

Anke Zölder; Heiko Palzer; Ulrich Vietinghoff

Einsatz der Bildverarbeitung bei der Identifikation, Zählung und Volumenbestimmung von Zooplanktern der südlichen Ostsee

Abstract

The application of image processing for the identification, counting and volume measurement of zooplankters from the Southern Baltic.

The purpose of our studies is the development of a system permitting various image sources to be used for the automatic identification and counting of zooplankters collected in the Southern Baltic and Greifswalder Bodden, the measurement of their volumes and the calculation of their biomasses. This involved the morphometric analysis of the most common zooplankters, the extraction of features that may be important for their identification and the integration of those features into the program for the plankton analysis system. The hardware and software needed for automatic operation of the system (scanning table for 16 chambers, side-to-side examination of the chambers) have also been set up. At present the plankton analysis system can identify 15 zooplankton species and genera with an accuracy of about 90 % and calculate parameters such as volumes and biomass.

1 Einleitung

Ziel unserer Untersuchungen ist die Entwicklung eines intelligenten Planktonanalysegerätes. Schwerpunkte bilden hierbei die automatische Identifizierung, Zählung sowie Volumen- und Biomasseberechnungen von Zooplanktern der südlichen Ostsee und des Greifswalder Boddens aus verschiedenen Bildquellen. In unserer Arbeitsgruppe werden speziell Mikroskopbilder digitalisiert, gespeichert und der Bildverarbeitung zugeführt.

Moderne Bildverarbeitungssysteme bieten umfassende Möglichkeiten, den Menschen bei seiner visuellen Arbeit zu unterstützen und zu entlasten. Für diese spezielle Analyseaufgabe kann kein standardmäßiges Bildverarbeitungs-

system verwendet werden, sondern es muß eine konkrete Anpassung an das Problem erfolgen.

Aus dieser Zielsetzung ergibt sich folgendes Arbeitsprogramm:

1. Zunächst gilt es, eine Übersicht der Zooplankter des o.g. Untersuchungsgebietes zu erstellen, wobei insbesondere die planktonbestimmenden Arten erfaßt werden. Darin sollen neben klassischen Bestimmungsmerkmalen (anhand der Literatur) auch neue bildverarbeitungstypische Merkmale gefunden und aufgenommen werden.
2. Morphometrische Vermessung der Zooplankter in größerem Stichprobenumfang, in deren Ergebnis Längen- und Breitenverhältnisse verschiedener anatomischer Einheiten sowie Muster der inneren Struktur Eingang finden.
3. Diese Arbeiten sind Voraussetzungen für die:
 - Algorithmenerstellung zur Identifikation, Zählung und Biomassebestimmung,
 - Programmierung und Anwendung verschiedener mathematischer Operationen,
 - Testung der automatischen Zooplanktonanalyse.

2 Material und Methoden

2.1 Technische Voraussetzungen

Für die Bearbeitung ist die folgende technische Ausstattung notwendig:

- ◆ IBM- kompatibler Personal Computer (486 DX, 66 MHz),
- ◆ Frame Grabberkarte (AFP mit einer Speichererweiterung auf 12 MByte),
- ◆ Mikroskop mit motorgetriebenem Scanningtisch (Fa. Märzhäuser) und der MCU 26,
- ◆ CCD - Kamera (Schwarz/Weiss-Kamera ausreichend),
- ◆ Videorecorder (z.B. PANASONIC AG 7350),
- ◆ 2. Monitor und
- ◆ Bildverarbeitungssoftware Image_C, speziell Treibersoftware für die AFP-Karte.

2.2 Verfahren der softwaremäßigen Merkmalsextraktion

Um eine erfolgreiche Klassifikation zu gewährleisten, sind Funktionen zur Objektteilervermessung notwendig. Da sich die Antennen, Borsten und Abdomen als für die Bildverarbeitung sehr wesentliche Körperteile herausgestellt haben, wurden die Algorithmen zu ihrer Berechnung weiter vervollkommen. Weiterhin konnten neue Merkmale in den Klassifikator aufgenommen werden (längste Borste, Anzahl der Borsten). Diese Merkmale konnten durch Breitenbestimmung der verschiedenen Objektteile unterschieden werden.

Die Merkmalsextraktion erfolgt in zwei Stufen. In der ersten Phase, der Merkmalssegmentierung, muß das Objekt bzw. die informationsrelevante Region segmentiert werden, d.h. z.B. für das Objekt, es muß sowohl vom Untergrund als auch von anderen Objekten bzw. Regionen isoliert werden. Dazu wird ein grauwertabhängiger Konturfolgealgorithmus verwendet, der bei erfolgreicher Konturverfolgung als Ergebnis einen Freeman-Kettencode liefert. Erst wenn dieser Code vorliegt, kann die eigentliche Merkmalsextraktion und die Berechnung der Merkmale stattfinden. In Punkt 3.1. sind die Bildverarbeitungsmerkmale 1 - 13 aufgeführt. Eine Erläuterung der Merkmale können dem Nutzerhandbuch IMAGE_C (IMTRONIC 1992) entnommen werden. Zusätzlich zu diesen Merkmalen wurde nach weiteren Verfahren zur Merkmalsfindung gesucht.

2.2.1 Verfahren zur Feststellung der Objektlagen

Da die Zooplankter die Objektlage dorsoventral oder lateral einnehmen, sind einige Merkmale nicht immer sichtbar und berechenbar. Demzufolge müssen **sichtbare, lageinvariante**, aber auch **lageabhängige** Merkmale bei der Merkmalsberechnung genutzt werden. Weiterhin müssen Kombinationen von Merkmalen für die Klassifikation verwendet werden, da einige morphometrische Parameter für verschiedene Gattungen gleich sind. Durch Ausnutzung der Objektlage bei bestimmten Gattungen (z.B. Copepoden) ist ebenfalls eine Reduzierung der Vielfalt möglich. Gerade bei Copepoden läßt sich die Lage mit einfachen bildverarbeitungstypischen Merkmalen, wie z.B. Formfaktor, Verhältnis von Originalfläche zur Fläche der konvexen Hülle, feststellen, da die Antennen der Copepoden in den meisten Fällen vom Cephalothorax abgespreizt sind.

2.2.2 Verfahren der Spline-Interpolation

Die Merkmalsextraktion orientiert sich an den charakteristischen Eigenschaften der Objekte.

Ein Objekt wird durch seinen Objektrand mit Hilfe des Freemancodes beschrieben. Da der Konturcode, auch Kettencode genannt, keine mathematisch exakte Funktion ist, die für weitere Berechnungen genutzt werden kann, erfolgt an dieser Stelle nun die Approximation des Konturcodes mit Hilfe der Spline-Interpolation, um mathematische Beschreibungen, wie die 1. und 2. Ableitung von Funktionswerten, Berechnungen von Krümmungen usw. zu nutzen.

Ein weiterer Vorteil der Splineinterpolation besteht darin, daß die innere Grauwertstruktur der Objekte unberücksichtigt bleibt. Mit Hilfe der Stützstellen lassen sich bestimmte Teile eines Objektes gut finden. Diese Stützstellen können aus der Funktion eliminiert werden, um die Objektkontur zu glätten.

Das Spline-Verfahren bietet die Möglichkeit der wesentlich exakteren Berechnung von verschiedensten Merkmalen für unterschiedliche Gattungen, die sich

in wesentlichen Körperanhängen unterscheiden. Folgende Parameter konnten durch diese Verfahren berechnet werden :

- ◆ Verhältnis von Abdomen- zu Objektlänge,
- ◆ Verhältnis von max. Breite zu Objektlänge,
- ◆ Verhältnis von Antennen- zu Objektlänge,
- ◆ Längste Antenne,
- ◆ Anzahl der Antennen,
- ◆ Längste Borste,
- ◆ Anzahl der Borsten.

