung und Integration dieser Prozesse für Systeme durch. All diese Aufgaben sind bezeichnend für unsere Nachwuchsforschungsgruppe "Brennstoffzellen für die Luftfahrt".

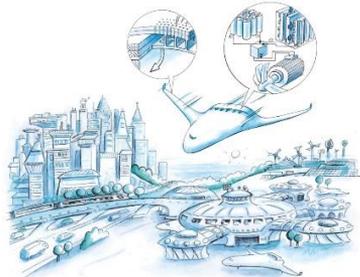


Abb. 7.8 Cluster of Excellence SE²A – Sustainable and Energy-Efficient Aviation

Als Mitglied des Exzellenzclusters Sustainable and Energy Efficient Aviation (SE²A) spielt die Gruppe eine aktive Rolle bei der Entwicklung von Brennstoffzellen für eine saubere Energieumwandlung an Bord von zukünftigen Passagierflugzeugen. Wir streben drastische Verbesserungen in Bezug auf ihre spezifische Leistung, Zuverlässigkeit, Lebensdauer sowie Flexibilität im Betrieb und Einbettung in die Flugzeugstruktur an. Hierbei greifen wir auf Methoden wie Robustes Design, Multiphysikalische Modellierung, Multiskalenanalyse und experimentelle Untersuchungen zurück und entwickeln sie weiter, um die strengen Anforderungen in der Luftfahrt zu erfüllen. Mit unseren Methoden und Entdeckungen wollen wir die Popularisierung der Brennstoffzelle auch in anderen Verkehrssektoren (z.B. im Straßenverkehr) voranbringen und einen Beitrag zum Wasserstoffzeitalter liefern.

Robustes Design

Um die Zuverlässigkeit und Lebensdauer von Brennstoffzellensystemen zu erhöhen, folgen wir dem Top-down-Prinzip. Wir forschen in den vier Bereichen Komponentendesign, Prozessintegration, Online-Diagnose und Fehlerbehandlung. Zu generell angewendeten Prinzipien gehören u.a. die Identifizierung und Isolation von Komponenten- und Systemredundanzen, Fehlermöglichkeits- und Fehlereinflussanalysen (FMEA) und Fehlerbaumanalysen (FTA). Darüber hinaus sehen wir auch das Potenzial analytischer Methoden aus anderen Fachbereichen, z.B. im Bereich Big Data, und werden sie für unsere Ziele verwenden.

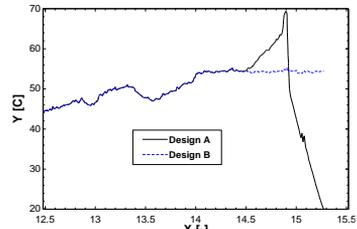


Abb. 7.9 Robust Design

Multiphysikalische Modellierung und Multiskalenanalyse

Eine detaillierte Modellierung und Analyse sind der Schlüssel für sorgfältige Interpretationen. Unsere Forschungsinteressen liegen hauptsächlich im Bereich des Thermofluid-Managements, der Degradationsmechanismen und der Ausfallursachen von Brennstoffzellensystemen. Einerseits erstellen wir hierfür anspruchsvolle Modelle, in denen sich disziplinübergreifend Thermodynamik, Strömungsmechanik und Elektrochemie begegnen, und uns als leistungsstarke Werkzeuge dienen. Andererseits zeigen uns unsere industriellen

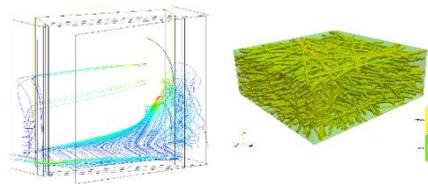


Abb. 7.10 Multiphysics multiscale modeling

Erfahrungen (aus der Zusammenarbeit mit z.B. Ballard Power Systems Europe A/S), dass die Einfachheit eines Modells ebenso wichtig und mächtig ist, wie seine Tiefe, um der Ursache eines Phänomens auf den Grund zu gehen. Darüber hinaus liegen die Ursachen oft außerhalb des untersuchten Gegenstands und in einer anderen Skalierungsebene vor. Daher ist es von entscheidender Bedeutung stets aufgeschlossen und bereit zu sein, über den Tellerrand zu blicken. Mit dieser Denkweise strebt unsere Gruppe an, sowohl eine akademische Instanz z.B. im Bereich der Multiphasen-CFD-Modellierung zu werden, als auch industriellen Partnern bei der Verbesserung ihrer Produkte behilflich zu sein.

Experimentelle Validierung

Eine experimentelle Untersuchung ist die Grundlage für die oben genannte wissenschaftliche Modellierung, Analyse und Interpretation. Unterstützt vom InES, wendet die Gruppe elektrochemische Impedanzspektroskopie (EIS) und nichtlineare Frequenzganganalyse (NFRA) an, um die Auswirkungen von stationären und dynamischen Operationen auf Brennstoffzellen zu verstehen. Weiterhin werden neuartige Konzepte für das Thermofluid-Management erprobt. Darüber hinaus werden

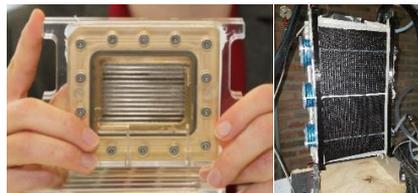


Abb. 7.11 Experimental Validation

Phasenwechsel und beteiligte Spezies während chemischer Reaktionen betrachtet und ihre Einflüsse in Hinsicht auf unterschiedliche Skalierungsebenen und Zeitspannen untersucht.

7.4 Zusammenarbeit und Kooperation

Zusammenarbeit mit Universitäten und Forschungseinrichtungen im In- und Ausland

- Forschungszentrum Jülich GmbH, Jülich, Deutschland
- Fraunhofer-Institut für Algorithmen und Wissenschaftliches Rechnen SCAI, Sankt Augustin, Deutschland
- Helmholtz-Institut Erlangen-Nürnberg (HI ERN) für Erneuerbare Energien, Erlangen, Deutschland
- Helmholtz-Institut, Ulm, Deutschland
- Helmholtz-Zentrum Berlin, Deutschland
- Identification and Control of Dynamic Systems Laboratory, University of Pavia, Italy
- Indian Institute of Technology Kharagpur, Kharagpur, India
- Institut für Chemische und Elektrochemische Verfahrenstechnik, TU Clausthal, Deutschland
- Institut für Elektrische Energiesysteme, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Deutschland
- Institute of Chemistry of Poitiers: Materials and Natural Resources (IC2MP), Université de Poitiers, Frankreich
- Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, Deutschland
- Korea Institute of Energy Research, Daejeon, Südkorea
- Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, United States of America
- Max-Planck Institut für Dynamik Komplexer Technischer Systeme, Magdeburg, Deutschland
- Newcastle University, Newcastle upon Tyne, United Kingdom
- Physikalisch-Chemisches Institut, Justus-Liebig-Universität Gießen, Deutschland
- Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig, Deutschland
- Ruhr-Universität Bochum, Deutschland
- Texas A&M University, Houston, United States of America
- Techion - Israel Institute of Technology, Haifa, Israel
- University of Rhode Island, Kingston, United States of America

Zusammenarbeit mit Industrieunternehmen im In- und Ausland

- BMW AG
- BS Energy
- EI-Cell GmbH
- enco Energie- und Verfahrens-Consult GmbH
- Robert Bosch GmbH
- SOLVIS GmbH
- TLK-Thermo GmbH
- Veolia Environnement S.A.
- VDI Braunschweiger Bezirksverein e.V.
- Volkswagen AG

7.5 Ausstattung des Instituts für Energie- und Systemverfahrenstechnik

Prüfstände für

- Batterien
- Brennstoffzellen

Geräte

- Differentielle Elektrochemische Massenspektroskopie
- Leitfähigkeits-Messgerät
- Elektrochemische Impedanzspektroskopie
- Potentiostaten
- Gaschromatographie (GC)
- Reinstatmosphärenbox/"Glovebox"
- Hochleistungsflüssigkeitschromatographie (UHPLC) Kalorimeter-System
- Rotierende Scheibenelektrode (RDE)
- UV/Vis-Spektrometer mit Durchflussmesszelle
- Tropfenkonturanalyse
- React-IR Spektrometer
- Viskosimeter
- Klimakammern

7.6 Themenbeispiele für Studien-, Bachelor- oder Masterarbeiten

Batterien

- Modellierung und Simulation von Metall-Luft-Batterien
- Modellierung der Lithium-Ionen Batterie im Kontext der Fertigung
- Untersuchung der SEI-Bildung an Lithium-Metall Anoden mittels kMC-Simulationen

Elektrochemische Verfahrenstechnik

- Energieeffiziente Wasseraufbereitung mittels Capacitive Deionization (CDI)
- Experimentelle oder simulative Untersuchung von Bio-Brennstoffzellen
- Wasserstoff – die Produktion aus erneuerbaren Ressourcen!

Pharma-Systemverfahrenstechnik

- Pharma-Lab 4.0
- Pflanzlicher Wirkstoff gegen Malaria
- Digitaler Zwilling: Data Mining und Machine Learning in der Verfahrenstechnik



Institut für Flugantriebe
und Strömungsmaschinen

8 Institut für Flugantriebe und Strömungsmaschinen

Technische Universität
Braunschweig
Prof. Dr.-Ing. Jens Friedrichs

Hermann-Blenk-Str. 37
38108 Braunschweig
Tel.: (0531) 391-94201
Fax: (0531) 391-94222
info@ifas.tu-bs.de
www.ifas.tu-bs.de

Institutsleitung:	Prof. Dr.-Ing. Jens Friedrichs	391-94200	
Emeritus	Prof. Dr.-Ing. a. D. Günter Kosyna	391-94201	
Lehrbeauftragte:	Dr.-Ing. Horst Saathoff	391-94201	
Sekretariat:	Annette Woyde	391-94201	
	Karina Beule	391-94202	
	Katrin Marx	391-94217	
Technische Mitarbeiter:	Hafize Ayhan	391-94224	
	Christoph Becker	391-94224	
Wissenschaftliche Mitarbeiter:			
Benjamin, Legin	391-94208	Kirsch, Bastian	391-94239
Benjamin, Leroy	391-94221	Kudeti, Siddharta	391-94233
Bien, Maximilian	391-94232	Lück, Sebastian	391-94241
Bode, Christoph	391-94232	Oldeweme, Jonas	391-94212
Brunow, Patrick	391-94243	Schwarz, Heiko	391-94218
Diedrich, Marco	391-94237	Seidler, Marcel	391-94209
Eggers, Torben	391-94214	Sembowski, Julia	391-94215
Frantzheld, Philip	391-94220	Spuhler, Tobias	391-94219
Göing, Jan	391-94207	Tolksdorf, Vera	391-94240
Grubert, Jonas	391-94205	Voigt, Jonas	391-94216
Harjes, Lennart	391-94230	Witte, Hauke	391-94229
Kessler, Daniel	391-94210	Wittenberg, Andreas	391-94213
Kenull, Thomas	391-94206	Wittmann, Tim	391-94242
Studienfachberatung:			
	Sebastian Lück	391-94241	

8.1 Module für Bachelor- und Masterstudiengänge

Module für Bachelorstudiengänge Maschinenbau, Bio-, Chemie-, Pharma- und Bioingenieurwesen

Grundlagen der Strömungsmaschinen	WS	5LP	2 VL/1 Ü	Friedrichs
Grundlagen der Strömungsmaschinen (mit Labor)	WS	7LP	2 VL/1 Ü/ 2 L	Friedrichs
Grundlagen der Umweltschutztechnik	SS	5LP	2 VL/1 Ü	Friedrichs, Kwade
Regelungstechnik-Grundlagen	SS	5LP	2 VL/1 Ü	Friedrichs, Schenkendorf
Bachelorarbeiten	WS/ SS	14LP		Friedrichs, wiss. Mitarbeiter

Module für Masterstudiengänge Maschinenbau, Bio-, Chemie-, Pharma- und Bioingenieurwesen

Hydraulische Strömungsmaschinen	WS	5LP	2 VL/1 Ü	Friedrichs, Schwarz
Hydraulische Strömungsmaschinen (mit kleinem Labor)	WS	7LP	2 VL/1 U/ 1 L	Friedrichs, Schwarz
Thermische Strömungsmaschinen / Gas- und Dampfturbinen	SS	5LP	2 VL/1 Ü	Saathoff
Messtechnische Methoden an Strömungsmaschinen	WS	5LP	2 VL/1 Ü	Friedrichs, Oldewerne
Messtechnische Methoden an Strömungsmaschinen (mit kleinem Labor)	WS/ SS	7LP	2 VL/1 Ü/ 1L	Friedrichs, Oldewerne
Regenerative Energietechnik	SS	5LP	2 VL/1 Ü	Friedrichs, Schwarz
Numerische Simulation (CFD)	WS	5LP	2 VL/1 Ü	Friedrichs, Bode
Systeme der Windenergieanlagen	WS	5LP	2 VL/1 Ü	Friedrichs, Schwarz
Studienarbeiten	WS/ SS	17LP		Friedrichs, wiss. Mitarbeiter
Masterarbeiten	WS/ SS	30LP		Friedrichs, wiss. Mitarbeiter

8.2 Inhalte der Lehrveranstaltungen

Grundlagen der Strömungsmaschinen (WS 2V 1Ü) 5LP mit Labor (WS 2V 1Ü 2L) 7LP

- Allgemeine strömungstechnische Grundlagen
- Wirkungsweise und betriebliches Verhalten der Strömungsmaschinen
- Besonderheiten hydraulischer Maschinen
- Thermische Strömungsmaschinen
- Hydrodynamische Wandler und Sonderbauarten von Pumpen

Labor:

Anhand ausgewählter Beispiele werden die in der Vorlesung erlernten theoretischen Grundlagen praktisch angewendet und die in den Versuchen angeführten Aufgabenstellungen selbstständig bearbeitet und diskutiert.

Grundlagen der Umweltschutztechnik (SS 2V 1Ü) 5LP

- Feste, Flüssige, gasförmige Schadstoffe
- Messmethoden für verschiedene Schadstoffe
- Schadstoffe und Schadstoffausbreitung in der Atmosphäre
- Verbrennungsschadstoffe
- Lärm- und Lärmschutz
- Technikbewertung & rechtliche Aspekte
- Auswahl von Messgeräten
- Auswertung von Messungen

Regelungstechnik – Grundlagen (ehem. ILR) (SS 2V 1Ü) 5LP

- Methoden der klassischen Regelungstechnik
- Grundlegende Eigenschaften dynamischer Systeme
- Mathematische Methoden zur Analyse linearer Differentialgleichungen
- Regelkreis, Stabilität linearer Regelsysteme
- Reglerentwurf (Wurzelortskurve, Bode-Diagramm, Nichols-Verfahren).

Hydraulische Strömungsmaschinen (WS 2V 1Ü) 5LP mit Labor (WS 2V 1Ü 1L) 7LP

- Entwurf von Kreiselpumpen
- Erfassung von Kavitationserscheinungen
- Betrachtung von mechanischen Reaktionen
- Ausführungsformen von Kreiselpumpen
- Betrachtung von Dichtungssystemen

Labor:

Im Labor werden die Besonderheiten im Betrieb theoretisch und praktisch erarbeitet sowie die gemessenen Kenngrößen mit den Möglichkeiten der Vorausberechnung verglichen. Gleichzeitig werden typische Verfahren zur experimentellen Erfassung von Größen an hydraulischen Strömungsmaschinen verwendet.

Thermische Strömungsmaschinen / Gas- und Dampfturbinen (SS 2V 1Ü) 5LP

- Historische Entwicklung der Gas- und Dampfturbinen
- Typen von Gas- und Dampfturbinen; Gas- und Dampfturbinenkraftwerke
- Module von Gas- und Dampfturbinen (Verdichter, Brennkammer, Turbine)
- Instationäre Strömungsvorgänge
- Konstruktion und Werkstoffauswahl
- Ausgewählte Kapitel der thermischen Strömungsmaschinen
- Betriebsverhalten von Gas- und Dampfturbinen

Messtechnische Methoden an Strömungsmaschinen (WS/SS 2V 1Ü 1L) 5LP mit Labor 7LP

- Analoge und digitale Signale – deterministische und stochastische Signale
- statistische Eigenschaften von Messsignalen,
- Fouriertransformation, Wavelettransformation
- Messfehler und Kalibrierung, Fehlerfortpflanzung
- Messgeräte und Messverfahren – Messketten, Mehrkanalanlagen, Telemetrie
- Normung und Richtlinien – Abnahmeversuche

Labor:

Anhand ausgewählter Beispiele werden die in der Vorlesung erlernten theoretischen Grundlagen praktisch angewendet und die in den Versuchen angeführten Aufgabenstellungen selbstständig bearbeitet und diskutiert.

