

## **Empfehlung der Fachgruppe 4.0.2 der Gesellschaft für Informatik zur Einrichtung von Studiengängen im Fach Bioinformatik**

Autoren: R. Giegerich, R. Hofestädt, H.-G. Lipinski, D. Schomburg, T. Werner

### **Bioinformatik — eine neue wissenschaftliche Disziplin entsteht**

Bioinformatik ist die Entwicklung und Nutzung von Methoden und Werkzeugen der Informatik für Fragen der Biologie. Dieses Arbeitsgebiet blickt auf eine lange Tradition zurück, hat jedoch in den letzten Jahren eine bemerkenswerte Dynamik gewonnen: Die Bioinformatik ist auf dem Weg, sich von einem Feld interdisziplinärer Zusammenarbeit zu einem eigenständigen Fach zu entwickeln. Die Dynamik dieser Entwicklung liegt darin, daß für *mehrere* Teilgebiete der Biologie die Methoden der Informatik eine immer entscheidendere Rolle spielen — das gilt für den Fortschritt der biologischen Grundlagenforschung ebenso wie für die Anwendung ihrer Ergebnisse. Umgekehrt beschert die Anwendung in der Biologie der Informatik eine Vielzahl neuer Herausforderungen. Die wissenschaftliche, ökonomische und ökologische Relevanz der in der Bioinformatik untersuchten Fragestellungen ist so hoch, daß das Aufblühen dieses Gebietes nicht als kurzfristige Erscheinung der Wissenschafts- und Förderungskonjunktur betrachtet werden darf. Diese neue Disziplin wird in den nächsten Jahrzehnten einen prominenten Platz zwischen den etablierten Disziplinen erringen. Damit zieht dieses neue Arbeitsgebiet der Forschung auch einen Reformbedarf auf dem Gebiet der akademischen Lehre nach sich.

Die Fachgruppe Bioinformatik der Gesellschaft für Informatik hat daher die vorliegende Empfehlung zu einem eigenständigen Bioinformatik-Curriculum erarbeitet<sup>1</sup>.

### **Bioinformatik als Studienfach**

Ein Curriculum mit heute vertretbaren Studienzeiten erlaubt kein pauschales Zusammenwerfen zweier Fächer — nicht einmal auf dem Gebiet ihrer klassischen Grundlagen. Der Bioinformatiker und die Bioinformatikerin sollen weder Diplom-Biologen noch Diplom-Informatiker ersetzen. Sie verfügen in beiden Fächern über eine ausreichende Grundqualifikation, um sich in weitere Teilgebiete einzuarbeiten. Ihre besondere Qualifikation liegt aber in

---

<sup>1</sup>Diese Empfehlung datiert vom 6. November 1997

ihrer Fähigkeit, Fragen der Biologie mit den Methoden der Biologie *und* der Informatik zu bearbeiten. Dies bedeutet:

- Im Fach Biologie muß sich das Grundstudium auf eine (gemeinsame) Grundlegung für ausgewählte Fachrichtungen konzentrieren.
- Im Fach Informatik kann die Grundausbildung im wesentlichen in der herkömmlichen Form, aber in angewandter Ausrichtung, erfolgen. Danach muß sich der Informatik-Lehrplan konsequent an den Erfordernissen der eingeschlagenen biologischen Fachrichtung orientieren.

Daß eine solche Konstruktion funktionieren kann und den Absolventen hervorragende Berufschancen auf dem heutigen Arbeitsmarkt<sup>2</sup> einräumt, beweist die Erfahrung mit dem Bielefelder Studiengang “Naturwissenschaftliche Informatik”. Ein kurze Beschreibung des Bielefelder Modells ist diesem Entwurf als Anhang beigefügt.

Heute zeichnen sich vier Richtungen innerhalb der Bioinformatik ab, in denen die Verbindung von Biologie und Informatik besonders weit fortgeschritten ist. Wir unterscheiden im Curriculum die Fachrichtungen

- Bioverfahrenstechnik
- Molekularbiologie
- Neurobiologie
- Ökologie

Wenn in heutigen Stellenanzeigen immer häufiger die Qualifikation des Bioinformatikers explizit nachgefragt wird, so bezieht sich dies in der Regel auf die Gebiete Bioverfahrenstechnik und Molekularbiologie. Hier besteht — weltweit wie in Deutschland — ein akuter Mangel an qualifizierten Kräften. Eine Artikelserie in **Nature**<sup>3</sup> ist diesem Phänomen gewidmet. Im vorliegenden Entwurf ist der Begriff Bioinformatik bewußt weiter gefaßt als dies im aktuellen Trend der Fall ist. Denn auch in den Gebieten Neurobiologie und Ökologie (und vielleicht auch in weiteren) kann man mittelfristig eine steigende Nachfrage erwarten.