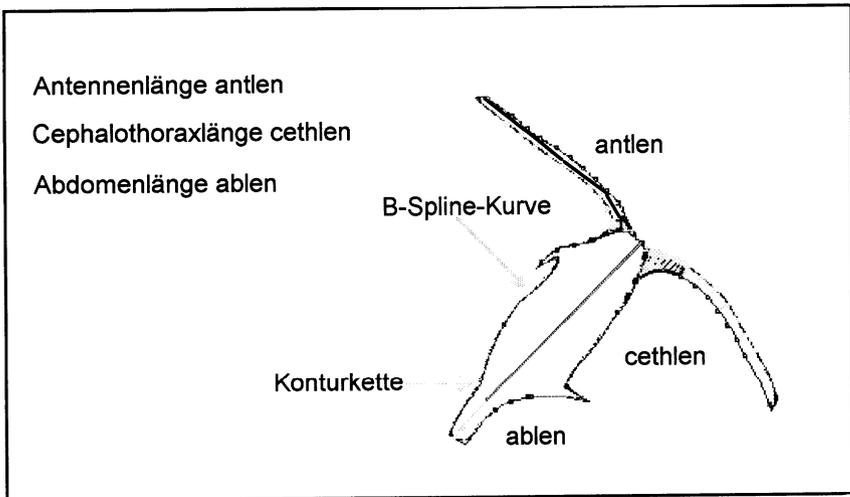


Abb. 1 Konturkette und B-Splineinterpolation bei einem Objekt

Das Verhältnis von Abdomenlänge/Gesamtkörperlänge läßt sich in der lateralen Objektlage (bei Copepoden) ohne große Fehler berechnen. In der dorsoventralen Lage hingegen setzt sich das Abdomen weniger gut vom Cephalothorax ab als bei Objekten in lateraler Lage. Durch die fächerartige Spreizung der Furca in der dorsoventralen Lage kommt es häufig zu falschen Abdomenberechnungen. Um den Klassifikationsfehler zu verringern, wurde in der dorsoventralen Lage ein weiteres Merkmal, das **Verhältnis von Antennenlänge/Gesamtlänge**, notwendig, das zur Unterscheidung der Copepoden diene.

Der beschriebene Spline-Algorithmus besitzt noch einen weiteren Vorteil. So können mit ihm auch Objekte berechnet werden, bei denen die Objektkontur unvollständig erkannt wurde. Dieser Fall tritt bei Evadne auf, wenn die objektspezifische "Tüte" nicht richtig erfaßt wird, da ihre Grauwerte in dem Grauwertbereich des Untergrundes liegen. Die vom Körper der Evadne weglaufernde Teile der Tüte werden dann als "Antennen" betrachtet. Anders als bei den

Copepoden liegen die Spitzen der "Antennen" dicht beieinander. Durch Einfügen von Stützstellen und anschließendes Verbinden der Spitzen kann die Kontur der "Tüte" geschlossen werden.

Durch die Hinzunahme des Merkmals "Borste" sind wir in der Lage, sowohl Marenzelleria zu klassifizieren, als auch Furcaborsten und Antennenborsten zu vermessen.

Die meisten Merkmale konnten durch die Approximation der B-Spline-Funktionen gut ermittelt werden.

2.2.3 Verfahren der Breitenberechnungen

Die Bestimmung der Breite stellt sich als sehr schwierig dar. Das Problem besteht darin, daß zum einen aus der Kontur nicht festgestellt werden kann, welche die Längs- und welche die Querrichtung des Objektes ist. Bei den Copepoden kann das Problem gelöst werden, da die merkmalsstragenden Regionen sich in Kopf- (Antennen) bzw. Endposition (Abdomen) befinden. Sind die wesentlichen Objektteile vermessen und vom Cephalothorax abgetrennt, kann auch die Breitenmessung vorgenommen werden. Probleme bereiten hier aber noch die am Cephalothorax vorhandenen Beinpaare.

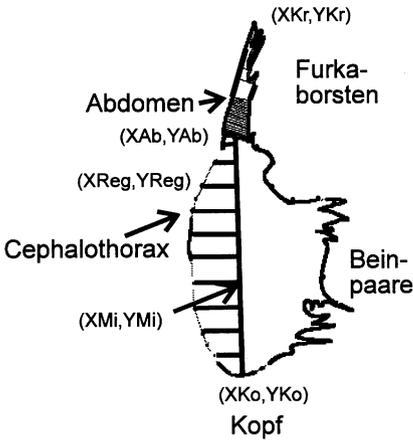
Bei den Phyllopoden der Gattung Evadne ergibt sich die Längsrichtung aufgrund der Tütenform aus der längsten x , y - Ausdehnung, so daß dann die Breite ebenfalls feststeht. Bei den Phyllopoden Podon und Bosmina ist das Problem aufgrund der sehr unterschiedlichen äußeren Form etwas schwieriger und kann nicht eindeutig mit der Längsausdehnung bestimmt werden. Es wurden verschiedene Varianten zur Breitenbestimmung untersucht.

Zur Breitenberechnung werden Regressionspunkte benutzt. Voraussetzung hierbei ist, daß zuvor die Objektkontur mit der Spline-Interpolation geglättet wurde. Ausgehend von dem maximalen Objektend- oder -anfangspunkt werden jeweils 10 Regressionspunkte nach vorn und nach hinten (gegenüberliegende Punkte) errechnet.

Die Breitenberechnung geschieht nun auf verschiedenen Wegen (Abb. 3):

- ◆ Berechnung der halben Cephalothoraxbreite über die Höhenbestimmung, ausgehend von den Regressionspunkten auf der glatten Cephalothoraxseite
- ◆ euklidische Abstandsmessung der gegenüberliegenden Regressionspunkte.

Acartia spec. in lateraler Lage



B-Spline-Funktion

Krümmungspunkt
(XKr, YKr)

Regressionspunkte
(XReg, YReg)

Länge des
Cephalothorax=
 $d((XAb, YAb); (XKo, YKo))$

Breite des
Cephalothorax=
 $d((XReg, YReg); (XMi, YMi))$

Abb. 2 Breitenberechnung am Beispiel eines Copepoden

Bei nicht exakter Auffindung der wesentlichen Objektteile kann es aber zu verrutschten Regressionspunkten kommen, so daß die Breite dann nicht korrekt bestimmt werden kann. Ein weiteres Verfahren - Segmentierung des Objektes in 10 äquidistante Teile - sollte Abhilfe bringen und als weiteres Ziel sollte durch die Unterteilung entlang der Mittellinie Segmente mit biologischen Übereinstimmungen gefunden werden (z.B. Bei Copepoden - 1. Segment mit Antennen).

Das von uns verwendete Verfahren (Autorenkollektiv, 1994) ermittelt die Mittellinie eines Objektes und unterteilt das Objekt dann in 10 äquidistante Bereiche senkrecht zu der gefundenen Mittellinie. Das ursprünglich erstellte Programm nutzte die morphologischen Transformationen (Erosion und Dilatation) zur Ermittlung des Objektrumpfes. Dadurch gehen aber die wesentlichen Parameter, wie z. B. Antennen, Abdomen, verloren. Außerdem können häufig nicht alle vom Cephalothorax abgespreizten Objektteile vollständig durch Erosionen eliminiert werden, so daß dann die Mittellinien- und die Breitenberechnung verfälscht sind. Aus diesem Grund kombinierten wir die Segmentierung mit dem Spline-Algorithmus. D.h. nach erfolgter Spline-Approximation und Eliminierung der wesentlichen Objektanhänge zur Merkmalsberechnung wird das bereinigte Objekt dem Segmentierungsalgorithmus übergeben.

Die Untersuchungen nach diesem Verfahren an mehreren Objekten verschiedener Gattungen haben gezeigt, daß die Auswertung der 10 Segmente nicht zufriedenstellend waren (Abb. 4). Es konnten keine biologischen Übereinstimmungen in den Segmenten festgestellt werden, bzw. die wesentlichen

Objektmerkmale einer Gattung finden sich nicht immer in ein und demselben Segment wieder.

