

Geowissenschaftliche Modellsimulation mit ATLAS2000

Mario Melle¹ und Bernd Triebfürst²

ZUSAMMENFASSUNG

Simulationen von geowissenschaftlichen Modellen werden heute meist mit Hilfe von Programmarchitekturen und -sprachen durchgeführt, die es nicht oder nur schwer ermöglichen auf unterschiedlichen Rechnerplattformen und Betriebssystemen abzulaufen, Online-Ressourcen, wie Datenbanken und Werte von Meßstationen, aber auch flexibel und erweiterbar eigene geowissenschaftliche Modelle einzubinden.

Im Rahmen des, von der DFG geförderten Schwerpunktprogrammes *V3D2*³ wurde ATLAS2000⁴ als Gemeinschaftsprojekt des Institutes für Informatik der Universität Leipzig⁵ und des Institutes für Physische Geographie der Universität Freiburg⁶ im Zeitraum von 1.12.1997 bis 9.5.2000 durchgeführt und ein Prototyp eines Web-basierten digitalen Atlas entwickelt, der auf diese Punkte eingeht.

Hierzu werden beispielhaft klimatologische Modelle unterschiedlicher Komplexität für den Einsatz in Web-Atlanten aufbereitet. Datengrundlage sind digitale Karten (Geländemodelle, Landnutzungsklassifikationen, Luftbilder) und Klimameßreihen die in einer serverseitigen Datenbank abgelegt sind. Bisher beschränken sich die Daten auf den Untersuchungsraum Südbaden.

Dem Nutzer (Anfänger, Fortgeschrittener oder Wissenschaftler) bietet sich die Möglichkeit Daten aus der Datenbank auszuwählen und mit den bereits implementierten Modellen Simulationen durchzuführen und zu visualisieren. Darüber hinaus ist geplant, daß jeder Nutzer eigene Datenquellen und Modelle einbringen kann, um so existierendes Wissen und Daten

¹ Mario Melle, Institut für Informatik, Universität Leipzig, <mailto:Melle@Informatik.Uni-Leipzig.de>, <http://www.Informatik.Uni-Leipzig.de/~melle>

² Bernd Triebfürst, Institut für Physische Geographie, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, <mailto:Bernd.Triebfuerst@IPG.Uni-Freiburg.de>, <http://www.IPG.Uni-Freiburg.de/personen/betri.html>

³ Verteilte Verarbeitung und Vermittlung digitaler Dokumente, <http://www.cg.cs.tu-bs.de/v3d2>

⁴ <http://shear.Informatik.Uni-Leipzig.de:2000>

⁵ DFG-Projektnummer: SA 449/6-1

⁶ DFG-Projektnummer: GO 317/7-1

wiederzuverwenden. Geowissenschaftliche Modelle werden dadurch einem breiteren Nutzerkreis zugänglich gemacht und austauschbar.

Verschiedene in ATLAS2000 realisierte Konzepte und eingesetzte Technologien werden im Vortrag am Beispiel eines Modells zur Berechnung von Karten der nächtlichen Oberflächentemperatur in wolkenfreien Strahlungsnächten vorgestellt. Das Modell ermöglicht dem Nutzer aus einer Klimadatenbank eine beliebige Strahlungsnacht auszuwählen und auf der Grundlage eines digitalen Geländemodells, einer Landnutzungsklassifikation und der Temperaturmeßwerte eine Karte der nächtlichen Oberflächentemperatur zu berechnen und zu visualisieren. Es handelt sich hierbei um ein statistisches Modell, daß die Berechnungen in verschiedenen Auflösungsstufen durchführen kann. Dadurch wird eine progressive Übertragung der Modellergebnisse von Server an den Client möglich.