Regenerative Energietechnik (WS 2VL 1Ü) 5LP

- Überblick über Formen und Umfang regenerativer Energien
- Solarthermische Kraftwerke
- Biomasse, Geothermie, Biogas
- Thermische Solarenergie für Raumheizung und Warmwasserbereitung
- Photovoltaik, Windenergieanlagen, Wasserkraftanlagen

Numerische Simulation (CFD) (WS 2VL 1Ü) 5LP

- System der Bilanzgleichungen der Fluidodynamik
- Grundlagen der Turbulenzmodellierung
- Grundlagen der Berechnung von Zweiphasenströmungen
- Diskretisierung und numerische Lösungsverfahren, Finite-Volumenmethode
- Methoden zur Lösung nichtlinearer algebraischer Gleichungssysteme
- Konvergenz und Stabilität der Diskretisierungsschemata
- Beurteilung und Validierung der Ergebnisse
- Übersicht über kommerzielle CFD-Programmsysteme
- Simulationsübungen mit FLUENT

Systeme der Windenergieanlagen (WS 2VL 1Ü) 5LP

- Historische Entwicklung und strömungsmechanische Grundlagen
- Energiewandlung, Schnelllaufzahl, Leistungszahl, Modellgesetze
- Widerstandsläufer – Auftriebsläufer
- Konstruktiver Aufbau
- Auslegungsverfahren, Profiltheorie, Profilauswahl
- Steuerung und Regelung
- Anlagenkonzepte (netz- und windgeführte Anlagen)
- Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit
- Windparks onshore –offshore
- Berechnung der Leistung einer WEA
- Auslegung einer WEA für verschiedene Windangebote

8.3 Arbeitsgebiete und Forschungen

Die Forschungsschwerpunkte des Instituts liegen im Bereich der Energietechnik auf dem Gebiet der Kreiselpumpen und der Ventilatoren. Wichtige Themenkreise sind derzeit das Betriebsverhalten von Axialmaschinen im Teillastbereich, Optimierung von Kreiselpumpen, Verfahren zur Schadensfrüherkennung sowie neuartige Dichtungskonzepte für thermische Strömungsmaschinen. Im Einzelnen werden derzeit folgende Forschungsvorhaben bearbeitet:

1. Axialventilatoren und –verdichter

Optimierung von Verdichter-Beschaufelungen durch 3D-Schaufelentwurf:

Das Institut für Strömungsmechanik und das Institut für Flugantriebe und Strömungsmaschinen arbeiten gemeinsam im Rahmen des EU-Forschungsvorhabens AdComB - **Advanced 3D Compressor Blade Design** - an der Verbesserung von Flugtriebwerks-Verdichter-Beschaufelungen. Hierzu werden an einem 1,5-stufigen Niedergeschwindigkeitsverdichter, dessen Beschaufelung repräsentativ für eine mittlere Stufe eines modernen Flugtriebwerk-Verdichters ist, experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Diese Untersuchungen umfassen den Einsatz modernster Messeinrichtungen. Folgende Messtechniken kommen u.a. zum Einsatz:

- stationäre und instationäre Messdatenerfassung
- Telemetrie
- Heissfilmmesstechnik
- Visualisierungstechniken

Unter Berücksichtigung der experimentellen Ergebnisse werden im weiteren Verlauf des Vorhabens weitere Verdichterstufen entworfen, wobei im Gegensatz zum konventionellen Entwurf der ursprünglichen Stufe 3D-Eigenschaften wie „Pfeilung“ und „V-Stellung“ angewendet werden, um die Stufendruckerrhöhung und den Wirkungsgrad signifikant zu verbessern.

Darüber hinaus dienen die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen der Validierung numerischer Strömungsberechnungen, die am Institut für Strömungsmechanik mit Hilfe eines CFD-Codes gewonnen wurden.

Auslegung von Niederdruck – Axialventilatoren

Im Rahmen eines AiF-Projektes mit der Forschungseinrichtung für Lüftungs- und Trocknungstechnik werden am Institut für Flugantriebe und Strömungsmaschinen Untersuchungen zum Druckrückgewinn an Niederdruck – Axialventilatoren durchgeführt. Obwohl diese Ventilatoren in sehr großen Stückzahlen von der Industrie gefertigt werden, gibt es für diese Ventilatoren bislang noch keine zuverlässigen Aussagen wie ein Druckrückgewinn in der Abströmung des Ventilators ohne Einsatz eines Leitrades erfolgen kann. Im Rahmen des Vorhabens sollen nun die einflussnehmenden Faktoren erarbeitet und experimentell untersucht werden. Hierzu besitzt das IFAS einen eigenen Prüfstand an dem Ventilatoren bis zu einem Durchmesser von 700 mm Ventilatoren untersucht werden können.

Neben Kontrollmessungen an Ventilatoren aus der Industrie werden auch selbst entworfene Ventilatoren mit



Abb 8.1 Axialventilator mit Pfeilung

verschiedensten Messtechniken umfangreich untersucht. Hierzu werden neben Sondenmessungen auch Hitzdraht- und PIV-Messungen durchgeführt.

Neben der Beurteilung des Strömungsverhaltens werden die Ventilatoren auch hinsichtlich ihrer Schallemissionen bewertet und Entwurfsverfahren zur Reduzierung der Schallemission entwickelt sowie experimentell validiert.

2. Propulsor-Prüfstand

Reduktion der triebwerksbedingten Schadstoffemission

Der Propulsor-Prüfstand des IFAS ist eine Testumgebung zur Untersuchung zukünftiger High-Bypass Flugantriebe. Er bietet die Möglichkeit, den kalten Kreis eines Triebwerkes in Form eines elektrisch angetriebenen Modells im Maßstab von ca. 1:3 zu untersuchen.

Die Bezeichnung „Propulsor“ steht dabei für die schuberzeugende Komponente eines Triebwerkes.

Für Antriebe mit sehr großen Bypass-Verhältnissen ist dieser

sog. Propulsor der kalte Kreislauf, d.h. der Teil des geförderten Luftmassenstromes, der nicht an der Verbrennung im Kerntriebwerk teilnimmt. Generell gilt, dass mit zunehmendem Bypass-Verhältnis das Druckverhältnis über den Fan abnimmt, sodass insbesondere im Off-Design Betrieb, also im Wesentlichen Start und Landung, neue Technologien erforderlich sind um einerseits die Vorteile des höheren Bypass-Verhältnisses zu nutzen und andererseits keine Einbußen bei der Betriebsstabilität entstehen.

Zur Untersuchung dieser kritischen Off-Design Betriebszustände können in der Teststrecke des Prüfstandes Zustände wie Seitenwind und Anstellwinkel generiert werden um das Verhalten zukünftiger Propulsoren unter diesen Bedingungen zu testen.

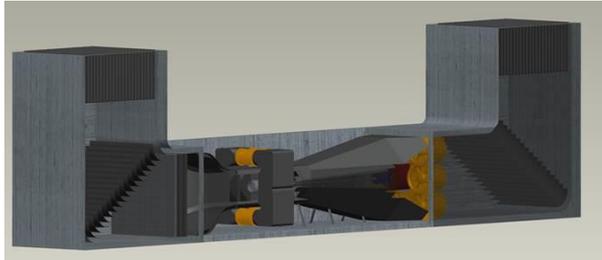


Abb. 8.2 CAD-Modell des Prüfstands

3. Forschungstriebwerk V2500-A1

Das V2500 ist ein erprobtes und bewährtes Triebwerk, das für den Einsatz der A320 Baureihe entwickelt wurde. Bei dem neuen Versuchsträger handelt es sich um ein voll flugfähiges, ziviles Flugtriebwerk vom Typ V2500-A1, das seit seiner letzten Überholung etwa 13.000 Flugstunden absolviert hat. Im Mittelpunkt werden in den ersten Messkampagnen die Akustik des Kerntriebwerks und damit der Test neuartiger Dämmmaterialien stehen.



Abb. 8.3 Forschungstriebwerk V2500-A1

4. Kavitation in Kreiselpumpen

Beim Einsatz von Kreiselpumpen muss die Kavitation auf ein noch zu tolerierendes Maß beschränkt werden, um Schädigungen und vorzeitige Ausfälle zu vermeiden. Als einfach anwendbares Kriterium für das zulässige Ausmaß der Kavitation wird in der Praxis vielfach der kavitationsbedingte Förderhöhenabfall angewendet. Nachteilig bei diesem Kriterium ist, dass hiermit der sehr komplexe Einfluss der Kavitation auf die Förderhöhe sowie die Auswirkungen der heterogenen Strömungsstrukturen bei Kavitation nur unvollkommen beschrieben werden können. Ziel dieses Forschungsvorhabens ist ein besseres Verständnis des Einflusses der Kavitationsvorgänge auf das Förderverhalten von Kreiselpumpen. Im Mittelpunkt steht eine neuartige Methode zur Untersuchung der instationären Schaufeldruckverläufe im Verbund mit simultan durchgeführter videogestützter optischer Beurteilung des Kavitationsbildes. Durchgeführt werden die Untersuchungen an mehreren Kreiselpumpenlaufrädern radialer und halbaxialer Bauart. Zur Analyse des Ablaufs der Kavitation kommen dabei neben instationären Druckmessungen auch Hochgeschwindigkeitsaufnahmen zum Einsatz. Darüber hinaus erfolgt mit dem institutseigenen PIV-System (Particle Image Velocimetry) die Untersuchung der kavitierenden Laufradströmung.

5. Optimierung von Fluidenergiemaschinen durch den Einsatz von CFD

Heutzutage werden Pumpen und Kompressoren nicht mehr nach dem Stromlinienverfahren entworfen, angefangen bei den Eingangsparametern bis zum Prototyp, sondern die Entwicklung findet in einem iterativen Prozess statt. Die kontinuierliche Verbesserung der Entwurfs- und Bautechniken für diese Maschinen ermöglichen es immer höhere Wirkungsgrade zu erreichen. Ein besonderes Augenmerk liegt dabei darauf die Grenzen der aktuell verwendeten Methoden zu überwinden. Hierzu werden z.B. automatische Optimierungssysteme verwendet die den Design-Prozess durch den Einsatz von numerischen Simulationen (CFD) überprüfen und weiter verbessern.

Ein derzeitiges Forschungsgebiet des IFAS ist die Entwicklung eines eigenen Design-Optimierer-Codes, welcher in der Lage sein soll, das gesamte Design-Verfahren zu koordinieren, ausgehend von den Entwurfsparametern bis zur fertigen Geometrie. Die Geometrie wird anschließend simuliert und auf ihre Eignung hin überprüft. Anschließend wird die Geometrie in einem iterativen Prozess weiter optimiert.

6. Untersuchung und Optimierung von Spaltdichtungen für den Einsatz in Strömungsmaschinen

Im Streben nach weiterer Wirkungsgradsteigerung gilt es, die Leckageverluste in den Spaltdichtungen von Strömungsmaschinen weiter zu minimieren. Ein vielversprechender Ansatz wird dabei in der Verwendung von Bürstendichtungen oder Pressure Activated Leaf Seals gesehen, welche bedingt durch den radial adaptiven Aufbau einer Rotorextrizität folgen können und minimal kleine Spaltweiten zulassen. Bürstendichtungen haben hierzu ihre grundsätzliche Eignung bereits bewiesen und werden, im Bereich der Dampfturbine, zur Abdichtungen von Wellendurchführungen, des Schaufelpfades oder bei Turbinen kleinerer Leistungsklasse auch zur Abdichtung des Schubausgleichkolbens verwendet. Aktuell stehen diese Untersuchungen für die Pressure Activated Leaf Seals noch aus. Im Fokus der Entwicklung steht neben der Prüfung der Langzeitstandfestigkeit bei hohen Drücken auch die Eignung der Dichtungen in Bezug auf eine flexible Betriebsweise moderner Kraftwerke. Hierfür betreibt das IFAS in Zusammenarbeit mit der Industrie einen weitgehend automatisierten Heißdampf-Dichtungsprüfstand, welcher mit Heißdampf aus dem Heizkraftwerk-Mitte in Braunschweig versorgt wird. Neben der realitätsnahen Untersuchung von Dichtungen im Heizkraftwerk-Mitte werden die Dichtungen zur Bestimmung der individuellen Dichtungseigenschaften mit einer Mess- und Prüfeinrichtung im Institut mit Druckluft vermessen, analysiert und kostengünstig für die Versuche im Kraftwerk vorausgewählt.

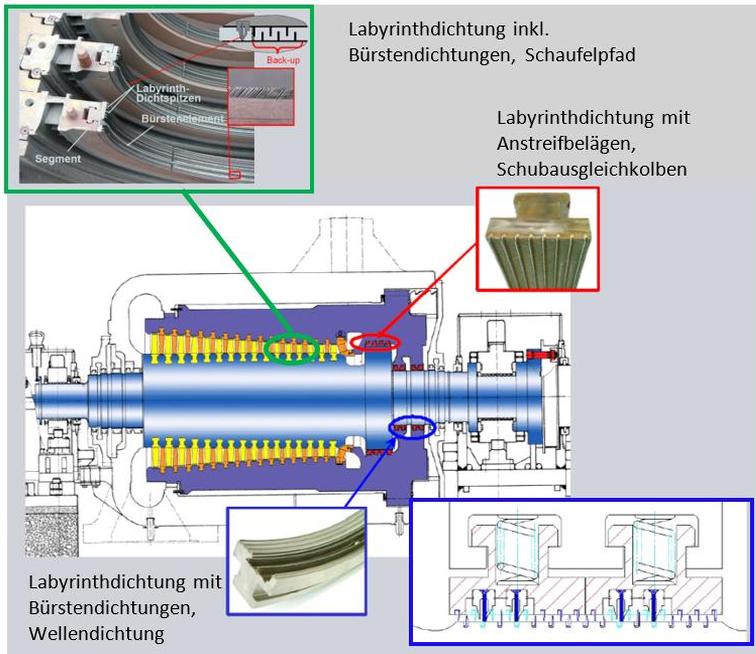


Abb. 8.4 Bürstendichtungen in einer Turbomaschine

7. Numerische Strömungsberechnung

Mit Hilfe des kommerziellen Softwarepaketes ANSYS-CFX® werden an verschiedenen Geometrien wie Triebwerkskomponenten, Versuchsverdichtern, Pumpenlaufrädern und Ventilatorstufen Strömungsberechnungen durchgeführt. Im Bereich der Flugantriebe ist das Ziel, existierende Verschleißphänomene sowie neue Antriebskonzepte und Komponententechnologien hinsichtlich ihres Wirkungsgradeinflusses zu untersuchen.

Über die kommerzielle Vernetzungssoftware ICEM-CFD® werden dazu vorzugsweise blockstrukturierte Netze erstellt, die einerseits eine hohe Berechnungsqualität ermöglichen und andererseits die vorhandenen Hardware-Ressourcen effizient nutzen. Nach der Validierung von Simulationen über Messergebnisse ermittelt mit Prüfständen ist es unter anderem möglich, Parameterstudien oder Vorausberechnungen für neue Geometrien durchzuführen, bei denen Experimente nicht möglich oder sehr zeitintensiv sind.

Für den Neuentwurf und die Beurteilung von Laufrädern kommt darüber hinaus das kommerzielle Softwarepaket ANSYS Blade-Modeler® zum Einsatz. Dieses ermöglicht eine weitgehend automatisierte Gittergenerierung direkt aus dem Entwurfsprogramm, so dass die Einflüsse von Änderungen im Laufraddesign auf die Strömung schnell untersucht werden können.

8. Messtechnik an Strömungsmaschinen

Weiterentwicklung von Messverfahren zur zeitlich bzw. örtlich aufgelösten Messung der Druck- und Geschwindigkeitsverteilungen in Strömungsmaschinen. Hierzu werden mit Sub-miniatur-Druckaufnehmern bestückte Sonden und die erforderlichen Auswerteverfahren entwickelt. Mittels Telemetrieanlagen werden Signale aus rotierenden Systemen berührungslos übertragen, damit lassen sich auch Vorgänge, die bezogen auf das rotierende System instationär sind, detailliert untersuchen. Mit Hitzdraht-Messsystemen können insbesondere auch in Wandnähe, wo herkömmliche Sonden aufgrund ihrer Größe ungeeignet sind, Messungen instationärer Geschwindigkeiten vorgenommen werden.

Particle Image Velocimetry (PIV) erlaubt die zeitgleiche und berührungslose Messung von Geschwindigkeitsfeldern. Mit einer Kamera lassen sich zwei Geschwindigkeitskomponenten messen (2C-2D), mit stereoskopischer Anordnung von zwei Kameras lassen sich alle 3 Komponenten messen (3C-2D).