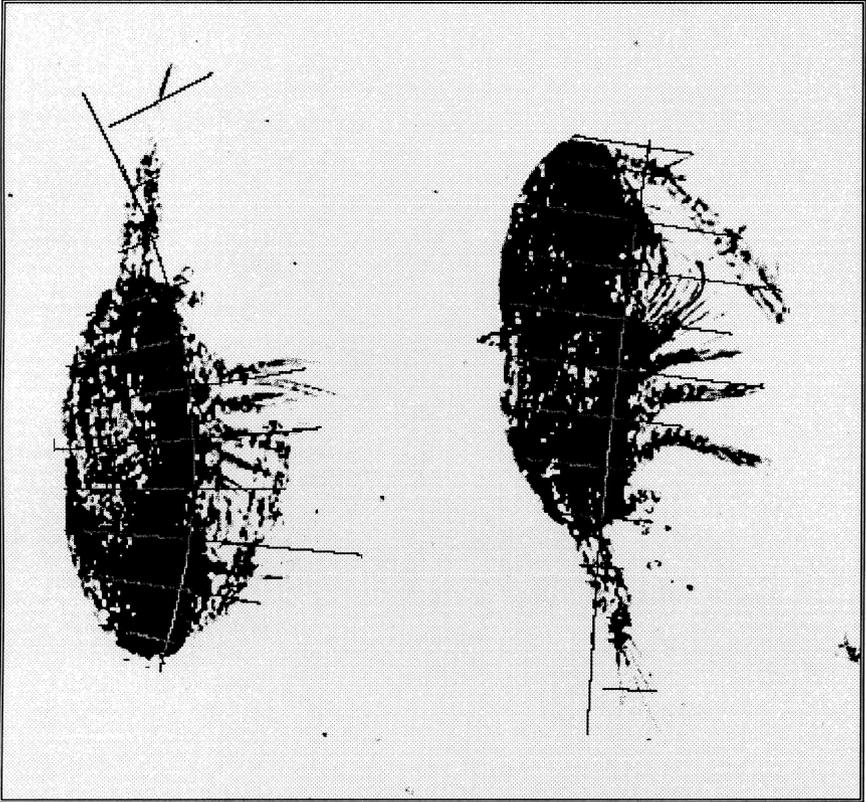


Abb. 3a Segmentierung am Beispiel von *Acartia*

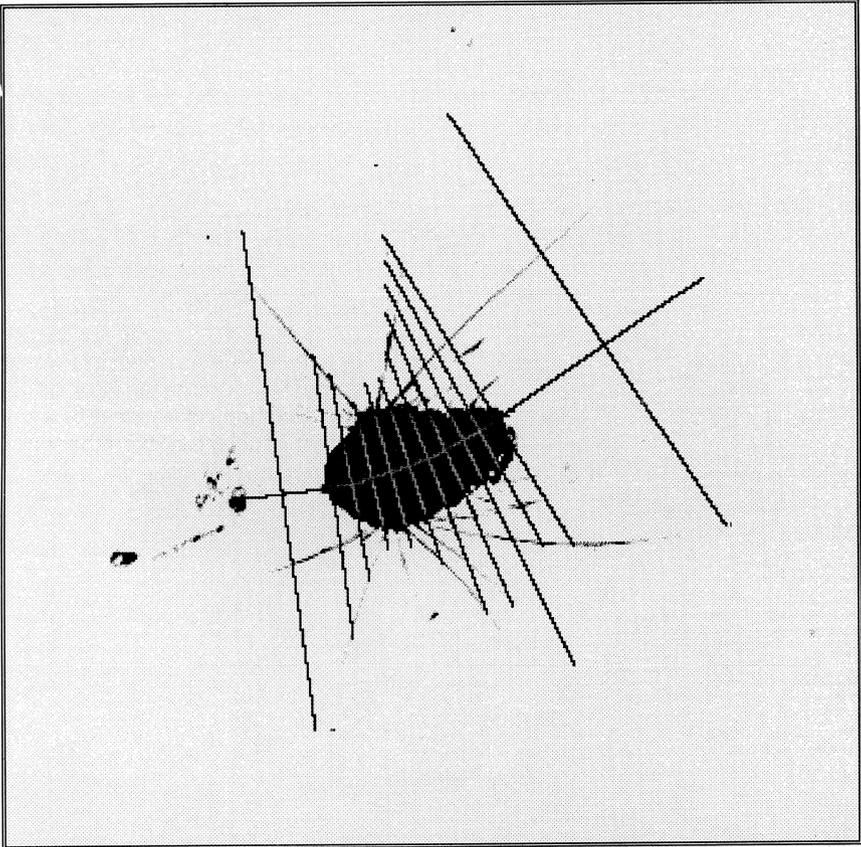


Abb. 3b Segmentierung am Beispiel einer Marenzelleria-Larve

Durch eine Kombination der Spline-Interpolation mit der Breitenberechnung nach der Mittellinien-Transformation ist zum Teil eine Verbesserung der Breitenberechnung möglich. Aber auch dieses Verfahren ist aufgrund der sehr unterschiedlichen Lagevarianzen nicht fehlerfrei. Deshalb werden bei der Klassifikation beide Breiten zur Verfügung gestellt.

3 Ergebnisse

3.1 Bildverarbeitungs- und biologische Merkmale der Zooplanktonklassifikation

Nach Aufnahme eines Jahresganges der Zooplanktonentwicklung im Greifswalder Bodden (wöchentlich mindestens 1 Probe an 2 Stationen an der Oberfläche und in der Tiefe) konnten folgende Arten/Gattungen als die planktonbestimmenden ermittelt werden: *Acartia*, *Eurytemora*, *Centropages* (sowie deren Nauplien und Copepoditen), *Podon*, *Evadne*, *Bosmina*, Larven von *Marenzelleria* und *Nereis*, *Keratella cochlearis*, *K. cruciformis*, *K. quadrata*, *Synchaeta* und Tintiniden). (PALZER & HACKER 1994).

Als für die Klassifikation maßgebliche Faktoren haben sich die Verhältnisse von Abdomen- zu Objektlänge, Antennen- zu Objektlänge, max. Breite zu Objektlänge, sowie die als Absolutzahl ermittelten längste Antenne, längste Borste sowie Anzahl der Antennen und Borsten erwiesen. Diese Charakteristika sind in einen Merkmalssatz aufgenommen und für die taxonomische Identifizierung verwendet worden. Somit besteht der Merkmalssatz aus **13 bildverarbeitungs-spezifischen und 7 biologischen Merkmalen**.

Ein wesentlicher Schwerpunkt war die Findung von weiteren biologischen Objektmerkmalen, die für eine automatische Klassifikation herangezogen werden können und deren programmtechnische Umsetzung.

Für die wesentlichen qualitativen Objekteigenschaften (z.B. rundlich, ellipsenförmig, dunkel, innen aufgehellte,...) werden quantitative Bildverarbeitungsmerkmale definiert, die die qualitativen Objekteigenschaften zufriedenstellend wiedergeben. Zu diesen Merkmalen, die sofort mit der Konturberechnung zur Verfügung stehen, zählen

1. Konkavitätsmaß
2. Formfaktor
3. innere Struktur
4. Kompaktheit
5. Fläche des Objektes
6. Länge der Kontur
7. min. Durchmesser der Ellipse
8. Fläche der Ellipse
9. Verhältnis von min. zu max. Durchmesser
10. Länge der Konvexkontur
11. Konvexfläche
12. Verhältnis Kontur- zu Konvexfläche
13. Formfaktor der Konvexkontur.