---

<sup>2</sup>Siehe dazu auch M.Strobl: Germany on the trail Americans. Nature Vol. 389, p. 421, Sept. 1997

<sup>3</sup>D. Gershon et al.: Bioinformatics in a post-genomics age. Nature 389, pp. 417-421, Sept. 1997

## Aufbau des Curriculums

Das Grundstudium sieht für alle vier Fachrichtungen die gleichen Pflichtveranstaltungen in Biologie und Informatik vor. Lediglich im Wahlpflichtbereich für Biologie kann die spätere Entscheidung für eine bestimmte Fachrichtung antizipiert werden. Wahlpflichtveranstaltungen in Informatik sind im Grundstudium nicht vorgesehen.

Das Hauptstudium ist differenziert entsprechend der vier Fachrichtungen und sieht im biologischen Fach jeweils Pflicht- und Wahlpflichtveranstaltungen vor. In der Informatik gibt es dazu jeweils einen Katalog von Wahlpflichtveranstaltungen. Deren Themen sind in vielen Fällen direkt auf die biologischen Lerninhalte bezogen, so daß die entsprechenden Veranstaltungen verschmolzen oder in enger Absprache durchgeführt werden sollten. Pflichtveranstaltungen im Hauptstudium sind im Fach Informatik sind vorgesehen.

Zur Gewichtung der einzelnen Studienanteile gehen wir von 170 Semesterwochenstunden (SWS)<sup>4</sup> aus. Eine SWS-Angabe der Form (4+2) steht dabei für eine vierstündige Vorlesung mit zweistündiger Übung. Das Grundstudium umfaßt 4 Semester und 85 SWS, das Hauptstudium 5 Semester mit 85 SWS und der Anfertigung der Diplomarbeit. Die Bearbeitungszeit der Diplomarbeit beträgt 6 Monate. Über Art und Umfang der Prüfungen machen wir hier keine Angaben, legen aber nahe, daß die Anfertigung der Diplomarbeit *nach* den mündlichen oder schriftlichen Diplomprüfungen erfolgen sollte. Thematisch sollte sie natürlich im Überschneidungsbereich von Informatik und der biologischen Fachrichtung liegen.

## Zur Etablierung eines Bioinformatik-Studiengangs

Ein Bioinformatik-Studiengang sollte gemeinsam von Fakultäten für Biologie und Informatik eingerichtet werden. Wichtigste Voraussetzung dafür ist das Bestehen von entwickelten Kooperationsbeziehungen oder interdisziplinär ausgerichteten Forschungsgruppen. Eine nicht zu unterschätzende Schwierigkeit für die Lehre ist die Tatsache, daß auch bereits bestehende Lehrveranstaltungen inhaltlich neu ausgerichtet werden müssen, wenn eine wirkliche Integration der Fächer erreicht werden soll. Wer die Einrichtung eines Bioinformatik-Studiengangs plant, sollte daher einen Zeitplan für die Entwicklung oder Transformation von Lehrveranstaltungen vorlegen.

Die vorliegende Empfehlung geht vom Idealfall aus — der Einrichtung eines Bioinformatik-Studiengangs unter der Voraussetzung ausreichender Res-

---

<sup>4</sup>Diese Einheit ist als ein fiktives Maß zu betrachten, das zwar an reale SWS erinnert, im konkreten Fall jedoch an die geltenden Rahmenordnungen anzupassen ist.

sourcen. Dabei ist zu beachten, daß zwar innerhalb einer der vier Fachrichtungen nur ein spezifischer Ausschnitt der Informatik vermittelt werden muß, daß aber der gemeinsame Kanon aller vier Fachrichtungen — bis auf wenige Ausnahmen in der Theoretischen und Technischen Informatik — das gesamte Fächerspektrum der Informatik erfordert.

Die vorliegende Empfehlung ist keine Rahmenordnung — sie soll als Leitlinie dienen, anhand welcher Universitäten entsprechend ihrer lokalen Voraussetzungen und Besonderheiten ihren spezifischen Studiengang definieren. Dieser muß nicht notwendig alle vier der hier beschriebenen Fachrichtungen umfassen. Bei beschränkten Ressourcen oder für eine Übergangsphase könnte Bioinformatik auch als Schwerpunktbildung aufbauend auf einem Grundstudium in Informatik oder Diplom-Biologie installiert werden.

In der folgenden Zusammenstellung von Lehrveranstaltungen sind nur Titel angegeben. Von Hochschule zu Hochschule und auch von Fachvertreter zu Fachvertreter verbinden sich mit einem solchen Titel recht unterschiedliche Vorstellungen vom konkreten Lehrstoff. Wir haben daher auch einen Stichwort-Katalog zu den Stoffinhalten erarbeitet. Er ist aus Gründen der Übersicht als Anhang 1 beigelegt.

## **Teil 1: Grundstudium**

Die Entscheidung für eines der Fächer innerhalb der Bioinformatik sollte erst nach dem Vordiplom erfolgen. Sie kann durch den Besuch zusätzlicher Veranstaltungen vorbereitet bzw. antizipiert werden.