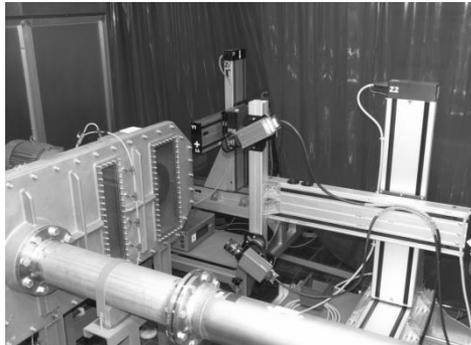


Abb. 8.5 PIV-Messung an einer Pumpe

9. Simulation elektrischer Luftverdichter für die Anwendung in Brennstoffzellensystemen

Im Rahmen des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff und Brennstoffzelle wird das Betriebsverhalten elektrischer Luftverdichter untersucht. Für zukünftige Anwendungen im Automotive- und Luftfahrtbereich werden sie zur Luftversorgung des Brennstoffzellenstapels mit anschließender Energierückgewinnung aus dessen Abgas über eine Turbine eingesetzt.

Mit Hilfe der institutseigenen Software ASTOR (AircraftEngine Simulation for Transient Operation Research) können nicht nur stationäre Betriebspunkte sondern auch transiente Betriebszustände wie z. B. das Hochfahren des Verdichters simuliert werden. Wie auch im Bereich konventioneller Turbolader ist vor allem die Untersuchung der Grenzen des Betriebsbereiches und deren zuverlässige Simulation von Bedeutung. Darüber hinaus werden weitere Sekundärsysteme wie z. B. das Kühlsystem in das Modell integriert, um eine aussagekräftige Vorhersage des Gesamtsystems zu ermöglichen.

Aufgrund der Wasserbildung in der Brennstoffzelle ist nach der chemischen Reaktion ein signifikanter Anteil an Wasserdampf im Prozessgas enthalten. Bei der anschließenden Entspannung in der Turbine fallen durch Kondensation Tröpfchen aus. Diese können eine starke Erosion der Beschauelung bewirken. Mit Hilfe von ANSYS-FLUENT® wird auf Basis von CFD-Simulationen die Charakteristik der Mehrphasenströmung untersucht. Darüber hinaus soll vorhergesagt werden, inwiefern der erosionsbedingte Verschleiß Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit der Turbine und damit des Gesamtsystems hat.

10. Entwurf, Analyse und Bewertung zukünftiger Flugantriebe

Die Luftfahrt steht vor der großen Herausforderung, Emissionen zu reduzieren und das Fliegen umweltverträglicher zu machen. Am IFAS werden dazu neben den konventionellen Gasturbinen und Triebwerken auch Untersuchungen im Bereich der zukünftigen Flugantriebe durchgeführt. Dabei liegt der Fokus auf dem Propeller für die Schubzeugung, der durch einen Elektromotor, eine Gasturbine oder ein Hybridsystem angetrieben wird. Die Propeller werden mit einem eigens am IFAS entwickelten Entwurfstool ausgelegt. Ziel dieses schnell wachsenden Forschungsbereichs ist es, Aussagen über die Effizienz und Machbarkeit der untersuchten Antriebskonzepte zu liefern.

Ein Schwerpunkt konzentriert sich dabei auf die Positionierung und Anzahl der Propeller am Flugzeug. Die Technologie der „Verteilten Antriebe“ (engl. distributed propulsion) verspricht durch die Interaktion von Propellern und Flügel höhere Auftriebsbeiwerte, was dazu führt, dass der Flügel deutlich kleiner ausgelegt werden kann. Dies wiederum verringert den Widerstand und spart Gewicht ein, sodass das Flugzeug insgesamt leichter und somit Treibstoff eingespart werden kann. Die Untersuchungen in diesem Bereich finden experimentell und numerisch statt.

Ein anderer Fokus wird durch die Bewertung des gesamten Flugzeugs gesetzt. Dafür werden zunächst Entwürfe für zukünftige Flugzeuge in den Jahren 2025 und 2050 erarbeitet, die anschließend bewertet werden. Die Bewertungskriterien umfassen Emissionen (CO₂ und NO_x) sowie Lärm und Kosten. Neben den Zulassungsvorschriften werden dabei auch die Produktion und Entsorgung bzw. Verwertung des Flugzeugs nach Außerdienststellung berücksichtigt. Das IFAS konzentriert sich in diesem großen Verbundprojekt mit 13 Partnern auf den Entwurf und die Integration der Propeller.

Übergreifend in allen Projekten ist das Systemverhalten von Propeller und Antrieb – meist ein Elektromotor – von entscheidender Bedeutung. Deswegen finden am IFAS zusätzlich experimentelle und numerische Untersuchungen statt, die diese Fragestellung beleuchten. Dabei geht es um das „matching“ von Elektromotor und Propeller und die Frage nach der optimalen Effizienz der Antriebseinheit.

8.4 Ausstattung des IFAS

Prüfstände zur Untersuchung von:

- Kreiselpumpen bis DN 150/ DN 300
- Axialpumpen bis DN 500
- Niedergeschwindigkeits-Axialverdichter in DN 600
- Axialventilator in DN 400
- Niederdruck-Axialventilatoren bis DN 700

Weitere Prüfstände:

- Forschungstriebwerk IAE V2500-A1
- Gitterwindkanal
- Windkanal zur Kalibrierung von Strömungsmesssonden
- Großer Wasserkanal
- Mess- und Prüfeinrichtungen für Dichtungen DN 300 bis 8 bar, mit und ohne Rotation der Welle
- Heißdampfprüfstand für Bürstendichtungen im Heizkraftwerk Braunschweig-Mitte
- Modellstrahltriebwerk JetCat P200SX

Geräte:

- Rechnergestützte Messwerterfassungsanlagen für stationäre und instationäre Messsignale
- Telemetrieanlagen
- Hitzdraht-Messsysteme zur Messung instationärer Geschwindigkeiten
- 2C-2D- und 3C-2D-Particle Image Velocimetry (PIV) zur berührungslosen Messung von Geschwindigkeitsfeldern
- Workstation-Cluster zur Strömungsberechnung (CFD) und zum Entwurf von Strömungsmaschinen (CAD)

8.5 Themenbeispiele für Bachelor-, Studien- oder Masterarbeiten

- Numerische Simulation des Betriebsverhaltens von Pressure Actuated Leaf Seals bei exzentrischer Wellenlage
- Rpxperimental evaluation of the flow field generated by a counter-current hydraulic pump using PIV methods (englisch)
- Konstruktion eines Großpumpen-Prüfstands
- Untersuchung des Wärmetransports in zukünftigen elektrischen Luftfahrtantrieben
- Finite-Differenzen-Methode zur Zustandsüberwachung und Regelung von Windparks
- Theoretische und experimentelle Untersuchung zur Visualisierung der Oberflächenströmung in einem Poolbecken
- Erstellung eines CFD-Modells zur stationären Leckagesimulation von Kohleschwimringdichtungen
- Untersuchung der Genauigkeit numerischer Simulationsverfahren für einen elektrischen Luftverdichter für mobile Brennstoffzellenanwendungen
- Untersuchung des instationären Betriebsverhaltens elektrischer Luftverdichter für mobile Brennstoffzellenanwendungen
- Entwicklung einer Simulationsumgebung für elektrische Luftverdichter in mobilen Brennstoffzellensystemen
- Experimentelle Verschleißanalyse an Pressure Actuated Leaf Seals nach Langzeit- und Exzentrizitätsversuchen in Heißdampfumgebung
- Numerische Analyse der Leakage von Pressure Actuated Leaf Seals bei exzentrischer Wellenlage
- Design und experimentelle Untersuchung verschiedener Rückplattengeometrien für Kohleschwimringdichtungen
- Design und experimentelle Untersuchung verschiedener Rückplattengeometrien für Kohleschwimringdichtungen
- Szenariobasierte Verformungsstrategien für formvariable transsonische Profile
- Numerische Untersuchung der Fan Intake Interaktion des INFRa Rigs
- Instationäre, skalenauflösende Q3D Simulation transsonischer Profilschnitte
- Untersuchung der Propeller Tragflügel Interaktion bei Verwendung von Tragflächenendpropellern
- Untersuchung der Nachlauf Propeller Interaktion bei Verwendung von Rumpfpfropellern
- Numerische Untersuchung eines experimentellen Setups mit verteilten Antrieben
- Validierung eines Aktuator Disc Modells für Propeller
- Numerische Beurteilung des Reynoldszahl-Effekts von Triebwerkseinläufen



**9 Institut für
Partikeltechnik**
Technische Universität
Braunschweig

Prof. Dr.-Ing. A. Kwade
Prof. Dr. G. Garnweitner
Prof. Dr.-Ing. C. Schilde

Volkmaroder Str. 5
38104 Braunschweig
Tel.: (0531) 391-9613
Fax: (0531) 391-9633
iPAT@tu-bs.de
www.iPAT.tu-bs.de

Institutsleitung:	Prof. Dr.-Ing. Arno Kwade	391-9610
Stellvertretender Institutsleiter :	Dr.-Ing. Harald Zetzener	391-9612
Leiter Bereich Nanomaterialien:	Prof. Dr. Georg Garnweitner	391-9615/ 391-65371
Leiter Bereich Partikelsimulation & Funktionsstrukturen	Prof. Dr.-Ing. Carsten Schilde	391-65551
Projektmanagement:	Nina Hommola	391-94663
Lehrbeauftragte:	Dr.-Ing. Ingo Kampen	391- 65531

Sekretariat:

Marina Bazan	391-94649	Simone Otte	391-9613	Julia Schulte	391-9648 391-94646
Kerstin Bloch	391-9644 391-65370	Elena Passarini	391-94649		
Tanja Henkens	391-9611	Claudia Romberg	39-65542		

Technische Mitarbeiter:

Tanja Boll	391-94650	Kerstin Krüger	391-94634	Daniela Scholz	391-65372
Detlev Hille	391-9617	Matthias Künne	391-94670	Marius Schulz	391-9617
Stoyan Ivanov	391-94670	Stephanie Michel	391-65532	Rainer Severin	391-94645
Erik Kariger	391-9625	Alexander Neuberger	391-94671	Uwe Stüwe	391-9617
Julian Koch	391-94640	Louise Niemeyer	391-65535	Martin Wylegala	391-9616
Jan-Michael Kröhnke	391-94634	Nicole Preißer	391-94671		
Richard Körtje	391-9645	Axel Rosenkranz	391-94671		

Wissenschaftliche Mitarbeiter:

Dr.-Ing. Mozaffar Abdollahifar	391-94664	Sandra Breitung-Faes	391-9630	Jessica Gerstenberg	391-94654
Marco Ahuis	391-94637	Christine Burmeister	391-94655	Konstantinos Giannis	391-65554
Lena Arndt		Dr.-Ing Heather Cavers	391-94661	Laura Gottschalk	391-94658
Simon Arndt	391-9620	Anderson Chagas	391-9621	Tim Grenda	391-94658
Matthäus Barasinski	391-65374	Matthias Diekhoff	391-94661	Nico Grotkopp	391-65373
Mattis Batzer	391-94642	Alexander Diener	391-9604	Marion Görke	391-9626
Konrad Bendzuck	391-94648	Niklas Dierks	391-9626	Alexander Hahn	391-94637
Dennis Beusen	391-9602	Marcel Dittmer	391-94644	Leigh Duncan Hamilton	391-9606
Ann-Christin Böttcher	391-9622	Stefan Doose	391-94668	Carina Heck	391-94648
Sven Brandt	391-9621	Hans Fenske	391-94645	Sima Hellmers	391-9424
Michael Bredekamp	391-94656	Jan Henrik Finke	391-65541	Laura Helmers	391-94655

Moritz Hofer	391-94647	Dr. rer. nat. Peter Michalowski	391-94659	Bogdan Semenenko	391-65535
Marcella Horst	391-94643	Robin Moschner	391-94643	Dominik Steckermeier	391-94651
Max-Wolfram von Horstig	391-94650	Felix-Tom Möhlen	391-94656	David Sterling	391-9632
Somayah Hosseinihashemi	391-65557	Marcel Filipe Möller	391-9603	Nanny Strzelczyk	391-94653
Fabienne Huttner	391-94655	Jannes Müller	391-94647	Yeswanth Sai Tanneru	391-9623
Dimitri Ivanov	391-65552	Fernanda Padilha Noronha	391-9624	Christoph Thon	391-65553
René Jagau	391-94653	Christine Oertel	391-94646	Marius Tidau	391-9643
Eun Ju Jeon	391-65372	Sherif Okeil	391-9623	Maximilian Tobaben	391-9607
Dr. Laura Jess	391-94646	Achim Overbeck	391-65534	Dr.-Ing. Kevin Voges	391-94642
Fabisch Kilonzi	391-65373	Niklas Penningh	391-94646	Daniel Vogt	391-94658
Marta Kubiak	391-65533	Christoph Peppersack	391-9601	Dr. rer. nat. Jeroen Volbeda	391-94641
Christian Köhn	391-65372	Daniel Puckhaber	391-65550	Karl Vorländer	391-65547
Franziska Lais	391-94654	Franziska Punt	391-9602	Eike Wiegmann	391-94661
Mark Lippke	391-94656	Jobin Raju	391-9643	Lisa Windisch	391-9604
Thomas Loellhoeffel	391-94652	Marvin Röhl	391-65557	Silas Wolf	391-65544
Arne Lüddecke	391-9622	Markus Rojer	391-9643	Maike Sophie Wullenweber	391-65537
Jil Mann	391-65557	René Rösemeier-Scheumann	391-65549	Ajmal Zarinwall	391-9626
Viktor Maurer	391-65558	Sören Scheffler	391-94662		
Julian Mayer	391-94650	Ann Kathrin Schomberg	391-65543		
Niklas Meier	391-9607	Alexander Schoo	391-94644		
Sebastian Melzig	391-65546	Marcel Schrader	391-65533		
Dr.-Ing. Patricia Mendes	391-9622	Gerrit Schällicke	391-94654		

Studienfachberatung:

Ann Kathrin Schomberg

391-65543

Beratung zum Auslandsstudium

Matthäus Barasinski

391-65374

Marion Görke

391-9626

9.1 Module für Bachelor- und Masterstudiengänge

Module für Bachelorstudiengang Bio-, Chemie-, Pharmaingenieurwesen

Anlagenbau (mit Labor)	WS	6 LP	2 VL/ 1 Ü	Kwade
Anorganische Chemie	WS	4 LP	2 VL/ 1 Ü	Garnweitner
Mechanische Verfahrenstechnik 1 (mit Labor)	SS	7 LP	2 VL/ 1 Ü	Kwade
Mechanische Verfahrenstechnik 2	WS	5 LP	2 VL/ 1 Ü	Schilde

Module für Bachelorstudiengang Maschinenbau

Anlagenbau	WS	5 LP	2 VL/ 1 Ü	Kwade
Anorganische Chemie	WS	5 LP	2 VL/ 1 Ü	Garnweitner
Mechanische Verfahrenstechnik 1	SS	5 LP	2 VL/ 1 Ü	Kwade
Mechanische Verfahrenstechnik 2	WS	5 LP	2 VL/ 1 Ü	Schilde

Module für Masterstudiengänge

Fundamentals of Nanotechnology (englisch)	SS	5 LP	2 VL/ 1 Ü	Garnweitner
Formulierungstechnik	SS	5 LP	2 VL/ 1 Ü	Kwade
Lagern, Fördern und Dosieren von Schüttgütern	WS	5 LP	2 VL/ 1 Ü	Kwade / Zetzener
Energieeffiziente Maschinen der mechan. Verfahrenstechnik	WS	5 LP	2 VL/ 1 Ü	Kwade
Mikroskopie und Partikelmessung im Mikro- und Nanometerbereich	WS	5 LP	2 VL/ 1 Ü	Kwade / Kampen
Neue Technologien: Materialien und Prozesse für moderne Batteriesysteme	SS	2,5 LP	1 VL	Garnweitner / Kwade
Particle Engineering in Industrial Pharmacy	SS	2,5 LP	1 VL	Dr.-Ing. Juhnke
Partikelsynthese	SS	5 LP	2 VL/ 1 Ü	Garnweitner
Projekt- und Qualitätsmanagement	WS	5 LP	2 VL/ 1 Ü	Kwade / Zetzener
Process Technology of Nanomaterials (englisch)	WS	5 LP	2 VL/ 1 Ü	Garnweitner
Qualitätswesen und hygienegerechte Gestaltung in der Prozesstechnik	SS	5 LP	2 VL/ 1 Ü	Kwade/ Zetzener
Simulationsmethoden der Partikeltechnik	WS	5 LP	1 VL/ 1 Ü/ 1 P	Schilde
Zerkleinern und Dispergieren	WS	5 LP	2 VL/ 1 Ü	Kwade

Fachlabore

Mechanische Verfahrenstechnik 2	SS	2 LP		Kampen
Formulierungstechnik	WS	2 LP		Horst
Prozesstechnik der Nanomaterialien	SS	2 LP		Ebrahimifard

Gemeinsame Module der verfahrenstechnischen Institute für Masterstudiengänge:

Elektroden- und Zellfertigung	WS	5 LP	2 VL/ 1 Ü	Kwade / Dröder
Grundlagen der Umweltschutztechnik	SS	5 LP	2 VL/ 2 Ü	Kwade / Friedrichs
Mikroverfahrenstechnik	WS	5 LP	2 VL/ 2 Ü	Kwade / Scholl
Umweltprozesstechnik	WS	5 LP	2 VL/ 1 Ü	Kwade / Schröder
Grundlagen der Umweltschutztechnik	SS	5 LP	2 VL/ 1 Ü	Kwade / Friedrichs

9.2 Inhalte der Lehrveranstaltungen

Im Folgenden sind die Inhalte, der in der vorigen Tabelle aufgelisteten, Lehrveranstaltungen näher beschrieben.