Diese Merkmale reichen aber nicht aus, da diese von der **Gesamtform** des Objektes ausgehen und wesentliche Objektteile wie Abdomenlänge, Antennenlänge etc. zu wenig berücksichtigen. Aufgrund dieser Erkenntnis müssen für solche Objektteile Charakteristika vermessen und berechnet werden. Speziell bei biologischen Objekten sind durch die unterschiedlichen Lagemöglichkeiten der

Objekte selbst (lateral, dorsal, ventral) und durch die zusätzlichen Lageänderungen der wesentlichen Objektteile die Merkmalsstreuungen sehr groß. Weiterhin müssen Kombinationen von Merkmalen für die Klassifikation verwendet werden, da einige morphometrische Parameter für verschiedene Gattungen gleich sind bzw. wichtige Objektteile von anderen Teilen verdeckt sind. Wiederum zeigt sich aber, daß bei Berücksichtigung der wesentlichen Objektlagen bei bestimmten Gattungen auch nur wenige wesentliche Merkmale betrachtet werden müssen. Für die Merkmalselektion ergibt sich die Nutzung von sichtbaren, lageinvarianten und lageabhängigen Merkmalen, wenn diese Lagen wesentlich andere Merkmale hervorrufen.

Statistische Untersuchungen erbrachten bei den bildverarbeitungstechnisch schwer differenzierbaren Copepoden folgende Unterschiede verschiedener morphometrischer Parameter bzw. deren Quotienten:

Tabelle 1 Verhältnisse morphometrischer Parameter bei *Acartia*, *Eurytemora*, *Centropages* und *Bosmina*

Merkmal	<i>Acartia</i> (n = 129)	<i>Eurytemora</i> (n = 130)	<i>Centropages</i> (n = 120)	<i>Bosmina</i> (n = 100)
Abdlä/Objlä	0,18 ± 0,02	0,26 ± 0,04	0,29 ± 0,01	Rost/Objlä: 2,14 ± 0,46
Antlä/Objlä	0,57 ± 0,05	0,48 ± 0,04	0,90 ± 0,21	
max. Br./Objlä	0,20 ± 0,02	0,20 ± 0,02	0,25 ± 0,02	Rost/Objbr: 1,66 ± 0,47
längste Antenne	0,64 ± 0,06	0,57 ± 0,08	1,14 ± 0,26	
längste Furcaborste	0,23 ± 0,03	0,22 ± 0,04	0,40 ± 0,03	

(*Bosmina*: einzige Phyllopoden-Gattung des Untersuchungsgebietes mit vergleichbar berechneten Quotienten, diese jedoch signifikant höher als bei allen untersuchten Copepoden).

Centropages: Abdomen-/Objektlänge signifikant größer als bei *Acartia*,
Antennen-/Objektlänge signifikant größer als bei *Acartia* und
Eurytemora.

Keine signifikanten Unterschiede konnten zwischen den Quotienten max. Br./Objektlänge gegenüber *Acartia* und *Eurytemora* ermittelt werden, jedoch liegt der Mittelwert höher.

Eurytemora: Abdomen-/Objektlänge signifikant größer als bei *Acartia*,
Antennen-/Objektlänge signifikant kleiner als bei *Centropages*.

Keine signifikanten Unterschiede konnten zwischen den Quotienten max. Br./Objektlänge gegenüber *Acartia* und *Centropages* ermittelt werden; gleiches gilt für den Quotienten Antennen-/Objektlänge; hier liegt der Mittelwert unter dem von *Acartia*.

Acartia: Abdomen-/Objektlänge signifikant kleiner als bei Centropages und Eurytemora,
 Antennen-/Objektlänge signifikant kleiner als bei Centropages.

Keine signifikanten Unterschiede konnten zwischen den Quotienten max. Br./Objektlänge gegenüber Eurytemora und Centropages ermittelt werden; gleiches gilt für den Quotienten Antennen-/Objektlänge, hier liegt der Mittelwert über dem von Eurytemora.

Die bei den Vermessungen zusätzlich ermittelten morphologischen Parameter sowie deren Verhältnisse zueinander, wurden bei der Erstellung der Klassifikatoren programmtechnisch umgesetzt. Insgesamt finden folgende biologischen Merkmale Berücksichtigung:

14. Verhältnis von Abdomen- zu Objektlänge
16. Verhältnis von max. Breite zu Objektlänge
15. Verhältnis von Antennen- zu Objektlänge
17. Längste Antenne
18. Anzahl der Antennen
19. Längste Borste
20. Anzahl der Borsten.

Die Anzahl der Merkmale ist somit auf 20 Merkmale erhöht worden. Es zeigt sich, daß sowohl morphometrische, also biologische Parameter, als auch bildverarbeitungstypische Merkmale Berücksichtigung finden, die sich effektiv berechnen lassen.

3.2 Betrachtung der Merkmale bei einigen Gruppen

Copepoden

Gerade bei Copepoden ist es von Vorteil, die unterschiedlichen Lagen bei der Merkmalswahl zu berücksichtigen. Die Lage läßt sich mit einfachen bildverarbeitungstypischen Merkmalen wie z.B. Formfaktor, Verhältnis von Originalfläche zur Fläche der konvexen Hülle, Kompaktheitsmaß feststellen. Die für die Copepoden ermittelten wesentlichen Objektlagen wurden in VIETINGHOFF et al. 1993 erläutert, so daß hier auf weitere Aussagen verzichtet werden kann.

In der lateralen Objektlage kann in den meisten Fällen das Abdomen eindeutig vom Cephalothorax getrennt und deren Länge vermessen werden. Die Antennen werden häufig von anderen Körperteilen verdeckt, so daß bei Nutzung dieses Merkmals eine fehlerhafte Berechnung in den Merkmalsatz eingehen würde. Aus diesem Grunde werden in der lateralen Lage zu den BV-Merkmalen zusätzlich folgende Merkmale berücksichtigt:

- Verhältnis von Abdomen- zu Objektlänge,
- Verhältnis von max. Breite zu Objektlänge.

In der dorsoventralen Lage hingegen wird in den meisten Fällen das Abdomen nicht exakt vom Cephalothorax abgetrennt (durch die fächerartige Spreizung der Furcaborsten und den flachen Übergang von Abdomen zum Cephalothorax), so daß es in dieser Lage als nicht wesentlich eingestuft wird. Da in der dorsoventralen Lage die Antennen der Copepoden häufig vom Cephalothorax abgespreizt sind, können diese Objektteile gut vermessen werden. Die Beborstung kann ebenfalls in die Analyse einbezogen werden, da sie sich effektiv berechnen läßt. In dieser Lage werden demnach folgende Parameter berücksichtigt:

Verhältnis von Antennen- zu Objektlänge,
Längste Antenne,
Anzahl der Antennen,
Längste Borste,
Anzahl der Borsten.

Weiterhin hat es sich als günstig erwiesen, "Borsten" als eigenständiges Merkmal zu berechnen, da einige Gattungen dadurch leichter charakterisiert werden können (z.B. *Marengelleria*-Larven, Antennenborsten bei *Acartia* oder Furcaborsten bei den verschiedenen Copepodengattungen). Es kann jedoch nicht zwischen Antennen- oder Furcaborsten unterschieden werden, da beide Parameterquotienten zur Merkmalsberechnung signifikant nicht verschieden sind.

Polychaeten

Durch die Einführung des Merkmals "Borste" können nun die Polychaetenlarven von *Marengelleria* recht gut klassifiziert werden. Die Anzahl und Länge der Borsten ist für diese Gruppe ein wesentliches Merkmal.

Phyllopoden

Die Phyllopoden-Gattung *Bosmina* besitzt als wesentliches Merkmal das Verhältnis von Rostrumlänge/Körperlänge. Das bereits für die Copepoden definierte Merkmal Verhältnis von Antennenlänge/Gesamtlänge entspricht dem genannten Verhältnis.

Zur Unterscheidung der Gattungen *Bosmina*, *Evadne* und *Podon* werden noch folgende Parameter benutzt:

- max. Cephalothoraxbreite/Cephalothoraxlänge,
- relative Lochanzahl (innere Struktur),
- Verhältnis der Ellipsoiddurchmesser.