### **Biologie im Grundstudium (30 SWS)**

#### **Pflichtveranstaltungen**

- Grundlagen der Molekularbiologie (6)
- Biologische Regelmechanismen I (2)
- Grundlagen der Biochemie (6)
- Analytische Biochemie (2)
- Biochemisches Grundpraktikum (4)  
(3 Wochen Blockpraktikum nach dem 1. Semester)
- Einführung in die Evolutionsbiologie (4)
- Biologische Informationsbasen (2+2)

## **Wahlpflichtveranstaltungen (2 SWS)**

Die hier genannten Veranstaltungen dienen der Vorbereitung der Wahl der Fachrichtung im Hauptstudium.

- Biologische Regelmechanismen II (2)
- Einführung in die Neurobiologie (2)
- Einführung in die Ökologie (2)
- Einführung in die Bioverfahrenstechnik (2)

## **Informatik im Grundstudium (55 SWS inkl. Mathematik)**

- Höhere Mathematik I-IV (24)
- Paradigmen der Programmierung (4+2)
- Algorithmen und Datenstrukturen (4+2)
- Rechnerstruktur und Rechnernetze(4+2)
- Berechenbarkeit (2)
- Software-Praktikum (4)
- Verteilte Systeme (3)
- Proseminar (2)
- Technik und Gesellschaft (2)

## **Teil 2: Hauptstudium**

Das Hauptstudium ist differenziert bzgl. der vier Fachrichtungen. Wir geben jeweils Kataloge für Pflicht- und Wahlpflichtveranstaltungen für das biologische Fach an; im Fach Informatik werden ausschließlich Wahlpflichtveranstaltungen angegeben. Auf SWS-Angaben verzichten wir hier.

Generell sollte im Hauptstudium ein Gleichgewicht (50:50) der Fächer Informatik und Biologie angestrebt werden. Die Diplomarbeit sollte thematisch im Überschneidungsbereich beider Fächer angesiedelt sein. Dies muß im Einzelfall eine andere Gewichtung (zwischen 30:70 und 70:30) nicht ausschließen. Entsprechend flexibel müssen Studien- und Prüfungsordnung gestaltet werden, um der Tatsache gerecht zu werden, daß die Disziplin Bioinformatik sich noch in der Entstehung befindet.

## **Fachrichtung Bioverfahrenstechnik**

### **Pflichtveranstaltungen in Bioverfahrenstechnik**

#### *Block I: Verfahrenstechnik*

- Verfahrenstechnische Grundlagen
- Regelungstechnik biotechnischer Prozesse
- Prozeßanalytik
- Sicherheitsfragen der Biotechnologie

#### *Block II: Zellen und Zellprodukte*

- Allgemeine Mikrobiologie
- Angewandte Mikrobiologie
- Rekombinante Proteine
- Biotransformation und Biokatalyse

#### *Block III: Molekulare Biotechnologie*

- Allgemeine Gentechnik
- Gentechnik mit Eukaryonten

#### *Praktika*

- Biotechnologisches Praktikum
- Industriepraktikum

### **Wahlpflichtveranstaltungen in Bioverfahrenstechnik**

- Umweltbiotechnologie und Ökologie
- Medizinische Biotechnologie
- Biotechnologie mit Tieren
- Biotechnologie mit Pflanzen
- Apparatebau

### **Wahlpflichtveranstaltungen in Informatik (Fachrichtung Bioverfahrenstechnik)**

- Prozeßsteuerung
- Simulationstechniken
- Sensorik
- Robotik
- Mustererkennung
- Bildverarbeitung
- Graphik, Visualisierung und Animation
- Datenbanken

### **Fachrichtung Molekularbiologie**

#### **Pflichtveranstaltungen in Molekularbiologie**

- Biochemische Grundlagen
- Genetische Grundlagen
- Gentechnik
- Zellphysiologie
- Biologische Signalwege
- Immunologie
- Molekulare Strukturaufklärung
- Protein/Liganden-Design
- Biologisches Fortgeschrittenen-Praktikum
- Sequenzanalyse
- Phylogenetische Rekonstruktion

### **Wahlpflichtveranstaltungen in Informatik (Fachrichtung Molekularbiologie)**

- Datenbanken
- Programmiersprachen und Übersetzer
- Bildverarbeitung
- Künstliche neuronale Netze
- Graphik, Visualisierung und Animation
- Komplexität und effiziente Algorithmen

- Algorithmen auf Sequenzen
- Praktikum: Sequenzanalyse mit verteilten Ressourcen
- Algorithmen zur phylogenetischen Rekonstruktion
- Modellierung molekularer Strukturen und Oberflächen
- Biostatistik/Biomathematik
- Evolutionäre Algorithmen
- Studien-/Projektarbeit oder Industriepraktikum