Anlagenbau

Die Vorlesung Anlagenbau umfasst die Bereiche Anlagenplanung und Apparatebau. Im ersten Teil stehen die Planungsphasen einer Anlage von der Vorprojektierung bis zur Inbetriebnahme im Vordergrund, während im zweiten die konstruktiven Gesichtspunkte verfahrenstechnischer Apparate vertieft werden. Die Vorlesung ist wie folgt gegliedert:

Anlagenplanung:

- Dokumentation und Information (Datenbanken, Fließbilder)
- Machbarkeitsstudie, Verträge und Risiken, Genehmigungsverfahren, behördliche Auflagen
- Projektplanung, Technische Vorprojektierung (Process, Basic and Detail Design, Sicherheitsanalysen, Betriebshandbuch), Nachbetrachtung

Apparatebau:

- Konstruktive Grundlagen, Regelwerke, Normen, Behälterabnahme
- Konstruktive Betrachtung eines Apparates (Zyl. Mantel, Böden, Stützen, Flansche, Dichtungen und Zusätze für Druckbehälter, Apparate zum Transport und Lagern von Feststoffen)
- Strömungsmaschinen (Pumpen, Verdichter, Extruder)
- Verbindung von Maschinen und Apparaten (Rohrleitungen, Armaturen)
- Hygienegerechte Gestaltung von Maschinen und Apparaten

Anorganische Chemie

In der Vorlesung Anorganische Chemie wird das Wissen zu folgenden Inhalten vermittelt: Atombau und Periodensystem der Elemente, Bindungsarten, die Aggregatzustände, Säuren und Basen, Chemische Reaktionen, Stöchiometrie und Oxidation und Reduktion. Bei der Vorlesung handelt es sich um eine Einführungsveranstaltung im 1. Semester der Studiengänge Bachelor Maschinenbau, Bachelor Bioingenieurwesen sowie Bachelor Geoökologie. Neben der Vorlesung und Übung, die kombiniert immer freitags, 11.30-13.00 Uhr abgehalten werden, bieten wir den Studierenden auch Tutorien (so genannte Kleine Übung) zur vertieften Betrachtung der Vorlesungsinhalte an. Diese Tutorien sind ein freiwilliges Zusatzangebot und sind nur für Studierende gedacht, die z. B. aufgrund der Abwahl des Faches Chemie im Schulunterricht, größere Probleme mit der Verinnerlichung des Stoffes haben! Bitte beachten Sie ferner, dass wir aufgrund der großen Anzahl an Studierenden nicht immer alle Kontaktanfragen beantworten können, insbesondere kurz vor Klausurterminen.

Elektroden- und Zellfertigung

In der Vorlesung erlangen die Studierenden detailliertes Wissen über die Materialien sowie Produktionstechnologien moderner Traktionsbatteriezellen. Zudem vermittelt die Vorlesung Wissen zu gängigen Analysemethoden entlang der Prozesskette.

Folgende Fertigungsschritte werden behandelt:

Partikelvorbehandlung, Trocken- und Nassmischen, Beschichten, Trocknen, Kalandrieren, Konfektionierung, Elektrolytbefüllung, Packageherstellung, Kontaktierung, Formierung

Energieeffiziente Maschinen der Mechanischen Verfahrenstechnik

Die Vorlesung befasst sich mit dem Themenkomplex der Gestaltung, Konstruktion und Auslegung von Zerkleinerungsmaschinen, Siebmaschinen, Sichern, Eindickern, Filtern, Zentrifugen, Misch- und Dispergiermaschinen und zusätzlich werden jeweils die wichtigsten Grundlagen aus Mechanische Verfahrenstechnik 1 wiederholt. Im Wesentlichen werden aber Arbeitsweisen, Bauarten von Maschinen und

Berechnungsweisen behandelt.

Fundamentals of Nanotechnology (Einführung in die Nanotechnologie)

Dieses Modul setzt sich aus dem Teil „Grundlagen der Nanotechnologie“ und dem Teil „Nanopartikeltechnologie“ zusammen. Beide Teile werden in englischer Sprache gehalten. Zunächst wird eine Einführung in die Nanotechnologie geboten, bestehend aus den Fragestellungen: Was ist Nanotechnologie? Welche Eigenschaften besitzen Nanomaterialien? Wofür kann man sie nutzen? Was versteht man unter den Generationen der Nanotechnologie? Nach der Vorstellung spezieller Nanomaterialien, insbesondere Kohlenstoff-Nanostrukturen, werden speziellere Aspekte der Realisierung von Nanotechnologie-Anwendungen basierend auf Nanopartikeln diskutiert (funktionale dünne Schichten, druckbare Elektronik, Nanokomposite und Hybridpolymere). Zuletzt wird erläutert, welche wirtschaftlichen Erfolgsstrategien im Bereich Neue Technologien und speziell Nanotechnologie existieren (Innovationsstrukturen, Förderinstrumente, Venture Capital).

Formulierungstechnik

Die Herstellung vieler Produkte erfolgt über Prozesse, die aus unterschiedlichen Unit Operations zusammengesetzt sind. Anhand von konkreten Beispielen wird gezeigt, wie sich Produkte durch Wahl der Prozessparameter und -abfolge gezielt designen lassen.

Die Vorlesung ist wie folgt gegliedert:

- Grundlagen einschließlich Phasen, Grenzflächen, Wechselwirkungen, Kolloide und Stabilisierung
- Fließverhalten von Emulsionen und Suspensionen
- Erzeugung und Eigenschaften von Emulsionen (Grundlagen und Beispiele, insbesondere aus dem Bereich der Lebenswissenschaften)
- Erzeugung und Eigenschaften von Dispersionen (Grundlagen und Beispiele)
- Dispergier- und Emulgiermaschinen
- Erzeugung und Eigenschaften von festen Formulierungen (Grundlagen und Beispiele wie z.B. Tabletten, Kapseln, Granulaten)
- Extrudieren
- Beschichtungsverfahren, Mikroverkapselung

Grundlagen der Umweltschutztechnik

Qualifikationsziele:

Nach Abschluss dieses Moduls besitzen die Studierenden Kenntnisse über die grundlegende Aspekte des Umweltschutzes sowie die umweltgefährdenden Potenziale von flüssigen, festen und gasförmigen Schadstoffen. Typische Messmethoden im Umweltschutz sind bekannt und Messverfahren wie -geräte können ausgewählt und eingesetzt werden.

Darüber hinaus werden rechtliche Aspekte und Anforderungen zum Umweltschutz vermittelt.

Inhalte:

- Feste, Flüssige, gasförmige Schadstoffe
- Messmethoden für verschiedene Schadstoffe
- Schadstoffe und Schadstoffausbreitung in der Atmosphäre
- Verbrennungsschadstoffe
- Lärm- und Lärmschutz
- Technikbewertung & rechtliche Aspekte

Lagern, Fördern und Dosieren von Schüttgütern

Die Vorlesung ist wie folgt gegliedert:

- Fließverhalten sowie Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Schüttgütern
- Messung der Fließeigenschaften
- Spannungen in Silos
- Verfahrenstechnische Auslegung und Gestaltung von Silos und Peripheriegeräten (Auslauf, Austraggeräte, Austraghilfen, Füllstandsmessung)
- Gestaltung und Auslegung von Schüttgutförderern (u.a. Schnecken- und Bandförderer)
- Gestaltung und Auslegung von Dosiergeräten für Schüttgüter

Mechanische Verfahrenstechnik 1

Bei der Produktgestaltung innerhalb der stoffwandelnden Industrie stellen die mechanischen Prozesse eine bedeutende Gruppe dar. Die Grundoperationen der Mechanischen Verfahrenstechnik, mit denen disperse Systeme umgewandelt und Änderungen der Eigenschaften erzielt werden können, bilden den thematischen Schwerpunkt dieser Vorlesung. Zudem werden die Grundlagen der Partikel- und Produkteigenschaften disperser Systeme sowie der Charakterisierung der beteiligten festen Partikel behandelt.

Die Vorlesung ist wie folgt gegliedert:

- Definition und Anwendungsgebiete (u.a. Nanotechnologie)
- Partikel- und Produkteigenschaften disperser Systeme (u.a. Kennzeichnung von Partikeln)
- Kräfte auf Partikeln in strömenden Medien
- Strömung durch Packungen
- Darstellung von Partikelgrößenverteilungen, Partikelgrößenanalyse
- Mechanische Trennverfahren (Klassieren, Sortieren, Abscheiden – Kennzeichnung und Maschinen)
- Mischen (Kennzeichnung und Maschinen)
- Zerkleinern (Partikelbeanspruchung, Partikelbruch, Übersicht Maschinen)
- Agglomerieren (Haftmechanismen, Maschinen)

Mechanische Verfahrenstechnik 2

Aufbauend auf der Vorlesung Mechanische Verfahrenstechnik 1 werden in der Vorlesung Mechanische Verfahrenstechnik 2 einige Grundoperationen vertieft behandelt sowie die Auslegung von Prozessen und die Gestaltung von partikulären Produkten besprochen. Ferner werden das Lagern und Fließen von Schüttgütern, die Stabilisierung disperser Systeme und der Einsatz numerischer Verfahren in der Mechanischen Verfahrenstechnik behandelt.

Die Vorlesung ist wie folgt gegliedert:

- Lagern und Fließen von Schüttgütern (Siloauslegung)
- Wirbelschichten
- pneumatischer und hydraulischer Transport
- Auslegung mechanischer Trennverfahren (u.a. Filter)
- Auslegung von Zerkleinerungsverfahren (Brecher, Mühlen mit losen Mahlkörpern)
- Beschreibung von Partikelsystemen mit Populationsbilanzen und der Diskrete-Elemente-Methode
- Partikel-Partikel-Wechselwirkungen
- Steuerung der Grenzflächen und Stabilisieren partikulärer Systeme

Mikroskopie und Partikelmessung im Mikro- und Nanometerbereich

In der Vorlesung werden Verfahren zur Messung von Abmessungen und Eigenschaften kleiner und kleinster Objekte und Strukturen vermittelt. Sie ersetzt die bisher angebotene Vorlesung Partikelgrößenmesstechnik.

Folgende Messverfahren werden behandelt:

9 INSTITUT FÜR PARTIKELTECHNIK

- Rastersondenmikroskopische Verfahren (u.a. Rastertunnelmikroskopie, Rasterkraftmikroskopie)
- Lichtmikroskopische Verfahren (u.a. Fluoreszenzmikroskopie, konfokale Mikroskopie)
- Elektronenmikroskopie (u.a. Transmissionselektronenmikroskopie, Sekundärelektronenmikroskopie)
- Verfahren der Partikelgrößenanalyse (u.a. Sedimentationsverfahren, Laserbeugungsspektrometrie, Photonenkorrelationspektroskopie, Ultraschallspektrometer)

Mikroverfahrenstechnik

Die Studenten sind mit den Grundlagen von Wärme-, Stoff- und Impulsübertragung bei der ein- und mehrphasigen Strömung in Mikrokanälen vertraut. Die durch die Miniaturisierung auftretenden Skaleneffekte können sie vorteilhaft nutzen. Typische Mikrobautile (Mischer, Wärmeübertrager, Reaktoren) sind ihnen bekannt und sie können diese für einen gegebenen Prozess geeignet zu einer mikroverfahrenstechnischen Anlage kombinieren. Die Umsetzung thermischer, mechanischer und chemischer Grundoperationen in den Mikromaßstab und deren Integration in verfahrenstechnische Anlagen wird den Studierenden dargestellt. Die für die Umsetzung erforderlichen Kenntnisse zur Skalierung und Miniaturisierung physikalischer Effekte und deren Auswirkungen auf die Fluid- und Thermodynamik in Mikrosystemen werden erarbeitet und diskutiert. Anhand der Vor- und Nachteile der Mikroverfahrenstechnik, soll die industrielle Bedeutung behandelt und gegenwärtige sowie zukünftige Einsatzgebiete von Mikrokomponenten vorgestellt werden. Mit dem begleitenden Praktikum werden die Studierenden miniaturisierte verfahrenstechnische Grundoperation in einem vollständigen Produktionsprozess eigenständig durchführen und auswerten. Vorstellung mikroverfahrenstechnischer Apparate und deren Einsatz in Industrie und Forschung, Skalierungsgesetze, Theorien zur Impuls-, Wärme-, und Stoffübertragung im Mikrobereich, Vor- und Nachteile der Mikroverfahrenstechnik, wissenschaftliche und wirtschaftliche Potenziale der Mikroverfahrenstechnik, Strategien zur Umsetzung verfahrenstechnischer Grundoperationen in den Mikromaßstab und deren Integration in einen Gesamtprozess mit zugehöriger Peripherie und Messtechnik.

Neue Technologien: Materialien und Prozesse für moderne Batteriesysteme

Diese Vorlesung wird im Rahmen des Moduls „Neue Technologien“ angeboten. Moderne Batteriesysteme, für die insbesondere im Rahmen der Elektromobilität großer Bedarf besteht, können ohne neue Materialien (die u.a. auch nanostrukturiert sind) sowie ohne Optimierung der Verfahrenstechnik der Elektroden- und Batteriefertigung keinen Eingang in Massenwendungen finden. Im Rahmen dieser Vorlesung werden sowohl die unterschiedlichen Materialien für Batteriesysteme erläutert und ihre Herstellung diskutiert, als auch die Prozessierung dieser Materialien zu den einzelnen Komponenten, zur Zelle und zum fertigen System dargestellt.

Particle Engineering in Industrial Pharmacy

Die Vorlesung umfasst die Herstellung und Kontrolle von Wirkstoffpartikeln sowie deren Weiterverarbeitung zu pharmazeutischen Produkten unter Berücksichtigung von strategischen und technischen Anforderungen in einem industriellen Umfeld.

Es werden die Grundlagen zu den molekularen Eigenschaften der Wirkstoffe und deren gezielte Herstellung zur Einstellung des biopharmazeutischen und qualitätsrelevanten Anforderungsprofils für die wesentlichen Verabreichungswege (oral, parenteral, pulmonal) behandelt. Insbesondere werden die Verfahrensoptionen Kristallisation, Filtration, Trocknung und Zerkleinerung zur Einstellung der wirkstoffrelevanten physikochemischen Qualitätseigenschaften sowie klassische und neue Verfahrensoptionen zur Weiterverarbeitung der Wirkstoffpartikel zu pharmazeutischen Produkten (Tabletten, Kapseln, injizierbare Arzneimittel, Pulverinhalatoren) diskutiert. Neben prozessrelevanten Aspekten wird auch auf die Erarbeitung eines wissenschaftlich fundierten Verständnisses unter Berücksichtigung der wesentlichen Qualitätseigenschaften durch modernste analytische Verfahren eingegangen. Darüber hinaus wird der strategische Prozess zur industriellen Entwicklung von neuen pharmazeutischen Produkten (Originator und Generikum) sowie die daraus resultierenden Herausforderungen für die Verfahrensentwicklung erläutert.

Partikelsynthese

Partikelsynthese bedeutet die Erzeugung von Feststoffteilchen durch Wachstumsprozesse, ausgehend von atomaren oder molekularen Bausteinen. Hierdurch können wesentlich homogenere Partikelsysteme, verglichen mit Zerkleinerungsprozessen, erhalten werden (also vor allem Pulver mit einheitlicher Partikelgröße und -form). Dies macht die Partikelsynthese in vielen Verarbeitungsprozessen, etwa in der pharmazeutischen Industrie, unerlässlich zur kontrollierten Herstellung von Pulvern mit hoher Qualitätsanforderung. Zukünftig wird die Partikelsynthese zur Erzeugung von Materialien mit überlegenen Eigenschaften, etwa bei Metallen und Keramiken, Kompositmaterialien und auch Nanomaterialien, noch stärkere Bedeutung erlangen.