Bei nicht exakter Findung der Kontur der *Evadne* ist die tütenförmige Brutkammer nicht geschlossen. Die Teile der "Tüte" werden dann als Antennen gefunden, die unter bestimmten Bedingungen (Antennen schneiden sich im spitzen Winkel; Abstand der Antennenspitzen liegen im vordefinierten Toleranzbereich)

zur Tüte vervollständigt werden. Das Objekt wird dann ein 2. Mal gesucht und kann dann exakt vom Untergrund eliminiert werden (Schließalgorithmus bei Evadne).

"Kleines Zooplankton"

Die drei Keratella - Arten, *Keratella cochlearis*, *K. cruciformis* und *K. quadrata*, können aufgrund der unterschiedlichen Anzahl der Abdominalstacheln unterschieden werden (*K. cochlearis* ohne, *K. cochlearis* 1, *K. quadrata* 2 Abdominalstacheln). Die Abdominalstacheln werden mit den bekannten Methoden der Abdomenberechnung bestimmt. Die *Synchaeta* spec. sind eher sackförmig und können durch die kompakte Form unterschieden werden. Die Tintinniden, die durch ihre Parallelität der äußeren Konturseiten definiert sind, können durch die Breite charakterisiert werden. Die Nauplien unterscheiden sich zum einen aufgrund ihrer Größe von den anderen Planktongattungen und zum anderen durch ihre 6 Beine.

3.3 Vorstellung des Softwarepaketes

Das Programm zur Zooplanktonanalyse ermöglicht die interaktive und automatische Bearbeitung von Zooplanktonproben auf Objektträgern, wobei Zooplanktongattungen verschiedener Größenklassen und Herkunftsgebiete untersucht werden können. Aufgrund der vordefinierten Mikroskopvergrößerung erfolgt eine Größeneinteilung in großes (> 1mm) und kleines (< 1mm) Zooplankton.

Das Programm zur Zooplanktonanalyse ist ein menügeführtes Programm zur Aufnahme von Bildmeßreihen, zur Erarbeitung von klassifizierten Stichproben, zum Anlernen von Klassifikatoren mit frei wählbaren Strukturen und der eigentlichen Klassifikation. Es ist so gestaltet, daß Gattungen klassifiziert werden können, die sich durch bestimmbare Merkmale unterscheiden lassen. Es findet eine hierarchische Klassifikationsmethode nach dem numerischen Merkmalsprinzip statt. Die Merkmale der Objekte werden mit den Methoden der digitalen Bildverarbeitung bestimmt und in Merkmalsvektoren gespeichert. Hierbei kommen sowohl reine Bildverarbeitungs- als auch morphologisch, biologische Merkmale zum Einsatz.

Für die Klassifikation von Zooplanktonproben wurde ein Programm erstellt, das auch Bearbeiter ohne Programmierkenntnisse bedienen können. Das Programm besitzt eine graphische Oberfläche. Die vom Bediener vorzunehmenden Eingaben sind leicht verständlich und einfach zu handhaben. Die Analyse kann im interaktiven oder im automatischen Modus durchgeführt werden. Die wesentlichen Menüpunkte werden nun kurz erläutert.

Zu Beginn muß eine Entscheidung zwischen großem (> 1mm) und kleinem (< 1mm) Zooplankton in dem Menüpunkt "*Zooplanktongruppen*" getroffen

werden. Das große Zooplankton wird im Hellfeld bei einer Mikroskopvergrößerung von 25 und das kleine Zooplankton im Dunkelfeld bei 100facher Vergrößerung untersucht. Die Objektiveneinstellungen am Mikroskop erfolgen automatisch, die Umschaltungen zwischen Hellfeld und Dunkelfeld sowie die dazugehörige Fokussierung jedoch manuell. Beim Scharfstellen der Objekte sollte sich der Bearbeiter an den Bildverarbeitungsmonitor halten, damit eine optimale Einstellung für die Bildverarbeitung gewährleistet werden kann. Nach der Scharfstellung muß der Bearbeiter wieder an den Präparaterand fahren, so daß sich die Präparatekante in der Mitte des Bildverarbeitungsmonitors befindet. Dies ist für die Bestimmung der Grauwertschwelle für eine automatische Analyse notwendig. Es empfiehlt sich, daß zu Beginn jeder Zooplanktonanalyse die entsprechende Zooplanktongruppe über das Menü "Zooplanktongruppen" eingestellt wird. Standardmäßig ist großes Zooplankton eingestellt. Beim kleinen Zooplankton kann der Bearbeiter zwischen der direkten automatischen Klassifikation von Objektpräparaten auf dem Scanningtisch und der interaktiven Bearbeitung wählen. Der Weg der direkten Klassifikation wurde aus Speicherplatzgründen gewählt, da ansonsten die Speicherkapazität schnell erschöpft wäre.

Mit dem Menüpunkt "*Meßreihe erstellen*" besteht die Option der interaktiven oder automatischen Erstellung einer Meßreihe. Die automatische Meßreihenerstellung ist für die Digitalisierung von informationstragenden Bereichen der auf dem automatisch steuerbaren Scanningtisch liegenden Objektträgern bei großem Zooplankton geeignet. Dabei werden sowohl die Präparate auf dem Scanningtisch als auch der Deckgläschenbereich auf dem Präparat automatisch ermittelt. Bei der Herstellung der Präparate besteht die Forderung, daß sich das Deckgläschen nahezu in der Mitte des Präparates befinden muß. Jedes vorhandene Präparat wird mäanderförmig, ohne Überlappung, abgefahren, die über eine CCD-Kamera aufgenommenen Bilder werden im Bildspeicher zwischengespeichert und nach entsprechender Anzahl von Bildern als Gesamtbilder abgespeichert. Dadurch wird die Anzahl der am Bearbeitungsrand geschnittenen Objekte kleiner. Die Gesamtbilder werden in mäanderförmiger Reihenfolge abgespeichert, so daß man die Möglichkeit hat, Bilder zur Bearbeitung von geschnittenen Objekten automatisch zusammenzufügen. Die Pfadeinstellungen und der Name einer Meßreihe können beliebig gewählt werden. Es ist aber auch möglich, einzelne Bilder aufzunehmen.

Weiterhin besteht die Möglichkeit der Erarbeitung einer klassifizierten Stichprobe direkt vom Präparat oder von gespeicherten Bildern (Menüpunkt "*Stichprobe erstellen*"). Bei der direkten Methode werden die Präparatbilder nicht gespeichert, sondern nur im Bildspeicher für die Zeit der Bearbeitung eingefroren. Dies hat den Vorteil, daß die Festplatte nicht mit Stichprobenbildern belastet wird. Bei der Stichprobenerarbeitung ist es möglich, die Anzahl der Klassen und Unterscheidungskriterien anzugeben. Im Menü kann aus 20 derzeit vorhandenen Unterscheidungsmerkmalen ausgewählt werden. Die Anzahl der Klassen ist auf 26 begrenzt. Die Objektmerkmale der einzelnen Objekte werden berechnet und anschließend erfolgt die Objektzuordnung zu einer Klasse aufgrund des berechneten Merkmalsvektors durch den Bearbeiter. Die Stichprobe sollte so gestaltet

werden, daß alle Objektklassen etwa mit der gleichen Häufigkeit auftreten (empfehlenswert für eine erfolgreiche Klassifikation sind 20-30 Objekte pro Gattung), so daß die Stichprobenobjekte die jeweiligen Klassen gut repräsentieren. Die Stichprobe kann jederzeit erweitert werden, damit die Anzahl der Objekte den jeweiligen Bedingungen angepaßt wird. Zu Beginn einer neuen Stichprobe muß der Bearbeiter die Biomassen der vorkommenden Gattungen eingeben, um bei der Klassifikation die Gesamtbiomasse pro Gattung ermitteln zu können.