## **Fachrichtung Neurobiologie**

### **Pflichtveranstaltungen in Neurobiologie**

- Neurobiologische Systeme und Prozesse I
- Neurobiologische Systeme und Prozesse II
- Meß- und Datenverarbeitungsmethoden in der Neurobiologie
- Modellierung neurobiologischer Prozesse
- Neurobiologische Statistik und Versuchsplanung
- Theorie dynamischer Systeme

### **Wahlpflichtveranstaltungen in Neurobiologie**

- Fallbeispiele neurodynamischer Prozesse und Lernvorgänge
- Molekulare Neurobiologie
- Praktikum Zell- und Gewebekulturen
- Praktikum Elektrophysiologie
- Praktikum Verhaltensforschung
- Seminar

### **Wahlpflichtveranstaltungen in Informatik (Fachrichtung Neurobiologie)**

- Künstliche neuronale Netze
- Sensorik
- Robotik
- Mustererkennung
- Bildverarbeitung (Erzeugung, Bearbeitung und Analyse mikroskopischer und makroskopischer Bildschnittsequenzen)

- Graphik, Visualisierung und Animation
- Simulationstechniken
- Datenbanken

## **Fachrichtung Ökologie**

### **Pflichtveranstaltungen in Ökologie**

- Allgemeine Ökologie
- Chemie für Ökologen
- Ökologische Modellbildung
- Ökotoxikologie
- Biotische Interaktionen
- Geographische Informationssysteme
- Freilandpraktikum und Fallstudie
- Studienprojekt

### **Wahlpflichtveranstaltungen in Biologie (Fachrichtung Ökologie)**

- Naturschutz und Landschaftsplanung
- Tropenökologie
- Meeresökologie
- Regionale Ökosysteme

### **Wahlpflichtveranstaltungen in Informatik (Fachrichtung Ökologie)**

- Biomathematik (Musterbildung und Analyse)
- Simulationstechniken
- Datenbanken
- Graphik, Visualisierung und Animation
- Bildverarbeitung
- Nutzung verteilter Ressourcen
- Statistik und Versuchsplanung

## Anhang 1: Stichworte zum Inhalt der Lehrveranstaltungen

### Grundstudium Biologie

Titel	Inhalt
Grundlagen der Molekularbiologie	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Grundbegriffe der biologischen Evolution und lebender Systeme (Aminosäuren und Nukleotide, DNA, RNA, Proteine, Membranen)</li> <li>- Grundzüge biologischer Replikation (DNA-Replikation, Transkription, Translation)</li> </ul>
Grundlagen der Biochemie	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Chemisches Grundwissen</li> <li>- Biochemische Grundreaktionen</li> <li>- Biophysikalische Chemie</li> </ul>
Analytische Biochemie	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Elektrophorese</li> <li>- Spektroskopie (NMR)</li> <li>- Chromatographie</li> </ul>
Biochemisches Grundpraktikum	3 Wochen Blockpraktikum nach dem 1.Semester
Biologische Regelmechanismen I	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Grundzüge metabolischer Regelkreise (Biochemie)</li> <li>- Mechanismen der Enzym-Regulierung</li> <li>- Metabolische Reaktionsgleichgewichte</li> </ul>
Biologische Regelmechanismen II	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Grundzüge molekularbiologischer Regelkreise</li> <li>- Grundzüge der Transkriptionskontrolle</li> <li>- Mechanismen der Transkriptions-Regulierung</li> </ul>
Einführung in die Evolutionsbiologie	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Grundzüge der Evolutionstheorie</li> <li>- Einschränkungen der Evolution durch DNA-basierte Vererbung</li> <li>- Biologische Selektionskriterien an Beispielen (Konkurrenz in stabiler Umgebung, Adaption an wechselnde Umgebung)</li> <li>- Biologisch sinnvolle Optimierung an Beispielen (multiple Kriterien)</li> </ul>
Biologische Informationsbasen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lineare Sequenzdaten</li> <li>- Strukturdaten</li> <li>- Phylogenien</li> <li>- Funktionell-phänomenologische Beschreibungen</li> <li>- Nicht-numerische Verfahren biologischer Informationsverarbeitung</li> </ul>
Einführung in die Bioverfahrenstechnik	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mikroorganismen und Fermentationstypen</li> <li>- Reaktortypen</li> <li>- Prozeßanalytik und Leitsysteme</li> </ul>

Titel	Inhalt
Einführung in die Neurobiologie	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nervenleitung, Synapsen</li> <li>- Sinnesorgane</li> <li>- Aufbau des Zentralnervensystems</li> <li>- Reflexe und einfache Verhaltensweisen</li> </ul>
Einführung in die Ökologie	