Ein Verständnis der grundlegenden Zusammenhänge ist für die praktische Anwendung der Partikelsynthese äußerst wichtig, da nur bei einer genauen Einhaltung der wesentlichen Einflussgrößen eine konstante Produktqualität erhalten werden kann. Im Rahmen der Vorlesung werden diese Zusammenhänge ausführlich erläutert sowie ein Einblick in die praktische Bedeutung der Partikelsynthese gegeben werden.

Die Vorlesung ist wie folgt gegliedert:

- Überblick und Einführung
- Theoretische Grundlagen der Partikelsynthese
- Einsatzgebiete der Partikelsynthese
- Vorstufen und Ausgangsstoffe
- Flüssigphasen-Partikelsynthese: Kristallisation und Präzipitation (Grundprinzipien, Modelle); Reifungsprozesse; Sol-Gel-Prozesse
- Neue Methoden der Partikelsynthese
- Anwendungen der Partikelsynthese zur Herstellung konventioneller und neuartiger Materialien: Pulvermetallurgie, Herstellung von Keramiken, Kompositmaterialien, Nanotechnologie

Projekt- und Qualitätsmanagement

Unabhängig vom Projekt und der Projektumgebung haben sich für erfolgreiches Projektmanagement Bausteine durchgesetzt, deren konsequente Anwendung zwingend ist, wenn Projekte erfolgreich abgeschlossen werden sollen. Ob mehr die Methode, die Organisation oder das Führungskonzept im Vordergrund stehen, mag von Projekt zu Projekt unterschiedlich sein, wesentlich ist jedoch, dass Projektmanagement ernsthaft, konsequent und sorgfältig angewandt wird.

In dieser Vorlesung werden die wesentlichen Bausteine, Methoden und Vorgehensweisen für erfolgreiches Projektmanagement vorgestellt und diskutiert.

- Projekt, Projektorganisation und -beteiligte
- Projektplanung, z. B. Lastenheft/Pflichtenheft, Projektstrukturplan, Terminplanung, Kapazitätsplanung, Kostenplanung
- Projektsteuerung und Berichtswesen
- Konflikte in Projekten
- Risikomanagement
- Vertragsmanagement
- Claim Management

Process Technology of Nanomaterials

Die Nanotechnologie ist seit einigen Jahren wohl das am stärksten aufstrebende Forschungsgebiet. Diese Vorlesung gibt einen Überblick über die verschiedenen Arten von Nanomaterialien, ihre physikalischen und chemischen Eigenschaften. Die Methoden zu ihrer Herstellung werden unter prozesstechnischen Aspekten diskutiert und mögliche Anwendungen aufgezeigt.

Die Vorlesung ist wie folgt gegliedert:

- Einführung zu Nanomaterialien (Definitionen und Grundlagen, Historische Entwicklung der Kolloidwissenschaften, "Warum Nano?")
- Charakterisierung von Nanomaterialien (Überblick, Einführung in ausgewählte Charakterisierungsmethoden)
- Grundlagen zur Stabilisierung von Nanopartikeln (Oberflächeneigenschaften, Arten der Partikelstabilisierung)
- Herstellung von Nanomaterialien durch Top-Down-Prozesse (Zerkleinerung, Lithographie, Laserablation, alternative Verfahren)
- Herstellung von Nanomaterialien durch Bottom-Up-Prozesse (Grundlagen der Partikelbildung, gasphasenbasierte Verfahren, lösungsmittelbasierte Verfahren, Templatverfahren)
- Anwendung von Nanomaterialien (Grundlegendes, Arten der Anwendung, Überblick über heutige und erwartete zukünftige Anwendungen)
- je nach Wunsch der Hörer werden folgende Themenbereiche noch weiter vertieft: Toxikologie von Nanomaterialien, Spezielle Nanomaterialien (C-basierte Nanostrukturen), Eigenschaften von Nanomaterialien, Anwendung von Nanomaterialien in der Medizin, Nanophotonik, Nanoschichten, Biologische Nanomaterialien, Nanokomposite, Mesoporöse Materialien, Selbstanordnung von Nanomaterialien.

Qualitätswesen und hygienegerechte Gestaltung in der Prozesstechnik

Die Studierenden sollen nach der erfolgreichen Teilnahme an dieser Vorlesung die Bedeutung der Normen, gesetzliche Regelungen bzw. Leitlinien und Empfehlungen verschiedener Organisationen bezüglich des Hygienic Designs kennen. Ferner sollen sie sich die Grundlagen der Entstehung hygienischer Risiken sowie grundlegende Gesichtspunkte hygienischer Gestaltung angeeignet haben.

Simulationsmethoden der Partikeltechnik

Die Vorlesung gibt einen Überblick über die verschiedenen Möglichkeiten, Prozesse mit Partikeln numerisch zu beschreiben und vermittelt die jeweiligen Grundlagen. Zudem wird die Verknüpfung der unterschiedlichen Methoden zum Einsatz von Multi-Physik- sowie Multi-Skalen-Simulationen gezeigt. Zwei der wichtigsten Methoden, die Diskrete Elemente Methode sowie die Population Balance Methode, werden detailliert besprochen, um darauf aufbauend eigene Simulationen durchführen zu können. Hierbei wird insbesondere auch auf die Kalibrierung der Modellparameter eingegangen.

Die Vorlesung ist wie folgt gegliedert:

- Überblick numerische Methoden der Partikeltechnik
- allgemeine Bilanzgleichung
- Molekulardynamik
- Diskrete Elemente Methode
- Computational Fluid Dynamics (Einführung)
- Multi-Physik- und Multi-Skalen-Modelle
- Populationsbilanzen

Zerkleinern und Dispergieren

Nach Abschluss der Vorlesung verfügen die Studierenden über vertiefte Kenntnisse und den Stand der Forschung auf dem Gebiet der Zerkleinerung und Dispergierung insbesondere in Rührwerkskugelmöhlen. Sie beherrschen die Grundlagen der Messung von Zerkleinerungs- und Dispergierergebnissen sowie die der Partikel/Partikelwechselwirkungen.

Die Vorlesung ist wie folgt gegliedert:

- Partikelbeanspruchung und Partikelbruch
- Beanspruchungsmodell
- Wichtige Betriebsparameter und deren Einfluss auf Produktqualität und Betriebsverhalten
- Stabilisierung der Partikelsysteme
- Produktgestaltung, Maschinenauslegung
- Scale-up
- Zerkleinerungs- und Dispergiermaschinen
- Ausführung von Zerkleinerungs- und Dispergieranlagen
- Produktgestaltung (u.a. Farben und Lacke, pharmazeutische Wirkstoffe, Nanopartikeln)

9.3 Arbeitsgebiete und Forschungen

Das Institut für Partikeltechnik untergliedert sich in fünf Forschungsbereiche sowie den Organisationsbereich Lehre und Verwaltung. Die Arbeitsgruppe Batterieverfahrenstechnik ist am Langen Kamp angesiedelt, die Arbeitsgruppe Pharma- und Biopartikeltechnik im Zentrum für Pharmaverfahrenstechnik und die Arbeitsgruppe Nanomaterialien im LENA - Laboratory for Emerging Nanometrology der TU Braunschweig. Nachfolgend werden die Forschungsbereiche näher beschrieben.

1. Batterieverfahrenstechnik

Allgemeine wissenschaftliche Zielsetzung der Arbeitsgruppe Batterieverfahrenstechnik ist die Korrelation von Prozessparametern mit den Produkteigenschaften der Partikel, Suspensionen und Beschichtungen/Elektroden. Insbesondere verfahrenstechnische Fragestellungen der industriellen Elektrodenherstellung für State of the Art Systeme, wie konventionelle Lithium-Ionen-Batterien (LIB) oder für Systeme der nächsten Generation, wie Zink-Luft-, Li-Schwefel, Silizium/Graphit und All-Solid-State Batterien werden betrachtet. Die Arbeitsgruppe untersucht beispielsweise die Fertigung hierarchisch strukturierter Elektroden mit ein- und mehrschichtigem Aufbau. Im Rahmen der Projekte wird hierfür eine kontinuierliche Beschichtungs- und Verdichtungsanlage für die gezielte Produktionsforschung im Bereich der Elektrodenfertigung betrieben. Neben Eigenschaften der Ausgangspulver, Kompositmischungen und Suspensionen (z.B. Partikelgröße und elektrische Leitfähigkeit) werden Strukturaufbau/-eigenschaften der Elektroden unter anderem durch die Fertigung von Batteriezellen und deren elektrochemische Charakterisierung getestet. Somit können Struktur-Eigenschaftsbeziehungen in Abhängigkeit von Fertigungsprozessen, Formulierungsstrategien und Rezepturdesigns gezielt untersucht werden. Aufbauend auf dem Wissen zu ihrer Herstellung werden intelligente und energieeffiziente Recyclingprozesse für konventionelle LIB, aber auch zukünftiger Zellchemien erforscht und entwickelt. Weiterer Schwerpunkt ist die Sicherheit von LIB. Ziel von Forschungsarbeiten in diesem Bereich ist das Verständnis von Mechanismen und Einflussfaktoren zur kontinuierlichen Sicherheitssteigerung für sämtliche Batteriesysteme.



Abb. 9.1 Kontinuierliche Beschichtungs- und Trocknungsanlage

Seit 2014 arbeitet die Batterieverfahrenstechnik hauptsächlich in der neu entstandenen Battery LabFactory Braunschweig (BLB). Auf über 1000 m² wird mit modernster Prozesstechnologie die gesamte Wertschöpfungskette von Materialvorbehandlung bis zum Recycling im Pilotmaßstab abgebildet.

Der Fokus der Forschung liegt am Institut für Partikeltechnik auf folgenden Forschungsschwerpunkten:

- Verfahrens-, Fertigungs- und Prozesstechnologie der Elektrodenfertigung
- Trocken- und Nassmischen / Extrusion zur Herstellung von Batteriesuspensionen
- Konditionierung, Strukturierung der dispersen Phasen
- Beschichtung/Trocknung: diskontinuierlich, kontinuierlich und strukturiert
- Kontinuierliche und diskontinuierliche Verdichtung (Kalandrierung)
- Entwicklung von Recyclingstrategien
- Mechanische Abuse-Tests von LIB
- Simulation von Prozesseinflüssen und Elektrodenstrukturen

2. Nanomaterialien

Die Mitarbeiter/innen im Bereich Nanomaterialien beschäftigen sich mit der Erzeugung, Stabilisierung, Funktionalisierung und Anwendung von Nanopartikeln und Nanostrukturen. Die Nanopartikel werden über „bottom-up“-Methoden mittels chemischer Synthese hergestellt. Hierfür wird vor allem die so genannte Nichtwässrige Methode in organischen Lösungsmitteln eingesetzt. Über diese Methode ist die Herstellung sehr kleiner Partikel (2-20 nm) mit engen Größenverteilungen und homogener Form möglich, die für viele Anwendungen vorteilhaft bzw. notwendig sind. Aufgrund ihrer hohen Stabilität und der vielfältigen Eigenschaften liegt der Schwerpunkt auf der Synthese von Metalloxiden. Durch ein Scale-Up in den Litermaßstab und unsere langjährigen Untersuchungen zum prozesstechnischen Verständnis der Partikelbildung ist es auch möglich, größere Mengen an Nanomaterialien (bis 200 g/Ansatz) zu produzieren und die Partikeleigenschaften gezielt einzustellen.



Abb. 9.2 ZrO₂-Nanopartikeln von 2 nm Größe; transparente Nanokomposite; Dispersion von lumineszierenden Nanopartikeln (normal- und UV-Licht); strukturierte Nanokomposite als optische Elemente.

Neben der Synthese wird die Partikelstabilisierung und Funktionalisierung eingehend untersucht. Aufgrund ihrer sehr hohen spezifischen Oberfläche (bei 4 nm großen Partikeln liegen bereits ca. 30 % der Atome an der Oberfläche) neigen Nanopartikel stark zur Agglomeration, können aber durch eine Belegung mit organischen Molekülen stabilisiert werden. Zudem lassen sich so gezielt auch viele weitere Eigenschaften (chemisches Verhalten, biologische und katalytische Aktivität, optische Eigenschaften) verändern und eine kontrollierte Vernetzung (self-assembly) erreichen. Zusätzlich werden neuartige Anwendungen von Nanopartikeln durch den Einsatz hierfür maßgeschneiderter Nanopartikel entwickelt. Die Schwerpunkte liegen hierbei insbesondere in den Bereichen maßgeschneiderte Nanokomposite und Nanopartikel-Dünnschichten sowie magnetische Nanomaterialien. Der Bereich Nanomaterialien ist darüber hinaus eng in das Laboratory for Emerging Nanometrology LENA eingebunden und beschäftigt sich dort mit der Metrologie von Nanopartikeln. Die Synthese von Materialien für zukünftige Batteriesysteme wird im Rahmen der Nachwuchsgruppe „Solid-State-Batteriematerialien und -Elektroden“ in Kooperation mit der Battery LabFactory Braunschweig (BLB) durchgeführt.

3. Partikelsimulation und Funktionsstrukturen

Die Herstellung und Verarbeitung von Partikeln entlang der Prozesskette bestimmt die strukturellen und anwendungstechnischen Eigenschaften einer Vielzahl an Produkten. Dabei werden Partikel angefangen von der Lagerung, dem Transport und der Zerkleinerung im trockenen Zustand bis hin zur komplexen Synthese anorganischer und organischer Partikel, anschließenden Agglomerations-, Dispergier- und Beschichtungsprozessen innerhalb einer flüssigen Phase verarbeitet.

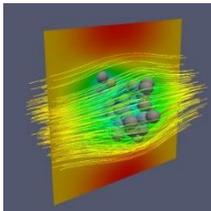


Abb. 9.4 Partikelsimulation

Größenskalen zu verstehen, ist parallel zu den experimentellen Arbeiten ein wesentlicher Schwerpunkt die Simulationen partikulärer Prozesse und Produkte sowie die Ableitung mechanistischer Modelle. Für die

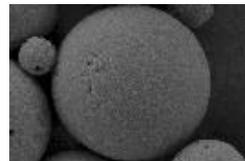


Abb. 9.3 Funktionsstruktur

Ziel der Forschungsarbeiten des Bereichs „Partikelsimulation & Funktionsstrukturen“ am Institut für Partikeltechnik und des Zentrums für Pharmaverfahrenstechnik ist einerseits das gezielte Design von Partikelgrenzflächen und -strukturen sowie deren Formulierung und Weiterverarbeitung zu innovativen, neuartigen, insbesondere auch pharmazeutischen Produkten, und andererseits die quantitative Beschreibung der für die Strukturbildung verantwortlichen Mikro- und Makroprozesse entlang der Prozesskette. Um die komplexen Zusammenhänge während der Herstellung und Verarbeitung von Partikeln auf den verschiedenen

Beschreibung partikulärer Prozesse liegt der Schwerpunkt insbesondere auf der Diskreten Elemente Methode (DEM), die für die Betrachtung einer zusätzlichen fluiden Phase mit der Strömungssimulation (CFD) gekoppelt wird. Die Diskrete Elemente Methode befasst sich mit den Interaktionen einer großen Anzahl von Partikeln über verschiedene Partikelwechselwirkungsmodelle. Die Strömungssimulation berücksichtigt dann die Partikelbewegung innerhalb eines Fluides als Kontinuum. Die aktuellen Forschungsschwerpunkte fokussieren sich dabei auf die folgenden Teilgebiete:

- Charakterisierung und Simulation struktureller und mikromechanischer Eigenschaften nanopartikulärer Aggregate und Beschichtungen
- Simulationen der Beanspruchung von Aggregaten im Fluid sowie das Verhalten bei zusätzlicher Anwesenheit von Mahlkörpern
- Simulationsgestützte Beschreibung rheologischer Eigenschaften von Nano- und Mikrosuspensionen
- Gekoppelte CFD-DEM Simulation von Mahlkörpergeschwindigkeits- und Beanspruchungsenergieverteilungen in Rührwerkskugelmöhlen und Knetern bei verschiedenen Prozess- und Formulierungsparametern
- Definierter Aufbau von hierarchischen Mikro- und Nanostrukturen (Aggregate, Beschichtungen, Polymer- und Keramik-3D-Druck) aus verschiedenen, oberflächenfunktionalisierten nanopartikulären Bausteinen
- Simulation der Herstellung und Verarbeitung von pharmazeutischen Wirkstoffen
- Strategien zur Kalibrierung und Validierung von Simulationsparameter durch definierte Modellversuche oder -messungen

4. Pharma- und Biopartikeltechnik

Der Bereich Pharma- und Biopartikeltechnik sitzt als Teil des iPAT am Zentrum für Pharmaverfahrenstechnik – PVZ. Dort erstrecken sich die Forschungsaufgaben über die Abteilungen „Biologisch-Pharmazeutischen Prozesstechnik“, „Formulierung und Verpackungstechnologie“ sowie „Mikroapparate und Analytik“. Zum einen werden biotechnologische Prozesse auf der mikroskopischen wie auch der makroskopischen Skala im Grenzgebiet zwischen Biotechnologie, Pharmazie und Partikeltechnik untersucht. Die Betrachtung von Mikroorganismen und Proteinpartikeln als biologische Partikel erlaubt die Anwendung von Erkenntnissen und Methoden sowohl aus den biologischen als auch den ingenieurwissenschaftlichen Wissensgebieten. Somit können z.B. Zellwänden Kennwerte bezüglich ihrer mechanischen Eigenschaften zugeordnet werden, die sonst nur im Ingenieurwesen Anwendung finden, oder auch Proteinkristalle bezüglich des Einflusses ihrer Aminosäuresequenz auf ihre mechanischen Eigenschaften untersucht werden.