In der Anlernphase kann vom Benutzer die hierarchische Struktur der Klassifikation angegeben werden (Menüpunkt "*Anlernen*"). Es erfolgt eine Aufteilung des $k=n$ Klassenproblems in eine Reihe von 2-Klassenproblemen. Die für die jeweiligen Klassen relevanten Merkmale können vom Bediener ausgewählt werden. Mit Hilfe der Stichprobe werden die Entscheidungsregeln erarbeitet. Diese haben die Form

```
IF (MERKMAL[1] <( >) SCHWELLE) THEN Klasse 1
                               ELSE Klasse 2
```

Es empfiehlt sich aber, die optimale Entscheidungsform zu wählen, indem dem Programm alle Merkmale zur Verfügung gestellt werden.

In der eigentlichen Klassifikation erfolgt dann die Zuordnung von unbekanntem Objekten zu Gattungsklassen nach dem hierarchischen Prinzip (Menüpunkt "*Klassifikation*"). Hierzu müssen die Bildmeßreihe oder einzelne Bilder (interaktive Klassifikation) und die zu benutzende klassifizierte und angelernte Stichprobe ausgewählt werden. Generell werden im Bild nach Objekten ab einer vorgegebenen Binarisierungsschwelle mit den Verfahren der Konturverfolgung gesucht, Merkmale berechnet und anschließend erfolgt die Klassifizierung der Objekte anhand des berechneten und angelernten Merkmalsvektors.

- ♦ Die Ergebnisse der Klassifikation sind:
- ♦ die Gesamtanzahl der klassifizierten Objekte,
- ♦ die Anzahl der Objekte pro Klasse,
- ♦ die Anzahl der Objekte, die keiner Klasse zugeordnet wurden,
- ♦ die Biomasse pro Klasse,
- ♦ die Gesamtbiomasse aller klassifizierten Objekte.

Diese werden in der Ergebnisdatei *.erg gespeichert.

Weiterhin werden die Merkmale und das Vorkommen (Bildname) der Objekte zur weiteren Bearbeitung in Dateien abgelegt. Hierbei sind die Namen der Dateien mit den Klassennamen (gattung.dat) identisch.

Aufgrund der Aufteilung des Programmes in Menüpunkte können verschiedene Klassifikationen vorgenommen werden. Der Bediener muß eine klassifizierte Stichprobe erarbeiten und kann in der Anlernphase selbst die Struktur der Klassifikation eingeben. Damit ist die Klassifikation variabel einsetzbar.

3.4 Steuerung des Scanningtisches für den automatischen Betrieb

Mit dem Mikroskop Axiotron und dem vom PC steuerbaren Scanningtisch (16 Präparate) sind wir in der Lage, ein oder mehrere Zooplanktonpräparat(e) im automatischen Betrieb auswerten zu lassen. Dazu sind bestimmte software-, als auch hardwaremäßige Einstellungen notwendig. Die hardwaremäßigen Voraussetzungen für den semiautomatischen Betrieb sind durch den automatischen Objektivrevolver und durch den automatisch steuerbaren Scanningtisch gegeben. Für einen vollautomatischen Betrieb sind aber noch weitere Zusatzmodule am Mikroskop wie automatischer Z-Trieb und ein steuerbarer Kondensator notwendig. Da eine Trennung zwischen der Einstellung der Mikroskopvergrößerung (muß im Menüpunkt Zooplanktongruppen zu Beginn vorgenommen werden) und der Steuerung des Scanningtisches besteht, wirken sich die nicht vorhandenen Module nicht auf die weitere automatische Meßreihenanalyse aus.

Die Steuerung des Scanningtisches erfolgt über die serielle Schnittstelle des PCs vom Programm der Zooplanktonanalyse. Folgende Schritte sind als wesentlich zu betrachten:

1. *Benutzervorgabe* des Scanningtischtypes, da daraus die Anzahl der zu untersuchenden Präparate abgeleitet wird (Hersteller: Fa. Märzhäuser mit der Auswahl für Präparateanzahl 1, 2, 4, 8, 16),
2. Automatische *Suche der mit Präparaten belegten Positionen*,
3. Automatische Ermittlung der zu untersuchenden Präparatefläche (*Deckgläschen*) - wobei eine nahezu mittige Lage anzustreben ist und
4. flächendeckende Mäanderfahrten (ohne Überlappungen oder Leerstellen) innerhalb des Präparates zur Bildaufnahme.

Durch die Vorgabe der Präparateanzahl hat der Bearbeiter die Möglichkeit der Anpassung seiner Hardware an das Programm. Besitzt er einen Scanningtisch mit 16 Präparatepositionen, kann er die zum Programm mitgelieferte Scanningtisch-Datei tab16.mcl aufrufen. Diese Datei enthält die x- und y- Koordinaten der jeweiligen Präparatepositionen, gemessen in der Mitte der linken Objektträgerkante. Werden Scanningtische mit weniger Präparaten angewandt, so muß der Bearbeiter die Scanningtisch-Datei für seine spezielle Hardware selber erstellen.

Bei der Suche nach vorhandenen Präparaten wird jeweils die x,y - Koordinate angefahren und durch Kantenextraktion analysiert. Wurde eine Objektträgerkante festgestellt, erfolgt die Suche nach der vertikalen und anschließend nach der horizontalen Deckgläschenkante durch Kantenerkennung. Das Deckgläschen sollte nahezu in der Mitte des Objektträgers positioniert werden. Weitere Forderungen werden nicht gestellt. Ist ein leerer Objektträger vorhanden, erkennt der Rechner dies als **fehlerhaftes Präparat** und die Suche wird an der nächsten Position fortgesetzt. Der Schnittpunkt der horizontalen mit der vertikalen Deckgläschenkante ist der Startpunkt für die Bildaufnahme.

Zur Reduzierung von Arbeitszeit und Speicherkapazität erfolgt die Mäanderfahrt mit Bildaufnahme und Übergabe in den Bildspeicher immer innerhalb eines Präparates so, daß anschließend gleich mehrere Bilder gespeichert werden (jeweils 4 Schritte nach rechts, 1 Schritt nach unten, 4 Schritte nach links, 1 Schritt nach unten, 4 Schritte nach rechts, 1 Schritt nach unten, 4 Schritte nach links usw.).

Zur Verringerung von geschnittenen Objekten werden 4 Bilder der Größe 512x512 Pixel zu einem 1024x1024 Pixel großen Bild zusammengefaßt (abhängig vom Bildspeicher). Bei 25facher Vergrößerung ergeben sich somit 52 1MByte-Bilder pro Präparat, bei 100facher Vergrößerung sind es bedeutend mehr (ca. 700 MB).

Für die Erzeugung von digitalen Abbildern von einem Objektträger sind je nach Rechenleistung ca. 12 Minuten notwendig (bei 25facher Vergrößerung). Bei optimaler Komprimierung der Bilder ist dabei mit einem Speicherbedarf von ca. 300 MB für 16 Präparate zu rechnen, ein Punkt, der die Anwendung der bekannten Vor- und Aussortierung von Leerbildern erforderlich macht.

Aufgrund des enormen Speicherplatzbedarfs bei der 100fachen Vergrößerung wurde die Umstellung der Bearbeitung auf Sofortanalyse (Klassifikation) und paralleler Videoaufzeichnung vorgenommen, so daß o.g. Problemkreis ausgeschlossen worden ist, ohne an Reproduzierbarkeit zu verlieren.

Für den Einsatz zur qualitativen und quantitativen Analyse sind Vorüberlegungen angestellt worden, so daß mittels spezieller Zählkammern eines definierten Volumens auch Abundanzen der Zooplankter ermittelt werden könnten.

3.5 Ergebnisse der hierarchischen Klassifikation

Es wurden verschieden strukturierte, numerisch - hierarchische Klassifikatoren mit verschiedenen Merkmalsvorgaben getestet. Ergebnis dieser Untersuchungen sind Klassifikatoren zweier Größenklassen für Objekte < 1mm ("Kleines Zooplankton") und > 1mm ("Großes Zooplankton") Länge, die ca. 90 % aller angebotenen Objekte richtig zuordnen.