### Grundstudium Informatik

Titel	Inhalt
Höhere Mathematik I – IV	Analysis, Lineare Algebra, Differentialgleichungen, Numerik, Statistik
Programmierung	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Algorithmus, Spezifikation, Effizienz</li> <li>- Syntax und Semantik</li> <li>- Programmieretechniken: Strukturelle Rekursion, Teile und Herrsche, Dynamische Programmierung</li> <li>- Deklaratives und imperatives Paradigma</li> </ul>
Algorithmen und Datenstrukturen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Abstrakte Datentypen</li> <li>- Algorithmen auf Graphen</li> <li>- Suchen und Sortieren</li> <li>- Objektorientierte Modellierung</li> </ul>
Rechnerstruktur und Rechnernetze	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Schaltungsentwurf</li> <li>- RISC/CISC-Rechner</li> <li>- Kommunikationsprotokolle</li> <li>- WANs und LANs</li> </ul>
Berechenbarkeit	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Automaten und Formale Sprachen</li> <li>- Komplexität und NP-Vollständigkeit</li> </ul>
Software-Praktikum	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Methoden der Softwareentwicklung</li> <li>- Entwicklung modularer Programmsysteme</li> <li>- Praktische Teamarbeit</li> </ul>
Verteilte Systeme	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Client-Server Modell</li> <li>- WWW-Design</li> <li>- Sicherheitsfragen</li> </ul>
Proseminar	
Technik und Gesellschaft	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Technikfolgenabschätzung</li> <li>- Sicherheitskritische Software</li> <li>- Fallstudien</li> </ul>

## Hauptstudium Informatik

Titel	Inhalt
Algorithmen auf Sequenzen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Exakte Suche, Suffixbäume</li> <li>- Distanzbegriffe für DNA, Proteine, <ul style="list-style-type: none"> <li>Restriktionsprofile, RNA-Sekundärstruktur</li> </ul> </li> <li>- Globales Alignment und lokale Ähnlichkeit</li> <li>- Heuristische Ähnlichkeitssuche: FASTA, BLAST</li> <li>- Multiples Alignment</li> <li>- Sequenz-Rekonstruktion aus Fragmenten</li> </ul>
Algorithmen zur phylogenetischen Rekonstruktion	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Was ist phylogenetische Information?</li> <li>- Merkmalsbasierte Methoden (Parsimony)</li> <li>- Distanzmethoden (Clustering)</li> <li>- Statistische Methoden</li> <li>- Phylogenetische Splits</li> </ul>
Bildverarbeitung	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bildaufnahme, Digitalisierung</li> <li>- Bilddarstellung im Fourierraum</li> <li>- Lineare und nichtlineare Filterung</li> <li>- Morphologische Verfahren, Textur, Segmentierung</li> <li>- Bildfolgenanalyse</li> </ul>
Biostatistik/Biomathematik	
Datenbanken	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Relationale und objektorientierte DBen</li> <li>- Transaktionsmanagement</li> <li>- Verteilte DBen</li> </ul>
Evolutionäre Algorithmen	
Graphik, Visualisierung und Animation	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Grundlagen der algorithmischen Geometrie</li> <li>- HTML und VRML</li> <li>- Algorithmen der Animation</li> <li>- Anwendungsbeispiele aus den Naturwissenschaften</li> </ul>
Komplexität und effiziente Algorithmen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>P = NP?</math> und PSPACE</li> <li>- Modellprobleme, Problemreduktion</li> <li>- Approximationen</li> <li>- Optimierungsaufgaben</li> </ul>
Künstliche Neuronale Netze	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Modelle zum Einzelneuron</li> <li>- Netzwerkarchitekturen</li> <li>- Lernen in neuronalen Netzen</li> <li>- Kompetitive und rekurrente Netze</li> <li>- Anwendungen: Computersehen, Robotersteuerung</li> </ul>
Modellierung molekularer Strukturen und Oberflächen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Geometrische Modellierung</li> <li>- Physikalische Oberflächeneigenschaften</li> <li>- Segmentierung</li> <li>- Bindungsflächen und -taschen</li> </ul>

Mustererkennung	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Merkmalsextraktion</li> <li>- Wahrscheinlichkeitstheoretische Klassifikatoren</li> <li>- Polynomklassifikator</li> <li>- Multilayer-Perzeptron</li> </ul>
Nutzung verteilter Ressourcen	
Praktikum: Sequenzanalyse mit verteilten Ressourcen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Homologiesuche</li> <li>- Multiples Alignment</li> <li>- RNA-Strukturberechnung unter Verwendung von Bioinformatik-Services im Internet</li> </ul>
Programmiersprachen und Übersetzer	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Interpreter und Compiler</li> <li>- Partielle Auswertung</li> <li>- Abstrakte Interpretation</li> <li>- Syntaxanalyse, Semantik, Codeerzeugung</li> </ul>
Prozeßsteuerung	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Prozeßmodelle</li> <li>- Echtzeitprogrammierung</li> </ul>
Robotik	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Roboterkinematik</li> <li>- Sensoren und Sensordatenverarbeitung</li> <li>- Aufgaben- und Bahnplanung</li> <li>- Programmierung</li> <li>- Regelungskonzepte und Roboterdynamik</li> </ul>
Sensorik	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mechanische, akustische, optische Sensoren</li> <li>- Biosensoren</li> <li>- Multi-Sensor-Systeme</li> </ul>
Simulationstechniken	
Statistik und Versuchsplanung	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Deskriptive Statistik</li> <li>- Schlußfolgernde Statistik</li> <li>- Nicht-parametrische Methoden</li> <li>- Entwurf von Versuchsreihen</li> </ul>
Studien/Projektarbeit	Freie Themenwahl; ca. 20 Seiten Abschlußbericht