Darüber hinaus fokussiert der Bereich auf die Formulierung, die Charakterisierung der Herstellungsprozesse und die Untersuchung von Arzneiformen. Dabei werden die pharmazeutisch wirksamen Arzneistoffe mit Hilfsstoffen über definierte Prozesse wie bspw. Nanomahlung, Granulierung und Tablettierung so zusammengeführt, dass sie handhabbare Arzneiformen ergeben. Es werden Formulierung und Prozess so entwickelt und verbessert, dass die Produkte den Anforderungen bspw. an den Applikationsort, die Wirksamkeit/Bioverfügbarkeit und die Freisetzungskinetik entsprechen. Hier ist es besonders wichtig, die Prozess-Struktur-Eigenschaftsbeziehungen dieser Verfahren kennen zu lernen, um Modelle zu entwickeln und zukünftig die bisher sehr empiriebasierte Entwicklung physikalisch begründet und vorhersagbarer realisieren zu können. Hier wird aktuell insbesondere die Herstellung und Weiterverarbeitung von Wirkstoffnanosuspensionen sowie der Tablettierungsprozess (Fließ- und Kompaktierungsverhalten, Mehrstoffgemische und Mehrschichttabletten) eingehend untersucht.

Bei Mikroapparaten und Analytik wird insbesondere die Auslegung und verfahrenstechnische Charakterisierung von mikrofluidischen Systemen untersucht. Diese können bspw. für das Screening von Formulierungen eingesetzt werden sowie der Partikelklassierung oder der Analyse des Strömungsverhaltens in Mikrosystemen (micro particle image velocimetry) dienen. So interagieren diese Arbeiten auch mit der biologisch-prozesstechnischen und Formulierungsforschung.

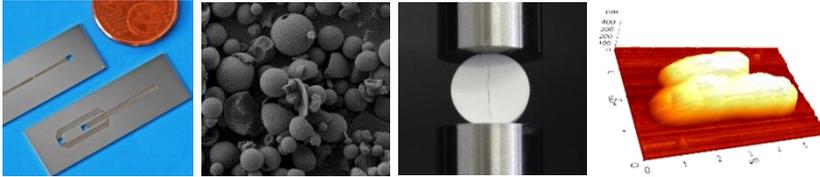


Abb. 9.5 Mikrosystem für Emulgierung (links), Granulat mit Wirkstoffnanopartikeln (Mitte links), mechanische Testung einer Tablette (Mitte rechts), Rasterkraftmikroskopische Aufnahmen von *Escherichia coli* (rechts).

Zur Wissensgenerierung in diesen diversen Anwendungsfeldern kommen neben der Prozesstechnik (Mikrobioreaktoren bis Fermentern, Mühlen, Granulatoren, Compaction Simulator, Coater, etc.) in der Analytik neben Standardmethoden auch hochentwickelte Messgeräte wie beispielsweise das Rasterkraftmikroskop (AFM), Rasterelektronenmikroskop mit fokussiertem Ionenstrahl (REM-FIB), Raman-Mikroskop und der Nanoindenter zum Einsatz. Um ein besseres Verständnis insbesondere der Mikroprozesse zu erreichen, werden in allen Anwendungsfeldern auch numerische Methoden, wie bspw. die Diskrete Elemente Methode (DEM) verwendet. Wo passend und notwendig werden diese auch mit fluiddynamischen Simulationen gekoppelt (CFD-DEM).

5. Pulver- und Suspensionsprozesse

Der Bereich der Pulver- und Suspensionsprozesse deckt die Grundoperationen der mechanischen Verfahrenstechnik produktunabhängig ab. Dazu zählen neben den bereits traditionellen Forschungszweigen der Schüttgut- und Zerkleinerungstechnik auch das Mischen und Trennen von Partikeln. Alle Verfahren werden einzeln oder kombiniert betrachtet und auf Grundlagenbasis charakterisiert und modelliert. Darüber hinaus werden produktspezifische Prozesse und Maschinen gestaltet, die sehr stark variieren können. So reicht das derzeitige Produktportfolio von organischen Materialien wie Feinchemikalien, Naturprodukten (Cellulosen, Getreide) oder Abfallstoffen (Pressholzplatten) hin zu anorganischen Materialien die im Energiespeichersektor (Silizium, Kohlenstoffe), in der Keramikbranche (Oxide, Carbide, Nitride) oder im Aufbereitungs- und Mineralienssektor (Zemente, Erze, Quarze, etc.) Anwendung finden. So divers die Produkte sind, so vielfältig sind auch Anforderungen, Produktionsraten und die dazugehörige Messtechnik.

Dementsprechend verfügt der Bereich über Maschinen und Apparate, die sowohl wenige Milligramm als auch mehrere Kilogramm pro Stunde verarbeiten können. Die Expertise umfasst dabei insbesondere die Herstellung und Formulierung von Suspensionen im Mikro- und Nanometerbereich, sowie die Handhabung und Herstellung von trockenen Pulvern über Misch-, Klassier- und Zerkleinerungsprozesse. Die Lagerung und der Transport von trockenen Pulvern bilden einen Schwerpunkt in der Grundlagenforschung. Je nach Produktanforderungen arbeiten wir auch an der Weiter- bzw. Neuentwicklung von geeigneten Maschinen, Apparaturen und Messeinrichtungen.

Generell ist eine Vielzahl an Charakterisierungsmethoden für die Untersuchung und Bewertung der Prozessschritte und der erhaltenen Produktqualitäten vorhanden. Im Suspensionsbereich ist neben den Partikelgrößen (DLS, Sedimentation, Ultraschall, Laserbeugung) vor allem Rheologie (Rheometer, Ultraschall), Stabilität (Zetapotential) und Zusammensetzung (ICP-OES, AAS) der Suspension zu erwähnen. Im trockenen Bereich spielen neben der Partikelgröße, Oberflächeneigenschaften (BET, IGC, Porosimetrie), Fließfähigkeiten (Schergäräte) und Partikel(kollektiv)form (μ CT, Formanalysen) eine entscheidende Rolle.

Die aktuellen Forschungsthemen setzen sich wie folgt zusammen:

- Nanozerkleinerung und Formulierung von organischen und anorganischen Partikeln z.B. für Farb-, Pharma- und Batterieanwendungen.
- Entwicklungen von Trennmethoden bei der Nanozerkleinerung für möglichst kontaminationsarme Prozesse in Rührwerkskugelmühlen
- Grundlagenforschung im Bereich der nassen Mehrkomponentenzerkleinerung
- Entwicklung von Prozessmodellen für die Nass- und Trockenzerkleinerung
- Beschreibung der physikalischen Vorgänge in Mühlen mit Hilfe von Simulationsmethoden
- Charakterisierung der Wirkungen von Additiven bei trockenen Feinstzerkleinerungs- und Klassierprozessen
- Beschreibung des Bruch- und Einfangverhaltens bei der trockenen Zerkleinerung in Mahlkörpermühlen
- Nutzung von Mühlen für Prozesse mit Fokus auf chemische oder thermische Umsätze
- Beschreibung des Fließverhaltens von Schüttgütern mit speziellen Partikelformen

9.4 Zusammenarbeit und Kooperation

Zusammenarbeit mit Universitäten und Forschungseinrichtungen im In- und Ausland

Allgemein kooperiert das Institut für Partikeltechnik umfangreich mit Instituten innerhalb der TU Braunschweig. Außerdem bestehen über DFG- und regionale Verbundprojekte in ganz Deutschland (Clausthal, Duisburg-Essen, Hannover, Göttingen Karlsruhe, Münster, Aachen, Ulm, ...) Kooperationen. Des Weiteren arbeiten wir mit Universitäten im Ausland wie beispielweise der Niederlande, Frankreich, England und Österreich zusammen.

Innerhalb von Industrieprojekten verfügt das Institut zudem über eine Reihe von Partnern insbesondere im Bereich der chemischen Industrie.

Zusammenarbeit mit Industrieunternehmen im In- und Ausland

- | | |
|--------------------------------|--------------------------------|
| ▪ BASF SE | ▪ Novartis Pharma GmbH |
| ▪ VW AG | ▪ Salutas Pharma GmbH |
| ▪ Polysius AG | ▪ Solvay AG |
| ▪ Rockwood Lithium AG | ▪ Electrocyling GmbH |
| ▪ I+ME Actia GmbH | ▪ Wacker AG |
| ▪ Hosokawa Alpine AG | ▪ Netzsch Feinmahltechnik GmbH |
| ▪ Litarion GmbH | ▪ Daimler AG |
| ▪ Netzsch Feinmahltechnik GmbH | ▪ Electrocyling GmbH |
| ▪ Evonik | |

9.5 Ausstattung des Instituts für Partikeltechnik

Das Institut verfügt über eine Vielzahl an Geräten und Analysemethoden von diesen nachfolgend einige aufgelistet und kurz erläutert werden.

Prüfstände für

- Elektrochemische Charakterisierung von Batteriezellen
- Mechanische und strukturelle Charakterisierung von Beschichtungseigenschaften (z. B. Haft-/Zugfestigkeit)
- Elektrochemische Impedanzspektroskopie
- Mechanische und strukturelle Charakterisierung von Tabletteneigenschaften

Geräte

- BET-Oberflächenmessgerät
- Dissolver, Dreiwalze, Laborknetter/Korbmühle
- Diverse Rührwerkskugelmühlen
- Diverse Beschichtungsverfahren
- Edelstahlautoklav zur Synthese
- Elektrochemisches Testzelllabor
- Elektrodentechnikum
- Hochdruckhomogenisator
- Inverse Gaschromatographie
- Jenike-/Ring-Schergerät
- Lambdameter
- Materialprüfmaschinen
- Mikro-PIV
- Nanoindenter
- Oberflächenmessgerät (Rauigkeit)
- Optische Transmissions- und Rückstreuungsmessung
- Quecksilberporosimeter
- Rasterkraftmikroskop
- Reinstatmosphärenbox (Glovebox)
- Rheometer
- Röntgenmikrotomographie
- Scherspalthomogenisator
- Silozentrifuge
- Sprühtrockner
- Synthesereaktoren
- Tablettensimulator mit Mischer
- Tauchbeschichter
- Thermogravimetrische Analyse
- Ultraschallhomogenisatoren
- Ultraschallspektrometer einschl. Zetapotentialmessung
- Wirbelschichtgranulator

9.6 Themenbeispiele für Studien-, Diplom-, Bachelor- oder Masterarbeiten

Batterieverfahrenstechnik

- Lösungsmittelfreie Prozessierung von sulfidbasierten Kompositkathoden für Feststoffbatterien
- Untersuchung des Einflusses verschiedener Trocknerprofile für die Elektrodenproduktion
- Solvent-based synthesis and processing of sulfide electrolytes for all-solid-state batteries“.
- Untersuchung des Thermal Runaways an Lithium-Ionen Batterien durch Quetschbeanspruchung
- Etablierung einer empirischen Gleichung zur Bestimmung der Trocknungsrate von Batterieanoden
- Prozess- und Systementwicklung zur Strukturierung von Batterieelektroden
- Zukunftstechnologie Brennstoffzelle -MEA- Bachelor-, Studien-, Masterarbeiten
- Ermittlung des Einflusses der Kathodenstruktur auf Produkte des Thermal Runaway von LiB
- Entwicklung und Charakterisierung multifunktionaler Materialien für die Strukturintegration von Batterien
- Experimentelle Untersuchung des Trocknungsprozesses
- Untersuchung des Extrusionsprozesses für die kontinuierliche Herstellung von Suspensionen zur Herstellung von Lithium-Ionen-Batterien
- Mechanochemische Synthese und Charakterisierung von sulfidischen Festelektrolyten
- Simulation des Trocknungs- und Kalandrierprozesses von Batterieelektroden
- Kurzschlussuntersuchung an LIBs mit NCA-Kathode
- Kurzschlussuntersuchung an LIBs mit NCM622-Kathode
- Untersuchung der Vakuum-Argon-Nachtrocknung an Elektrodencoils
- Eigenschaftsoptimierte sulfidische Festkörperbatterien
- Charakterisierung von trockenen Pulvermischungen für die Lithium Ionen Elektrodenfertigung
- Strukturierungskonzepte für hochkapazitive Elektroden
- Prozessieren von polymerbasierten Feststoffbatterien
- Etablierung einer Methode zur Messung von Partikelgrößen von Batteriematerialien
- Die Rührwerkskugelmühle als potentielle Alternative zur kontinuierlichen Herstellung von Anodensuspensionen
- Intensivmischprozess zur Vorstrukturierung von Pulvern für die Herstellung von Elektroden für BEV- Anwendungen
- Effiziente und innovative Herstellung von Elektroden („Einschrittanlage“)

Nanomaterialien

- Einsatz definierter Nanofluide für tribologische Anwendungen
- Experimentelle und modelhafte Betrachtung der Migration von Zinkoxid Nanopartikeln im elektrophoretischen Experiment
- Synthese von Hybridelektrolyten für All-Solid-State Li-S Batterien
- Synthese von Festelektrolyten für All-Solid-State Batterien
- Synthese von komplexen Hybridnanopartikelsystemen zur Anwendung in der biomedizinischen Industrie
- Synthese eines Core-Shell-Nanopartikelsystems unter gleichzeitiger Optimierung der spezifischen Eigenschaften
- Inbetriebnahme einer 2D-Gelelektrophoresekammer zur Fraktionierung von Nanopartikeln
- Selektive Oberflächenfunktionalisierung von Nanopartikeln zur Herstellung von Nanokompositen für den Faser- verbundleichtbau
- Herstellung von LiNbO₃-Nanopartikeln zur Verwendung in Li-Festkörperbatterien
- Herstellung von Kathodenkompositen für All-Solid-State Batterien
- Herstellung, Charakterisierung und Funktionalisierung von Quantenpunkten
- Synthese und Anwendung von magnetischen Quantenpunkten

Partikelsimulation und Funktionsstrukturen

- Simulation des mikromechanischen Verhaltens von Pelletstrukturen filamentöser Mikroorganismen mittels DEM
- Künstliche Intelligenz mit innovativem Framework (Neuronale Netze, Genetische Algorithmen, ...)
- Kalibrierung und Validierung eines Kontaktmodells in DEM-Simulationen von Kompaktierungsprozessen
- Modellierung der Verweilzeit in Rührwerkskugelmühlen
- Einfluss von Prozessparametern in Kreislauffahrweise
- Charakterisierung von Kalibrieraufbauten
- Konstruktion und Aufbau einer Simulationsumgebung für einen Pralltester
- Bruchverhalten von Batteriematerialien
- Simulation einer Kristallindentation mit der Diskrete Elemente Methode (DEM)
- Materialcharakterisierung zur datengetriebenen prädiktiven Modellierung mittels Künstlicher Intelligenz (KI)
- Zukunftstechnologie Brennstoffzelle -MEA- Bachelor-, Studien-, Masterarbeiten
- Konstruktion und Aufbau eines piezo-gesteuerten Versuchsstandes zur Mikrodosierung von Pulvern
- Untersuchung des Fließverhaltens von Mondregolithsimulanten
- Charakterisierung von Modell-Partikeln
- Zukunftsweisendes Projekt – Künstliche Intelligenz in der Zerkleinerung
- CFD-DEM Simulationen und Modellierung von Geschwindigkeitsverteilungen
- Modellierung des Bruchverhaltens von Aggregatstrukturen
- Herstellung und Untersuchung gefüllter und funktionalisierter Filamente für den 3D-Druck
- Simulation von Zerkleinerungsprozessen
- Durchführung und Validierung von CFD-DEM-Simulationen für gerührte und geschüttelte Bioreaktoren
- CFD -DEM Simulationen von Rührwerkskugelmühlen
- CFD-DEM Simulationen von Partikelwechselwirkungen