Zum einen wurden alle Merkmale in der Anlernphase zur Verfügung gestellt, so daß die wesentlichen Merkmale durch einen vom Rechner bestimmten Optimierungsprozeß ermittelt wurden. Zum anderen wurden verschiedene Merkmalsvorgaben vom Bearbeiter vorgenommen.

Muster eines postoptimierten Klassifikators für "Großes Zooplankton" bei automatischer Merkmalsvergabe:

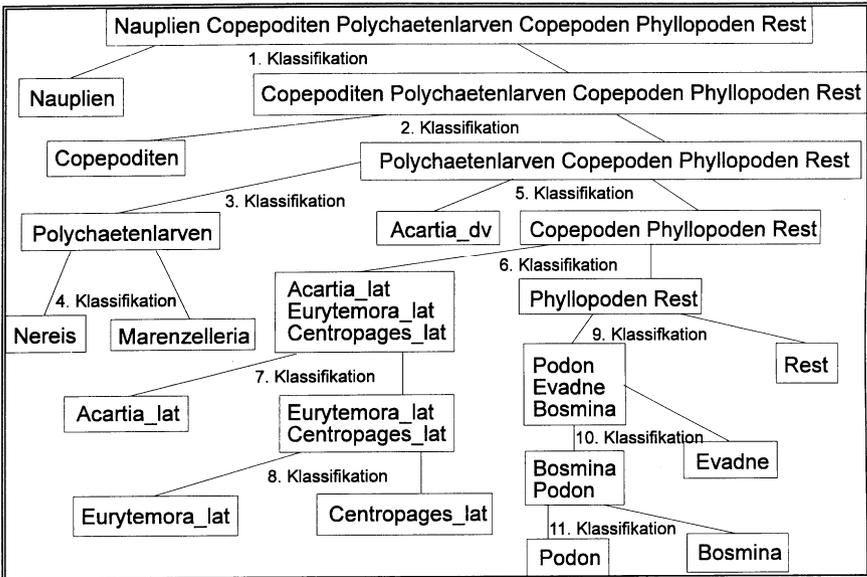


Abb. 4 Hierarchischer Klassifikator für "Großes Zooplankton" (89.6% richtige Zuordnung)

Muster des postoptimierten Klassifikators für "Kleines Zooplankton" mit automatischer Merkmalsvergabe (s. folgende Seite).

Nach Testung einer Vielzahl verschiedener Klassifikatoren beider Zooplanktongruppen wird erkennbar, daß

- a) die Struktur eines Klassifikators und
- b) die Art der Merkmalsvorgabe

(optional - subjektiver Faktor oder automatisch - objektive Merkmalsberechnung) wesentlichen Einfluß auf das Klassifizierungsergebnis hat.

Hierarchischer Klassifikator für kleine Zooplankter des Greifswalder Boddens und der südlichen Ostsee

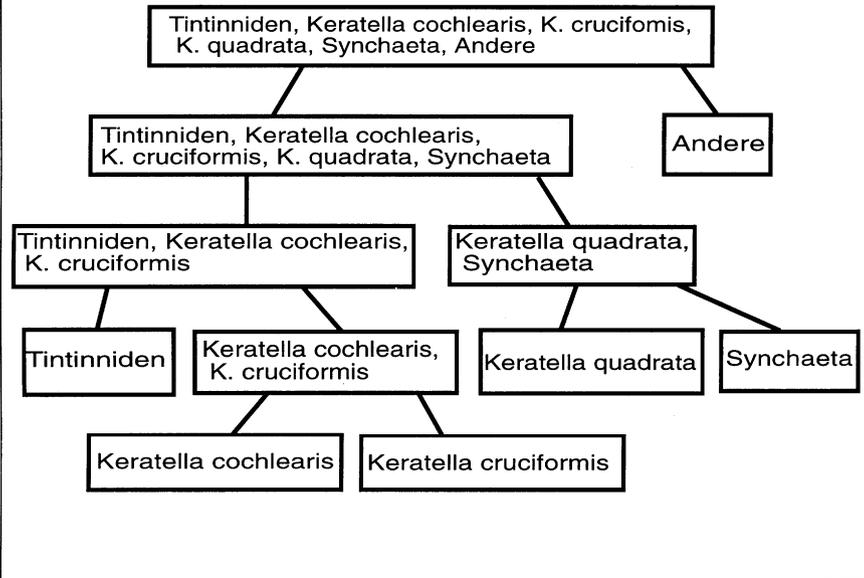


Abb. 5 Hierarchischer Klassifikator für "Kleines Zooplankton"
(89,8 % richtige Zuordnung der Objekte)

4 Diskussion und Zusammenfassung

Die bei den Vermessungen zusätzlich ermittelten morphologischen Parameter sowie deren Verhältnisse zueinander, wurden bei der Erstellung der Klassifikatoren programmtechnisch umgesetzt.

Die Anzahl der Merkmale ist somit auf 20 Merkmale erhöht worden. Es zeigt sich also, daß sowohl morphometrische biologische Parameter als auch bildverarbeitungstypische Merkmale Berücksichtigung finden müssen, die sich wiederum effektiv berechnen lassen müssen. Folgende Merkmale finden Berücksichtigung:

1. Konkavitätsmaß
2. Formfaktor
3. innere Struktur
4. Kompaktheit
5. Fläche des Objektes
6. Länge der Kontur
7. min. Durchmesser der Ellipse
8. Fläche der Ellipse
9. Verhältnis von min. zu max. Durchmesser
10. Länge der Konvexkontur
11. Konvexfläche
12. Verhältnis Kontur- zu Konvexfläche
13. Formfaktor der Konvexkontur.
14. Verhältnis von Abdomen- zu Objektlänge
16. Verhältnis von max. Breite zu Objektlänge
15. Verhältnis von Antennen- zu Objektlänge
17. Längste Antenne
18. Anzahl der Antennen
19. Längste Borste
20. Anzahl der Borsten.

Zur Feststellung der Klassifikationsgüte wurde der Ergebnisvergleich folgendermaßen vorgenommen:

1. Bearbeiter klassifiziert die Probe,
2. Programm klassifiziert die Probe.

Durch Vergleich beider Ergebnisse kann die Qualität der Klassifikation beurteilt werden, die bei 90% liegt.

Mit dem z.Z. vorliegenden Programm können folgende Punkte abgearbeitet werden:

Wahl des Planktons (groß, klein) - damit verbunden eine automatische Einstellung des Objektivs am Mikroskop und die Möglichkeit der Fokussierung,

Meßreihe erstellen - Bildscanning, automatische Steuerung des Scanningtisches, automatische Präparatesuche auf dem Scanningtisch, automatische Digitalisierung und Speicherung der Bilder ("Großes Zooplankton") oder Videomitschnitt und Sofortanalyse, bestehend aus taxonomischer Analyse, Zählung, Biomassebestimmung und Datensystematisierung und -speicherung ("Kleines Zooplankton"),

Stichprobe erarbeiten - Objektisolierung und Merkmalsextraktion für die manuelle Zuordnung der Tierarten zum Anlernen eines Klassifikators aus Livebildern oder digitalisierten Bildern,

Anlernen eines Klassifikators - Optimierung der Klassifikator- und der Merkmalsstruktur,

Klassifizierung - automatische, taxonomische Identifizierung anhand digitalisierter Objektbilder.