## Hauptstudium Bioverfahrenstechnik

Titel	Inhalt
<i>Block I: Verfahrenstechnik</i>	
Verfahrenstechnische Grundlagen	- Grundoperationen: Destillation, Adsorption, Chromatographie, Elektrophorese - Reaktionstechnik: Enzymatische Katalyse, Fermentationstechnik
Regelungstechnik biotechnischer Prozesse	- Fermentationsführung: Zulaufverfahren, Kopplung mit Aufarbeitungsprozessen, Optimierung von Satzfermentationen
Prozeßanalytik	
Sicherheitsfragen der Biotechnologie	
<i>Block II: Zellen und Zellprodukte</i>	
Allgemeine Mikrobiologie	
Angewandte Mikrobiologie	
Rekombinante Proteine	
Biotransformation und Biokatalyse	
<i>Block III: Molekulare Biotechnologie</i>	
Allgemeine Gentechnik	- Prokaryontengenetik - Restriktion, Sequenzieren, PCR
Gentechnik mit Eukaryonten	- Pilze, Tiere, Pflanzen
<i>Praktika</i>	
Biotechnologisches Praktikum	
Industriepraktikum	
<i>Wahlpflichtveranstaltungen</i>	
Umweltbiotechnologie und Ökologie	- Umweltanalytik - Populationsdynamik - Abwasser- und Abfallbehandlung - Metabolic Design zum Schadstoffabbau
Medizinische Biotechnologie	- Gentherapie - Diagnostik - Drug Design (Fallstudien)

Titel	Inhalt
Biotechnologie mit Tieren	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Grundprinzipien der Zellkultur tierischer Zellen</li> <li>- Klonierung</li> <li>- Virusvektoren</li> <li>- Produktion von Medikamenten und Impfstoffen monoklonaler Antikörper</li> <li>- Transgene Tiere</li> </ul>
Biotechnologie mit Pflanzen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Klonierung</li> <li>- Genfähren und Ti-Plasmide</li> <li>- Transgene Pflanzen</li> <li>- Biotechnologie und Pflanzenzucht</li> </ul>
Apparatebau	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Auslegung industrieller Anlagen</li> <li>- Automatisierung</li> </ul>

## Hauptstudium Molekularbiologie

Titel	Inhalt
Biochemische Grundlagen II	- Proteine: Struktur/Funktionsbeziehung - Enzymreaktionen
Genetische Grundlagen	- Genexpression und -regulation bei Pro- und Eukaryonten
Gentechnik	- Klonierung - Sequenzierung - Hybridisierungstechniken - PCR-Methoden
Zellphysiologie	- Messung und Berechnung des Zellstoffwechsels - Energiebilanzen - NMR-Technik
Biologische Signalwege	- Signaltransduktion in der Zelle bei Pro- und Eukaryonten - Chemotaxis - Apoptose
Immunologie	- Antikörper - MHC-Komplex - Komplementsystem - zelluläre und humorale Immunantwort
Molekulare Strukturaufklärung	- Massenspektroskopie - NMR - Kristallographie - Röntgenstrukturanalyse - Elektronenmikroskopie
Protein/Liganden-Design	- Rationales Protein-Design - Optimierung natürlicher Proteine - Evolution in vitro
Biologisches Fortgeschrittenen Praktikum	DNA-Sequenzierung, Polymerase-Kettenreaktion, NMR, Immunologie, ... (wahlweise)
Sequenzanalyse	- Interpretation von Homologien - Techniken der gezielten Mutagenese - Mutations-Analyse
Phylogenetische Rekonstruktion	- Methoden der klassischen Systematik - Methoden der molekularen Systematik - Computergestützte Methoden