Pharma- und Biopartikeltechnik

- Einfluss der Rührflügel- und Stempelgeometrie auf die Befüllung in Rundlauftablettenpressen
- Abrasionsverhalten von Pellets in Rundlauftablettenpressen
- Industrierelevante Entmischung in Rundlauftablettenpressen
- Simulation des mikromechanischen Verhaltens von Pelletstrukturen filamentöser Mikroorganismen mittels DEM
- Kalibrierung und Validierung eines Kontaktmodells in DEM-Simulationen von Kompaktierungsprozessen
- Untersuchung der Permeabilität und des Entlüftungsverhaltens von Pulverbetten
- Mikromechanische Charakterisierung von Proteinaggregaten
- Flauschige (aber feste) Inhalationspartikel
- Entwicklung einer Methode zur Stabilisierung von Wirkstoff-Nanopartikeln mittels Zr-Komplexen
- Charakterisierung des Einflusses der Walzenkompaktierung auf die Tablettierung
- Einfluss von Prozess- und Formulierungs- parametern bei der Trocknung von Wirkstoff-Nanosuspensionen
- Einfluss von Formulierungs- und Prozessparametern bei der Feinstzerkleinerung pharmazeutischer Wirkstoffe
- Verarbeitung von Wirkstoff- Nanosuspensionen zu Tabletten
- Entwicklung eines Prozessmodells: Matrizenbefüllung in einer Rundlauftablettenpresse
- Untersuchung der Prozesskette von pharmazeutischen Pulvern zur Tablette
- Bestimmung der notwendigen mechanischen Eigenschaften zur Prozessierung von Tabletten
- Analyse der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Tablettierbarkeit von pharmazeutischen Pulvern
- AFM-basierte Oberflächencharakterisierung von quervernetzten Proteinkristallen
- Charakterisierung des viskoelastisch-plastischen Verhaltens von CLECs

- Mechanische Beanspruchung von quervernetzten Proteinkristallen
- Gezielte Oberflächenmodifizierung von Mikropartikeln zur Optimierung von biotechnologischen Kultivierungen
- Durchführung und Validierung von CFD-DEM-Simulationen für gerührte und geschüttelte Bioreaktoren
- Tablettenherstellung – Füllrichtung als qualitätsbestimmendes Bauteil
- Mehrschichttabletten – Vom Labor in die Produktion
- Fallstricke in Prozessen der Pharmazeutischen Industrie: Materialablagerungen bei Zerkleinerungs- und Transportprozessen

Pulver- und Suspensionsprozesse

- Steigerung der Fließfähigkeit von Metallpulvern für den Laser-3D-Druck durch mechanische Verfahren
- Etablierung eines Feinstzerkleinerungs-Prozesses für Metalle
- Kohlenstoffversetzte-Silikatwerkstoff-Pasten für den Pasten-3D-Druck
- Steigerung der Fließfähigkeit von Wolfram-Metallpulver durch Granulation
- Kohlenstoffversetzte-Silikatwerkstoff-Pasten für den Pasten-3D-Druck
- ScaleUp von Rührwerkskugelmühlen
- Etablierung und Evaluation eines Wolfram-Feinstzerkleinerungs-Prozesses
- Etablierung eines Verarbeitungsprozesses für Pigmentsuspensionen zur Herstellung hochqualitativer Aquarellfarben
- Kontinuierliche Trockenzerkleinerung in Kugelmühlen mit Mahlhilfsmittelzusätzen
- Modellierung von Scherspannungen Auswirkungen auf die Partikelabnutzung / Modelling of shear stresses effects on particles attrition
- Konstruktion und Aufbau eines piezo-gesteuerten Versuchsstandes zur Mikrodosierung von Pulvern
- Fließtechnische Charakterisierung von Biomasse- und faserartigen Partikeln neuartigen Durchbruchapparat
- Beurteilung der Grenzen von Ringschergeräten/ Austesten neuer Deckelgeometrien
- Modellierung des Bruchverhaltens unter Mehrfachbeanspruchung
- Modellierung der Partikelagglomeration bei der Trockenvermahlung
- Herstellung und Untersuchung gefüllter und funktionalisierter Filamente für den 3D-Druck
- Modellierung von Kreislaufprozessen innerhalb der RWKM
- Viskositätseinflüsse innerhalb von Rührwerkskugelmühlen
- Dynamisches Zerkleinerungsverhalten
- Modellentwicklung zur Bruchfunktion auf der Zweiwalze
- Farb-Coatings für transparente High-Tech-Schichten
- Feinstzerkleinerung von Mehrstoffsystemen in Rührwerkskugelmühlen
- Herstellung von Nano-Silizium und Graphen durch Zerkleinerung für die Entwicklung innovativer Lithium Ionen Batterien
- Charakterisierung/Fließeigenschaften von Biomasse-, Recycling- und faserartigen Partikeln
- Konstruktion eines Versuchsstandes zur Untersuchung des Einflusses der Raketgeometrie auf ein Pulverbett
- Innovation in der Zementindustrie: Trockene Feinzerkleinerung mit Rührwerkskugelmühlen
- Trockene Feinzerkleinerung: Verweilzeitverhalten in Mahl- und Sichtkreisläufen
- Fallstricke in Prozessen der Pharmazeutischen Industrie: Materialablagerungen bei Zerkleinerungs- und Transportprozessen



10 Institut für Thermodynamik

Technische Universität
Braunschweig
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Köhler

Hans-Sommer-Str. 5
38106 Braunschweig
Tel.: (0531) 391-2627
Fax: (0531) 391-7814
ift@tu-braunschweig.de
<https://www.tu-braunschweig.de/ift>

Institutsleitung:	Prof. Dr.-Ing. Jürgen Köhler	391- 2627
Privatdozentin:	Priv.-Doz. Dr.-Ing. Gabriele Raabe	391- 2628
Sekretariat:	Astrid Lootz	391- 2627
Wissenschaftliche Mitarbeiter:		
Dipl.-Ing. Jan Bode	391- 7895	M.Sc. Maximilian Lütke 391- 7866
M.Sc. Niklas Brandt	391- 2633	Dipl.-Ing. Sven Packheiser 391- 7893
Dipl.-Ing. Martin Buchholz	391- 2636	M.Sc. Markus Pollak 391- 2632
M.Sc. Daniel Domin	391- 7898	M.Sc. Sahar Rabet 391- 2637
M.Sc. Jana Friese	391- 7890	
M.Sc. Hamidreza Hassani Khab Bin	391- 2639	M.Sc. Andreas Schulte 391- 3020
M.Sc. Maximilian Hebel	391- 7892	M.Sc. Michael Steeb 391- 7843
Dipl.-Ing. Steffen Heinke	391- 7894	Dr.-Ing. Wilhelm Tegethoff 391- 7815
M.Sc. Jan Friedrich Hellmuth	391- 7818	M.Sc. Jakob Trägner 391- 7897
M.Sc. Magnus Lenger	391- 7851	M.Sc. Max Wagenblast 391- 2627
Dr.-Ing. Nicholas Lemke	391- 2631	
M.Sc. Tobias Lüf	391- 7896	
Studienfachberatung:	Dipl.-Ing. Martin Buchholz 391- 2636	
	M.Sc. Daniel Domin 391- 7898	

10.1 Module für Bachelor- und Masterstudiengänge

Module für Bachelorstudiengänge

Thermodynamik	WS	6 LP	3 VL/1 Ü/1 S	Köhler
Wärme- und Stoffübertragung	SS	5 LP	2 VL/2 Ü/1 S	Köhler
Projektarbeit für Energie-, Verfahrens- und Bioverfahrenstechnik	WS	6 LP		alle Dozenten der Fachrichtung
Theoretische, experimentelle, konstruktive und planerische Bachelorarbeiten	WS/SS	14LP		Köhler, wiss. Mitarbeiter

Module für Masterstudiengänge

Thermodynamik der Gemische	WS	5 LP	2 VL/2 Ü	Raabe
Objektorientierte Simulationsmethoden der Thermo- und Fluidodynamik	WS/SS	5 LP	2 VL/1 Ü	Köhler / Tegethoff
Modellierung thermischer Systeme in Modelica	WS/SS	5 LP	2 VL/1 Ü	Köhler / Tegethoff
Fahrzeugklimatisierung	WS	5 LP	2 VL/1 Ü	Köhler / Lemke
Fahrzeugklimatisierung mit Labor	WS	7 LP	2 VL/1 Ü/2 L	Köhler / Lemke
Thermodynamics and Statistics	SS	5 LP	2 VL/2 Ü	Köhler
Molekulare Simulation	SS	5 LP	2 VL/2 Ü	Raabe
Molekulare Simulation mit Labor	SS	7 LP	2VL/1 Ü/2 L	Raabe
Molekulare Modellierung und Simulation biologischer und pharmazeutischer Systeme	SS	5 LP	2 VL/1 Ü	Raabe
Nachhaltige (Ab-)Wärmenutzung	SS	5 LP	2 VL/1 Ü	Köhler / Lemke
Theoretische, experimentelle, konstruktive und planerische Studienarbeiten	WS/SS	15 LP		Köhler / Raabe, wiss. Mitarbeiter
Theoretische, experimentelle, konstruktive und planerische Masterarbeiten	WS/SS	30 LP		Köhler / Raabe, wiss. Mitarbeiter

Fachlabore

Labor zur Vorlesung Fahrzeugklimatisierung	WS	2 LP	2 L	Köhler / Lemke
Labor zur Vorlesung Molekulare Simulation	SS	2 LP	2 L	Raabe
Labor zum interdisziplinären Forschungsmodul Batterie	WS/SS	6 LP		Köhler/ Schröder Kwade

10.2 Inhalte der Lehrveranstaltungen

Thermodynamik

- Grundbegriffe der Thermodynamik
- Bilanzen und Erhaltungssätze
- Thermodynamische Relationen
- Fundamentalgleichungen und Zustandsgleichungen
- Grundlegende thermodynamische Zustandsänderungen und Prozesse
- Gleichgewichtsbedingungen
- Arbeitsvermögen und Exergie
- Ideales Gas
- Reale Stoffe
- Thermodynamische Prozesse
- Feuchte Luft

Wärme- und Stoffübertragung

- Wärmeübertrager
- Eindimensionale stationäre Wärmeleitung
- Mehrdimensionale instationäre Wärmeleitung
- Konvektive Wärmeübertragung ohne Phasenwechsel
- Konvektive Wärmeübertragung mit Phasenwechsel
- Wärmestrahlung
- Strahlung schwarzer Körper
- Strahlungseigenschaften realer Körper
- Strahlungsaustausch
- Diffusion, konvektiver Stofftransport

Thermodynamik der Gemische

- Einführung in die Thermodynamik der Gemische: Grundbegriffe, Gemische idealer Gase und Gas-Dampf-Gemische (Feuchte Luft)
- Fundamentalgleichung von Gemischen und das chemische Potential
- Der erste Hauptsatz für Systeme mit veränderlicher Stoffmenge
- Zustandsgleichungen, Eulersche Gleichung und die Gleichung von Gibbs-Duhem
- Gibbssche Phasenregel und Phasendiagramme
- Thermodynamische Potentiale und Zustandsgrößen realer Gemische
- Phasenzerrfall und Phasengleichgewichte: Gleichgewichtsbedingungen, Berechnung von Phasengleichgewichten, Konsistenzkriterien, Differentialgleichungen der Phasengrenzkurven
- Thermodynamik der chemischen Reaktionen, inkl. Verbrennung und Brennstoffzelle

Objektorientierte Simulationsmethoden in der Thermo- und Fluidodynamik

- Grundlagen der Formulierung und Implementierung von gewöhnlichen Differenzialgleichungen, algebraischen Gleichungen und diskreter Gleichungen zur Beschreibung thermischer und fluidtechnischer Systeme.
- Theorie und Implementierung entsprechender numerischer Lösungsverfahren sowie deren Anwendung auf hybride Gleichungssysteme.
- Aufbau einer grafischen Oberfläche mit der Qt Bibliothek, sowie Einführung in weitere Python-Bibliotheken für Visualisierung und wissenschaftliches Rechnen.
- Praktische Beispiele: thermische Solaranlage, Postprocessing und FMI-Standard.
- Mit dem Abschlussprojekt und in der Abschlussprüfung zeigen die Teilnehmer, dass Sie eigenständig eine Simulationsumgebung mit Modelldefinition, numerischen Lösungsverfahren, Nutzerführung und Visualisierung umsetzen können.

Modellierung thermischer Systeme in Modelica

- Objektorientierte und gleichungsbasierte Formulierung von hybriden Algebra-Differenzialgleichungssystemen (hybride ADGL-Systemen) zur Beschreibung physikalischer Systeme mit Hilfe der Simulationssprache Modelica (www.modelica.org)
- Numerische Lösungsverfahren: DGL-Integration, Residuen-Iteration, Ereignisdetektion.
- Praktische Beispiele am Computer: Aufbau eigener objektorientierter Modellbibliotheken, Beschreibung von physikalischen Bilanzen und Transportprozessen unter Einbindung existierender Stoffdaten-Bibliotheken, stationäre und transiente Modellierung verschiedener thermischer Komponenten und Systeme.
- Mit dem Abschlussprojekt und in der Abschlussprüfung zeigen die Teilnehmer, dass Sie eigenständig eine objektorientierte, gleichungsbasierte Modellbibliothek erstellen können und die erforderlichen numerischen Lösungsverfahren verstehen.

Fahrzeugklimatisierung

- Theoretische Grundlagen der Fahrzeugklimatisierung (thermischer Komfort, Heiz- und Kälteleistung)
- Fahrzeugklimatisierung als relevante Komponente in der E-Mobilität
- Praktische Umsetzung und Anwendung in aktuellen Beispielen
- Komponenten der Fahrzeugklimaanlage
- Auslegung des Kältemittelkreislaufs und des Kälteprozesses
- Aktuelle Fragestellungen des thermischen Fahrzeugmanagements (Batterieelektrische Fahrzeuge, Brennstoffzellenfahrzeuge, Temperierung von Komponenten, z.B. Leistungselektronik, Antriebsmotoren oder weitere periphere Systeme)
- Diskussion von aktuellen Kälteprozessen und zukünftigen Alternativen
- Klimatisierung von Flugzeugen und Schiffen

Labor zur Vorlesung Fahrzeugklimatisierung

Das Institut bietet zur Vorlesung ein Laborpraktikum mit 3 Versuchen an.