Im Zeitvergleich ist der Mensch noch schneller als der Rechner. Man kann aber eine Zeitreduzierung zum einen durch die Erhöhung der Stichprobenelemente und zum anderen durch einen schnelleren PC (Pentium - Prozessor, höhere Taktfrequenz, etc.) erreichen. Außerdem kann der Computer kontinuierlich arbeiten, d.h. auch nachts, so daß die Zeitbetrachtung in den Hintergrund gerückt werden sollte. Der Mensch würde von aufwendiger, monotoner Arbeit entlastet werden und würde Überwachungs- und Bedienungsaufgaben sowie die Auswertung der Ergebnisse übernehmen. Der subjektive Faktor der Analyse wäre ebenfalls beseitigt, so daß auch hier mit Kontinuität zu rechnen ist. Weiterhin werden mit der PC-Klassifikation wesentliche Objektmerkmale berechnet und gespeichert. Gleichzeitig erfolgt die Speicherung des Bildmaterials für weitere Untersuchungen (bei manueller Bearbeitung werden die klassifizierten Proben meist entsorgt, so daß weitere Untersuchungen nicht möglich sind).

Die Klassifikation von einem Präparat mit einem PC 80486 DX2 60 MHz dauert etwa 20 Minuten (20 - 100 Objekte) bzw. von einem Scanningtisch 5 h 20 min. Durch Verlagerung der Klassifikation in die Nachtstunden (außerhalb der Arbeitszeit) wirkt sich der enorme Zeitbedarf nicht negativ aus.

Für die Klassifikation von Zooplankton aus Mikroskopbildern ist ein Programmpaket erstellt worden, das für die interaktive und automatische Analyse von Zooplankton auf Objektträgern, die auf einen automatisch steuerbaren Scanningtisch liegen, geeignet ist. Das Programm besitzt ein benutzerfreundliches Menü, das an das IMTRONIC-Konzept angepaßt wurde und somit für viele Bearbeiter leicht zugänglich ist. Das Programmpaket ist in der Programmiersprache C unter Microsoft-C erstellt worden.

Für die Klassifikation von Zooplanktern des Greifswalder Boddens und der südlichen Ostsee sind klassifizierte Stichproben erarbeitet worden, die dann für die Klassifikation von Zooplanktern aus den genannten Gebieten verwendet werden können.

Ein weiterer Vorteil des Programms besteht in der Modifizierbarkeit und Verifizierbarkeit der zu untersuchenden Zooplankter, d.h. der Bearbeiter hat sowohl die Möglichkeit der Hinzunahme von weiteren Objekten in die vorhandene Stichprobe, als auch die Möglichkeit einer neuen Definition der zu untersuchenden Zooplanktergattungen. Die Klassifikation kann somit der jeweiligen Aufgabenstellung angepaßt werden; weiteres Gattungsspektrum kann angelernt und klassifiziert werden.

Für die Entwicklung der Algorithmen der Zooplanktonklassifikation wurden digitalisierte Mikroskopbilder verwendet und diese sind durch entsprechende Modifikationen generell an die anderen Bildaufnahmesysteme anpaßbar. So wurden ebenfalls Videobilder des Ichthyoplanktonrecorders bearbeitet, die eine Grobklassifizierung in Fischeier und -larven, Copepoden, Euphausiden und Chaetognathen umfaßte.

Danksagung

Unser Dank gilt dem BMBF/ BEO, das unsere Arbeit zu 100 % förderte. (Förderprojekt 03F0084C)

Literatur

- Autorenkollektiv: Wissenschaftliche Beiträge der Friedrich-Schiller-Universität Jena AUSBILD '87; 1987
- Autorenkollektiv: IMAGE_C Bildverarbeitungssoftware - Nutzerhandbuch; IMTRONIC GmbH Berlin 1992
- Autorenkollektiv: Segmentierungsalgorithmus, Interner Bericht; IMTRONIC GmbH Berlin 1994
- BRENNING, U.: Das Zooplankton des Greifswalder Boddens. Meeresmuseum Stralsund 1992
- ENCARNACAO, J., STRAßER, W.: Computergraphics. Akademie-Verlag, Berlin, 1988
- ERNST, H.: Merkmalextraktion und Mustererkennung. In: CHIP PLUS 7, München Juli 1988; Seite 20 - 22
- FRITSCH, K.: Visuelle Sensoren. Akademie-Verlag Berlin 1987
- HABERÄCKER, P.: Digitale Bildverarbeitung, Grundlagen und Anwendungen. Hanser-Verlag, München; 1989
- HUFNAGL, P., VOSS, K.: Merkmale der Form, Größe und Lage digitaler Objekte. In: Bild und Ton 37 (1984), Verlag Leipzig, Seiten 293-298
- HUFNAGL, P.: Zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit der automatischen Mikroskopbildanalyse. Dissertation A, Humboldt Universität Berlin 1987
- KITTLER, J.: Feature Selection and Extraction. Handbook of Pattern Recognition and Image Processing, Academic Press, 1986, Seiten 59-83
- KREBEL, U., SCHÜRMAN, J., FRANKE, J.: Neuronale Netze für die Musterklassifikation; in Mustererkennung 1991; Springer Verlag Berlin 1991
- NIEMANN, H.: Klassifikation von Mustern. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1983
- PALZER, H.; HACKER, F.: Untersuchungen zur Populationsdynamik verschiedener Zooplankter des Greifswalder Boddens im Jahresgang 1994 unter Berücksichtigung biotischer und abiotischer Faktoren; In: Beiträge zur angewandten Gewässerökologie Norddeutschlands, Verlag: Natur und Text in Brandenburg GmbH, 1995 (in press)
- PESTA, O.: Copepoda, X. c, Copepoda non parasitica. In: Tierwelt der Nord- und Ostsee, ed.: GRIMPE & WAGLER, 1934
- RAMMNER, W.: Phyllopoda, X. a. In: Tierwelt der Nord- und Ostsee, ed.: GRIMPE & WAGLER, 1934
- ZÖLDER, A.: Ein Beitrag zur automatischen Zooplanktonanalyse mit Methoden der digitalen Bildverarbeitung. Dissertation A, Universität Rostock 1992
- ZÖLDER, A.; PALZER, H.: Entwicklung eines intelligenten Zooplanktonanalysegerätes mittels Bildverarbeitung unter Verwendung morphometrischer Parameter des Zooplanktons aus dem Greifswalder Bodden und der südlichen Ostsee. In: Beiträge zur angewandten

Gewässerökologie Norddeutschlands, Verlag: Natur und Text in Brandenburg GmbH, 1995
(in press)

- ZÖLDER, A., PALZER, H. und VIETINGHOFF, U.: Entwicklung eines intelligenten Zooplanktonanalysegerätes mit dem Bildverarbeitungssystem IMTRON 2000 unter Verwendung morphometrischer Parameter des Zooplanktons aus dem Greifswalder Bodden und der südlichen Ostsee. In: Firmendruckschrift IMTRONIC GmbH, Katalog - Bildbearbeitung, Bildanalyse, Bilddokumentation, Bildarchivierung; 1995, Seite 29
- VIETINGHOFF, U.; ZÖLDER; A., PALZER, H. und ESCHHOLZ, P.: Entwicklung von Algorithmen für die automatische Erkennung von Bildern des Zooplanktons mit Hilfe eines Bildverarbeitungssystems. Zwischenbericht Dezember 1993 (Förderprojekt BMFT/ BEO 03F0084C) - unveröffentlicht
- VIETINGHOFF, U.; ZÖLDER; A., PALZER, H. und ESCHHOLZ, P.: Entwicklung von Algorithmen für die automatische Erkennung von Bildern des Zooplanktons mit Hilfe eines Bildverarbeitungssystems. Zwischenbericht Dezember 1994 (Förderprojekt BMFT/ BEO 03F0084C) - unveröffentlicht
- VIETINGHOFF, U.; ZÖLDER; A., PALZER, H. und ESCHHOLZ, P.: Entwicklung von Algorithmen für die automatische Erkennung von Bildern des Zooplanktons mit Hilfe eines Bildverarbeitungssystems. Abschlußbericht März 1995 (Förderprojekt BMFT/ BEO 03F0084C) - unveröffentlicht

Verfasser

Dr. - Ing. Anke Zölder,
Dr. rer. nat. Heiko Palzer,
Prof. Dr. habil. Ulrich Vietinghoff
Universität Rostock
FB Biologie
Abt. Biophysik
18051 Rostock