## Hauptstudium Neurobiologie

Titel	Inhalt
Neurobiologische Systeme und Prozesse I	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Signalleitung in der Nervenzelle</li> <li>- Synapsen</li> <li>- Sensorik</li> <li>- Bewegung</li> </ul>
Neurobiologische Systeme und Prozesse II	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lernen, Sprache, Gedächtnis</li> <li>- Gene, Emotionen, Instinkte</li> <li>- Kognition und Verhalten</li> </ul>
Meß- und Datenverarbeitungsmethoden in der Neurobiologie	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Elektrophysiologie</li> <li>- Analoge und digitale Gerätekunde</li> <li>- Reizgebung</li> </ul>
Modellierung neurobiologischer Prozesse	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hodgkin-Huxley-Einzelzellmodell</li> <li>- Reflex-Reaktionssysteme</li> <li>- Simulation von Verhaltensweisen</li> </ul>
(Neurobiologische) Statistik und Versuchsplanung	s. Hauptstudium Informatik
Theorie dynamischer Systeme	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lineare Filter</li> <li>- Nichtlineare Systeme</li> <li>- Regelsysteme</li> </ul>
Fallbeispiele neurodynamischer Prozesse und Lernvorgänge	
Molekulare Neurobiologie	
Praktikum Zell- und Gewebekulturen	
Praktikum Elektrophysiologie	
Praktikum Verhaltensforschung	
Seminar	

## Hauptstudium Ökologie

Titel	Inhalt
Allgemeine Ökologie	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Grundbegriffe der wissenschaftlichen Ökologie</li> <li>- Problemstellungen in der Ökologie</li> <li>- Autökologie (abiotische Faktoren)</li> <li>- Synökologie/Biozönotik</li> <li>- Grundlagen der Populationsökologie</li> <li>- Ökosystembiologie (Stoffkreisläufe, Nahrungsnetze, Energieflüsse)</li> <li>- Natürliche <math>\Leftrightarrow</math> Anthropogen beeinflusste Umwelt</li> <li>- Angewandte Ökologie (Land-, Forstwirtschaft)</li> </ul>
Chemie für Ökologen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Periodensystem</li> <li>- Atome, Moleküle, Reaktivität</li> <li>- pH-Wert</li> <li>- Anorganische Substanzen der Pflanzenernährung</li> <li>- Biologische Halbwertszeit</li> <li>- Grundlagen der Biochemie</li> <li>- Funktionelle Gruppen biologisch bedeutsamer organischer Moleküle</li> <li>- Hormone, Pheromone</li> </ul>
Ökologische Modellbildung	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Was ist ein Modell</li> <li>- Modellentwicklung, Parametrisierung, Validierung, Sensitivitätsanalyse</li> <li>- Modellierung biologischer Prozesse</li> <li>- Bottom-up/Top-Down Ansatz</li> <li>- Empirische und Mechanistische Modelle</li> <li>- Analytische und Prognostische Modelle</li> <li>- Ökosystemmodelle (Flußmodelle, Zelluläre Automaten)</li> </ul>
Ökotoxikologie	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Schadstoffe in Boden, Wasser Luft (Chemie, Wirkungsmechanismen bei Pflanzen bzw. Tieren)</li> <li>- Biologischer Abbau toxischer Substanzen</li> <li>- Bioakkumulation, Biomagnifikation</li> <li>- Herbizide, Fungizide, Insektizide</li> <li>- Strahlung (UV, Radioaktivität)</li> </ul>

Titel	Inhalt
Biotische Interaktionen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Symbiose, Parasitismus, Kommensalismus</li> <li>- Konkurrenz, Koexistenz</li> <li>- Sukzession</li> <li>- Pflanze-Tier-Interaktionen (Herbivorie, Zoogamie, Zoochorie, Blütenökologie)</li> <li>- Räuber-Beute-Systeme (einschl. Wirt-Parasit-Systeme)</li> <li>- Soziale Interaktionen</li> <li>- Allelopathie, Antibiotika</li> </ul>
Geographische Informationssysteme	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Funktion und Möglichkeiten von GIS</li> <li>- Erlernen der praktischen Handhabung eines GIS-Systems</li> <li>- GIS als Instrument der ökologischen Analyse</li> <li>- Korrelation und Kausalität</li> </ul>
Naturschutz und Landschaftsplanung	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Wissenschaftliche Grundlagen des Naturschutzes</li> <li>- Populationsbiologische Grundlagen</li> <li>- Biodiversität</li> <li>- Naturschutz in Deutschland</li> <li>- Arten- und Biotopschutz</li> <li>- Grundlagen der naturgerechten Landschaftsplanung</li> <li>- Planung und Management von Schutzgebieten</li> </ul>
Tropenökologie	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ökologische Großsysteme der Geo-Biosphäre in globaler Sicht</li> <li>- Globalökologische Betrachtungsweise</li> <li>- Äquatoriale, tropische und subtropische Zonobiome in vergleichender Sicht</li> <li>- Untergliederung in Biome</li> <li>- Klima, Boden, Vegetation</li> <li>- Zoologische Charakterisierung der wichtigsten Einheiten</li> <li>- Funktionelle Gruppen: Produzenten, Konsumenten, Destruenten</li> <li>- Biodiversität</li> <li>- Globale Bedeutung</li> </ul>
Meeresökologie	
Regionale Ökosysteme	
Freilandpraktikum, Fallstudie	Quantitative ökologische Charakterisierung einer vorgegebenen Biozönose im Freiland sowohl in deskriptiver als auch in funktioneller Hinsicht.
Studienprojekt	Bearbeitung einer angewandten Fragestellung der ökologischen Bioinformatik möglichst außerhalb der Universität in Zusammenarbeit mit Firmen, Planungsbüros, Behörden, etc.