1. Betrieb einer PKW-Klimaanlage
2. Demonstration des kritischen Punktes reiner Stoffe
3. Untersuchung eines Kaltdampfprozesses

Thermodynamics and Statistics

- Classical Thermodynamics: Introduction, Historical Background and Goals
- Basic Considerations: Thermodynamic Systems, Extensive and Intensive Properties and Process Variables
- Balances and Conservation Laws: General Form of a Balance, Mass Balance, Mass Balance for Mixtures, Momentum Balance, Energy Balance and Entropy Balance
- Thermodynamic Relations: the Euler Equation, the Gibbs-Duhem Relation, the Enthalpy, the Helmholtz Free Energy, the Gibbs Free Energy and Maxwell Relations
- Fundamental Equations: Thermal and Caloric Equations of State, Entropy and Volume as Functions of p and T , Energy Relations as Functions of p and T
- Heat and Work Interactions: Isobaric, Isochoric, and Isothermal Changes of State, Heat Capacity, Adiabatic and Isentropic Change of State, Polytropic Change of State and the Carnot Cycle
- Equilibrium Criteria: Phase Equilibria, Lowest-Energy Principle
- Availability and Exergy: Exergy of Open Systems, Exergy of Closed Systems, Exergy of Heat and Lost Available Work
- Ideal Gas: Thermal Equation of State, Caloric Equation of State and Heat Capacities, Changes of States of Ideal Gases
- Real Substances: Basic Considerations, Properties of a Two-Phase Mixture, Phase Diagrams, Equations of State, Vapor-Liquid Equilibrium, Clausius-Clapeyron Relation, Gibbs Phase Rule, Joule-Thomson Effect, Speed of Sound and Changes of State
- Statistical Thermodynamics: Foundations, Thermodynamic and Quantum States, Microstate, Macrostate, and Probability, Equilibrium Conditions, the Molecular Partition Function, a General Method of Approach and Statistics
- Applications: Equipartition, Solids, Ideal Gas, Real Fluids

Molekulare Simulation

- Grundlagen aus der statistischen Thermodynamik: Begriff des Ensembles, Zustandssummen, Zustandssumme des idealen Gases, Maxwell-Boltzmann-Geschwindigkeitsverteilung
- Monte Carlo Simulation: Important Sampling, Simulation in verschiedenen Ensembles, spezielle Algorithmen zur Simulation von Phasengleichgewichten, Biased Sampling
- Molekulardynamik: Finite Differenzen Methoden, Bestimmung von Stoffeigenschaften, Simulation in verschiedenen Ensembles, Thermostate und Barostate, Simulation von Molekülen
- Modelle zur Beschreibung der Wechselwirkungsenergie: Arten der intra- und intermolekularen Wechselwirkungen und ihre Modellierungsansätze, verschiedene Arten von Kraftfeldmodellen
- Simulationstechniken: Initialisierung einer Simulation, periodische Randbedingungen, Nachbarlisten, Ewaldsumme, Übungen mit Simulationsprogrammen

Labor zur Vorlesung Molekulare Simulation

Eigenständige Durchführung von Simulationen unter Verwendung von weit verbreiteten Simulationsprogrammen; Implementierung der molekularen Modelle, Ausarbeitung von Simulationsprotokollen, Initialisierung und Durchführung der Simulation, Analyse und Interpretation der Simulationsergebnisse

Molekulare Modellierung und Simulation biologischer und pharmazeutischer Systeme

- Grundbegriffe der statistischen Thermodynamik
- Einführung in die Molekulardynamik
- Kraftfeldmodelle (Force Fields) für biologische und pharmazeutische Systeme, Coarse Graining Ansätze
- Simulationstechniken, Durchführung und Auswertung von Simulationen, Umgang mit Simulations- und Visualisierungsprogrammen
- Methoden zur Ermittlung der freien Energie mit verschiedenen Anwendungen: Löslichkeiten, Konformationsänderung, Ligandenbindung

Nachhaltige (Ab-)Wärmenutzung

- Grundlagen technischer Thermodynamik: Bilanzierung, Prozessgrößen, Exergie, Kreisprozesse, Wärmeübertragung
- Einordnung unterschiedlicher Abwärmequellen: Industrie, Verkehr, natürliche Quellen
- Wärmedämmung, -Speicherung und -Transport: sensible, latente & thermo-chemische Wärmespeicher, Fernwärme, Heat Pipes
- Prozesse und Verfahren zur Wärmenutzung: Wärmepumpen, Organic Rankine Cycle, Kalina-Prozess, Stirling-Prozess, Joule-Prozess, Thermoelektrik, Absorptions- & Adsorptionskälteanlage, sorptionsgestützte Klimatisierung
- Systeme und Betriebsstrategien: Exergetische Analyse & Optimierung

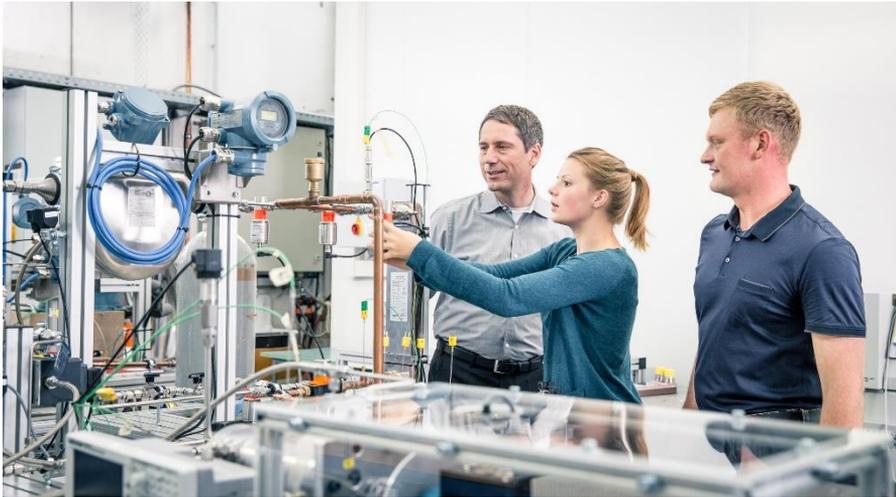
Labor zum interdisziplinären Forschungsmodul Batterie

Elektrische und thermische Modellierung von Batteriezellen und -modulen auf Systemebene in der Modellierungssprache Modelica. Untersuchung und Bewertung verschiedener Kühlstrategien für den Einsatz in elektrifizierten Fahrzeugen.

Thermische Energiesysteme

Die Arbeitsgruppe hat das Ziel cyber-physische komplexe thermische Energiesysteme entwerfen, verstehen, regeln und optimieren, um sie in alternative Fahrzeugkonzepte sowie in die „Stadt der Zukunft“ integrieren zu können.

Die Arbeitsgruppe Thermische Energiesysteme erforscht batterie-elektrische Pkw, Brennstoffzellen-Lkw sowie Wasserstoff in der Luftfahrt, Wasserstoff-Speicher und -Betankungssysteme. Ebenso werden Trockner, Kläranlagen, Wärmepumpen, Kälteanlagen und Klimaanlage untersucht. Die Arbeitsgruppe analysiert Komponenten wie Batterien, Brennstoffzellen, Verdichter, Wärmeübertrager, Stoffübertrager, thermo-elektrische Module und Ejektoren. Neuartige Regelungstechniken entstehen. Das natürliche Kältemittel R744 steht im Fokus vieler Forschungsarbeiten. Moderne System- und CFD-Simulationsmethoden sowie neuartige Messtechniken kommen zum Einsatz. Die Arbeitsgruppe kooperiert national und international mit zahlreichen Forschungseinrichtungen und Firmen.



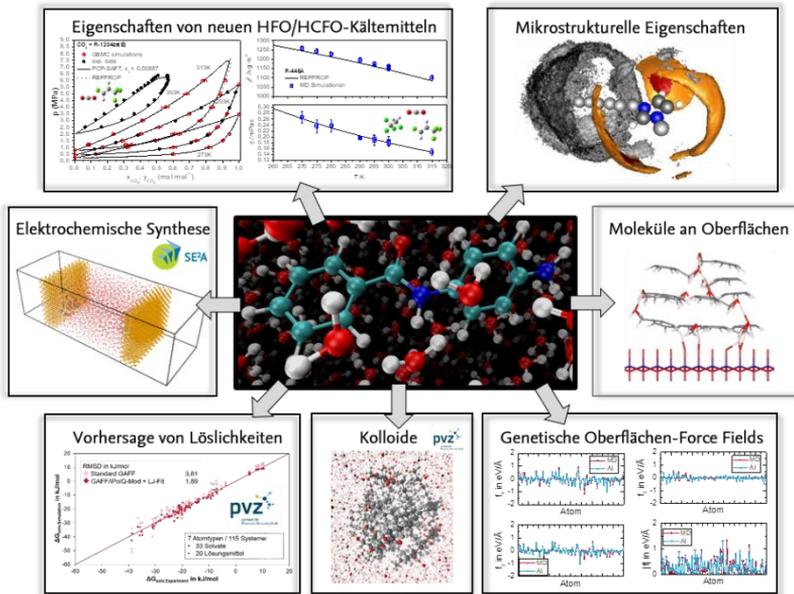
Aktuelle Forschungsthemen sind:

- Abwärmenutzung in mobilen Anwendungen mit Rankine Cycle, Thermoelektrik und Ejektorsystemen (Hebeler)
- Ölmanagement in Wärmepumpensystemen (Domin)
- Kälteanlagen mit Ejektoren / Erforschung der Strömung in Kältemittelsejektoren (Brandt)
- Regelungstechnik und Fehlerdiagnose in Kälteanlagen (Schulte)
- Systemanalyse und energetische Optimierung von Wärmepumpentrockner inkl. neuartiger Technologien (Brandt)
- H₂-Tankstellen und Betankungssysteme (Heinke/Lenger)
- Analyse und Optimierung von Brennstoffzellensystemen für Pkw, Lkw und Flugzeug (Heinke/Pollak/Wagenblast/Lenger)
- Wärmeübertragung und Thermomanagement, in Batteriesystemen (Steeb/Hellmuth)
- Thermomanagement, Degradation und Sicherheit in Batteriesystemen (Steeb/Hellmuth)
- Thermomanagement im Supermarkt: Erforschung neuartiger Regelstrategien und Bewertung neuartiger Gesamtsystemtopologien (Schulte/Friese)
- Betriebsstrategie und Regelung komplexer thermischer Systeme (Friese)
- Maschinelles Lernen für die Regelung thermischer Systeme (Friese)
- Genaue, robuste und effiziente Modellierung von Stoffdaten (z.B. Kältemittel, Kältemittel-Öl-Gemische und Gas-Gemische) und Wärmeübertrager für die transiente Systemsimulation (Hassani)

- Theoretische und experimentelle Untersuchung der Wärme- und Stoffübertragung in Membranbefeuchtern (Pollak)
- Degradation von PEM-Brennstoffzellenstapel (Trägner)
- Analyse thermischer Schlammaufbereitungskonzepte für Kläranlagen (Hassani)
- Thermomanagement inkl. HVAC-Systeme im Fahrzeug (Lemke)

Molekulare Thermodynamik

Der Fokus der Arbeitsgruppe Molekulare Thermodynamik liegt in der methodischen Weiterentwicklung von Simulationstechniken und molekularen Modellen für vielfältige Anwendungen. Ein Schwerpunkt liegt dabei in der Anwendung von Molekulardynamik und Monte Carlo Simulationen zur Vorhersage von thermophysikalischen Stoffeigenschaften. Mittels molekularer Simulationen werden jedoch auch Einblicke in die Systeme auf molekularer Ebene gewonnen, um relevante Wechselwirkungsmechanismen und Einflussfaktoren identifizieren zu können. Ein weiteres Forschungsthema ist die Entwicklung und Optimierung von molekularen Kraftfeld-Modellen (Force Fields) unter Nutzung von quantenmechanischen Simulationen.



Themenschwerpunkte:

- Molekulare Simulationen zur Vorhersage der Löslichkeit pharmazeutischer Wirkstoffe; molekulare Eigenschaften und Löslichkeiten metallorganischer Antiinfektiva (Lütke)
- Analyse der molekularen Einflussfaktoren auf die Eigenschaften von Kältemittel-Schmieröl-Gemischen (Bode)
- Grundlegende Untersuchung der ElectroFuel-Synthese mittels MD-Simulationen (Rabet)
- Machine Learning unterstützte Entwicklung von Force Fields (Raabe, N.N.)
- Molekulare Simulationen thermophysikalischer Stoffeigenschaften von Reinstoffen und Gemischen, z.B. alternative Kältemittel, ionische Flüssigkeiten (Raabe) Molekulare Simulationen thermophysikalischer Stoffeigenschaften von Reinstoffen und Gemischen, z.B. alternative Kältemittel, ionische Flüssigkeiten
- Modellbasierte Vorhersage von Stoffdaten und Phasenverhalten von Reinstoffen und

- Entwicklung von Force Fields für HFO- und HCFO-Arbeitsfluide und Vorhersage ihrer thermophysikalischen Stoffeigenschaften mittels molekularer Simulation (Raabe)
 - Entwicklung von Interface-Force Fields mittels genetischer Algorithmen (N.N.)
- Gemischen, beispielsweise von Gemischen aus Kältemitteln und Schmierölen, Erdgaskomponente (Raabe)

10.4 Kontakte, Zusammenarbeit und Kooperation

Kontakte, Zusammenarbeit und Kooperation mit Universitäten und Forschungseinrichtungen

- NTNU/ SINTEF, Trondheim, Norwegen
- IMT Instituto Mauá de Tecnologia, São Paulo, Brasilien
- Department of Chemical and Biomolecular Engineering, University of Notre Dame, Notre Dame, USA
- Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, USA
- Centre for Molecular Simulation, Swinburne University of Technology, Hawthorn, Australien
- University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana und Champaign, USA
- Purdue Universität, West Lafayette, USA

Kontakte, Zusammenarbeit und Kooperation mit Industrieunternehmen

- Audi AG
 - awama GmbH
 - BITZER Kühlmaschinenbau GmbH
 - BMA AG
 - BMW AG
 - Continental AG
 - Daimler AG
 - Danfoss GmbH
 - Eckelmann AG
 - Efficient Energy GmbH
 - Güntner GmbH & Co. KG
 - Infineon Technologies AG
 - Konvekta AG
 - LTX Simulation GmbH
 - MAN SE
 - Maximator GmbH
 - Miele & Cie KG
 - Obrist Engineering GmbH
 - REWE
 - Robert Bosch GmbH
 - SINTEF Energiforskning A/S
 - SOLVIS GmbH & Co. KG
 - STIEBEL ELTRON GmbH & Co. KG
 - Shell Deutschland GmbH
 - TLK Energy GmbH
 - TLK-Thermo GmbH
 - Vaillant Deutschland GmbH & Co. KG
 - Volkswagen AG
 - Wikki GmbH
 - Wurm GmbH & Co. KG - Elektronische Systeme
-

Kontakte, Zusammenarbeit und Kooperation mit Organisationen

- DKV Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein e.V.
 - FAT Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V.
 - Modelica Association
 - OSMC Open Source Modelica Consortium
 - UBA Umweltbundesamt
 - UNEP United Nations Environment Programme
 - VDA Verband der Automobilindustrie e.V.
-

10.5 Ausstattung des Instituts für Thermodynamik

Prüfstände und weitere Messmöglichkeiten:

- Ejektorprüfstand
- Wärmepumpenwäschetrocknerprüfstand
- Kalorimetrischer Prüfstand
- Fahrzeugklimaanlage und Wärmepumpe im Kalorimeterprüfstand
- Schallausbreitung im Kältemittel
- Untersuchung optimierter Regelungsstrategien im Kältekreislauf
- Prüfstände zur Untersuchung von Kältemittel-Öl-Gemischen
- Verdichterprüfstand
- Verflüssigerprüfstand
- Wassereinlagerung und Vereisung in Fahrzeugverdampfern
- Komponenten- und Systemuntersuchung mittels Wärmebildkamera
- Schlierenbildkamera u.a. zur Untersuchung von Kältemittelströmungen
- Hochgeschwindigkeitskamera

Verwendete Simulationssoftware:

- TIL
- TILMedia
- ANSYS / FLUENT
- DL-POLY
- Gaussian
- gOpenMo
- Gromacsl
- LabVIEW
- Lammgs
- MATLAB/Simulink
- Modelica / Dymola
- Modelica / SimulationX
- Python inkl. zahlreicher Pakete
- openFOAM
- TISC Software Paket
- TOWHEE
- VMD

10.6 Themenbeispiele für Studien-, Bachelor- oder Masterarbeiten

Thermische Energiesysteme

- Thermomanagement beim Schnellladen von automobilen Lithium-Ionen-Batterien
- Untersuchung der Alterung automobiler Batteriezellen im Gesamtfahrzeugkontext
- Simulation der thermischen Propagation in Batteriesystemen
- Entwurf und Simulation von bionischen Flussfeldern für Membranbefeuchter zum Einsatz in PEM-Brennstoffzellensystemen
- Experimentelle Untersuchung der Kältemittel-Öl Gemischzusammensetzung in einem Ölabscheider
- Heisenberg Wirbelrohr: 0D/1D-Modellbildung für Flüssigwasserstoffanwendungen
- Innovative Kühlkonzepte für schwere Brennstoffzellen Lkw im Rahmen des FC-Truck Projekts
- Thermomanagement von Wasserstoff-Tanksystemen
- Untersuchung des Wasserhaushalts in BZ-Systemen für die Luftfahrt
- Modellierung einer thermisch vernetzten Kläranlage mit Modelica
- Optimalsteuerung eines CO₂-Wärmepumpenwäschetrockners mit Ejektor
- Analyse thermischer Systeme mit neuartigen, robusten, genauen und schnellen Berechnungskonzepten für Wärmeübertrager
- Experimentelle Erfassung der Kältemittel- und Öl-Füllmengenverteilung in einem Kaltdampfprozess
- Simulative Untersuchung von Supermarktkälteanlagen und großen Wärmepumpen
- Untersuchung der Eignung von Physics-Informed Neural Networks zur Lösung von partiellen Differentialgleichungen

Molekulare Thermodynamik

- Molekulardynamische Simulationen zum Löslichkeitsverhalten metallorganischer Verbindungen
- MD Simulationen zu Transporteigenschaften von HFO/HCFO Kältemitteln
- Vergleich von verschiedenen Coarse Graining Modellen für die Beschreibung von Lipiden
- MD Simulation zum Diffusionsverhalten der Komponenten in der elektrochemischen Synthese alternativer Kraftstoffe
- MD Simulationen zum Vergleich der Anlagerungstendenzen von Methanol und Ethanol an Zinkoxidoberflächen
- Machine Learning unterstützte Optimierung von Force Field Parametern mittels Gaussprozess-Regression
- Molekulardynamische Simulationen mit United-Atom Ansatz zur Bestimmung der Eigenschaften von Schmierölen

Zusätzlich werden interessante (und bezahlte) Bachelor-, Studien-, Diplom- und Masterarbeiten mit Industrieunternehmen durchgeführt, für die immer engagierte Studierende gesucht werden.