## **Anhang 2: Erfahrungen aus der Bioinformatik-Ausbildung im Rahmen des Bielefelder Studiengangs “Naturwis- senschaftliche Informatik”**

Die Entwicklung des Studiengangs “Naturwissenschaftliche Informatik” an der Universität Bielefeld ist in einer Studie<sup>5</sup> von 1996 dokumentiert, die insbesondere auch auf die Situation der Studienrichtung Bioinformatik eingeht. Diese sogenannte “Absolventenstudie” ist vom Dekanat der Technischen Fakultät oder in Postscript-Format vom Autor erhältlich. Hier einige Auszüge aus den dort zusammengefaßten Erfahrungen.

Die Konzeption der Naturwissenschaftlichen Informatik (NWI) im Jahr 1989 ging von der Beobachtung aus, daß die Informatik immer tiefer in die Naturwissenschaften hineinwirkt und sich dort in spezifische Aufgabenbereiche differenziert. Das Berufsbild des Studienganges ist das des Informatikers in interdisziplinären Arbeitsgruppen auf naturwissenschaftlichem Gebiet.

Die Studienordnung sah ein gemeinsames Grundstudium in Informatik und Naturwissenschaft vor, nach dem Vordiplom die Wahl eines der Informatik gleichberechtigten naturwissenschaftlichen Hauptfaches. Zunächst waren die Fächer Biologie, Chemie und Physik vorgesehen; einige Jahre später kamen die Fächer Biotechnologie, Robotik und Sprachverarbeitung hinzu. Der Titel des Diplom-Bioinformatikers wurde übrigens anno 1989 bereits diskutiert, galt aber damals als (noch) nicht durchsetzbar, so daß alle Absolventen den Grad “Diplom-Informatiker mit Anwendungsschwerpunkt ...” erwerben.

Der Studiengang nimmt jährlich etwa 120 Studierende auf. Die Studienrichtungen Robotik, Biologie und Biotechnologie ziehen die größte Kontingente an Studierenden<sup>6</sup> auf sich. In der Kombination Informatik/Biologie treten als Spezialisierung alle hier im Curricular-Entwurf genannten Richtungen auf (Molekularbiologie, Neurobiologie, Ökologie und Bioverfahrenstechnik – hier unter dem Titel Biotechnologie –), allerdings mit einem deutlichen Schwerpunkt in der Molekularbiologie. Hier spiegeln sich natürlich die in Bielefeld ausgeprägten Forschungsoperationen zwischen Informatik und Biologie wieder.

Zum Stichtag der Studie (Mai 1996) hatte der Studiengang 67 Absolventen, davon 33 in der Bioinformatik. Der Median der Studiendauer lag knapp

---

<sup>5</sup>Robert Giegerich: Naturwissenschaftliche Informatik an der Universität Bielefeld: Eine Studie über die erste Generation von Absolventen. Interne Berichte der Technischen Fakultät, 1996.

<sup>6</sup>Eine Umfrage unter der Studienanfängern 1997 hat ergeben, daß diesen von der aktuellen Arbeitsmarktsituation in der Bioinformatik noch nichts bekannt ist.

oberhalb von 10 Semestern.

Die Studie schlüsselt die Diplomarbeiten thematisch auf und kommt zu folgendem Ergebnis:

- In 70 % der Diplomarbeiten ist der interdisziplinäre Ansatz verwirklicht. (Die anderen Arbeiten muß man ganz der Biologie oder ganz der Informatik zurechnen, allenfalls mit einer marginalen interdisziplinären Motivation.)
- Trotz der gestrafften Studieninhalte, der kurzen Studiendauer und der relativ strikt eingehaltenen Bearbeitungszeiten für Diplomarbeiten können die letzteren wertvolle Beiträge zu aktuellen Forschungsfragen erbringen. Dies wird durch zahlreiche Publikationen belegt, in die Ergebnisse der Diplomarbeiten wesentlich eingegangen sind.
- Absolventen der NWI arbeiten heute bereits mit gutem Erfolg an vielen Forschungsstätten der deutschen Bioinformatik, in einigen Fällen auch im Ausland.
- Absolventen, die die Biologie de facto nur mit der Intensität eines herkömmlichen Nebenfaches studiert haben, brauchen hinsichtlich ihrer Berufschancen den Vergleich mit den "Standard"-Diplominformatikern nicht zu scheuen.

Zum Zeitraum seit der Erstellung der Studie kann man feststellen, daß dem kleinen Bielefelder Absolventenstrom in der Bioinformatik (speziell in den Richtungen Molekularbiologie und Biotechnologie) eine stetig wachsende Nachfrage gegenübersteht, insbesondere da sich allmählich auch der industrielle Sektor bemerkbar macht.