1. ZIELE VON ATLAS2000

Im Sinne klassischer Atlanten ist ATLAS2000 ein didaktisch aufbereitetes Nachschlagewerk für raumbezogene Informationen. Im Sinne eines GIS bietet ATLAS2000 die Möglichkeit, Informationen verschiedener Sachebenen zu verknüpfen und kartographisch darzustellen. Dabei können auch eigene Daten vom Nutzer integriert und bearbeitet werden. Über die Funktionalitäten bisheriger digitaler Atlanten und WEB-GIS hinaus, bietet ATLAS2000 Zugangsmöglichkeiten zu verschiedenen Modellen, die hinter den Karten stehen. Den Nutzern wird die Durchführung eigener Modellrechnungen und die Erstellung von Karten auf der Grundlage der Modellergebnisse ermöglicht. Hierzu stehen eine Auswahl an numerischen und statistischen Modellen, umfangreiche Meßdaten und beispielhafte Modellläufe zur Verfügung. ATLAS2000 wendet sich dabei an einen großen Nutzerkreis mit unterschiedlichen Kenntnissen.

Durch die Möglichkeit, selbst Simulationsrechnungen durchzuführen, wird dem Anwender ein Zugang zu den Prozessen gegeben, deren Ergebnisse in den thematischen Karten dargestellt sind.

ATLAS2000 liefert einen konzeptionellen Beitrag zur Verwaltung digitaler Karten in digitalen Bibliotheken:

- Ortsgebundene Daten (digitalisierte Tabellen, Statistiken, Texte) können über digitale Karten erschlossen und abgefragt werden.
- Karten können durch den Zugang zu den Primärdaten, aus denen die Karten abgeleitet werden, schnell aktualisiert werden.
- Geowissenschaftliche Modelle werden durch ihre Unabhängigkeit von Rechnerplattformen und ihre didaktische Aufbereitung in Bibliotheken einem breiten Nutzerkreis zur Verfügung gestellt.

2. DIDAKTIK VON ATLAS2000

In konzeptioneller Hinsicht verfolgt ATLAS2000 zwei Ziele: zum einen entspricht ATLAS2000 dem klassischen Atlas-Konzept und dient damit als Nachschlagewerk für raumbezogene Informationen und Prozesse. Zum anderen erlaubt die interaktive Nutzung der implementierten Modelle das Erlernen typischer Abläufe und Vorgänge in der Geosphäre auf der Basis eigener Vorgaben und z.T. eigener Daten. Als Pilotprojekt konzentriert sich

ATLAS2000 dabei auf Aspekte aus dem Bereich der Klimatologie und Meteorologie.

Aus didaktischer Sicht wird in ATLAS2000 eine mehrstufige Aufbereitung der dargebotenen Themen angestrebt, so daß ein breiter Kreis potentieller Nutzer mit unterschiedlichem Kenntnisstand und unterschiedlichem Interesse erreicht werden kann. Als Mehrstufigkeit wird hierbei die Aufbereitung der Inhalte auf unterschiedlichen Niveaus von kurzen und einfachen Erläuterungen bis hin zu umfangreichen Lerneinheiten zu bestimmten Themen verstanden.

Für die Bereitstellung der in ATLAS2000 verfügbaren Daten und Modelle kann der Zugriff mit Hilfe gängiger Web-Browser erfolgen. Die einzelnen Seiten sind in einen gemeinsamen Rahmen eingebettet, so daß dem Nutzer der Zugang zu den angebotenen Informationen möglichst einfach gemacht wird. Für die Aufbereitung der WWW--Seiten wurden folgende Anforderungen berücksichtigt:

- eine möglichst einheitlich gehaltene Oberfläche zur Präsentation der Informationen,
- eine Navigationsumgebung, die dem Nutzer hilft, die ihn interessierenden Themen rasch zu finden und die dafür sorgt, Kombinationen von Themen, die nicht plausibel sind (wie etwa die Modellierung von Kaltluft auf der Basis eines nur grob aufgelösten Digitalen Geländemodells), zu vermeiden,
- Plattformunabhängige Visualisierungstools,
- Basisfunktionalitäten eines GIS, wie zum Beispiel Zooming, implementiert und
- Hilfstexte in Form kurzer Zusatzerläuterungen (Popup), als aufbereitete Lerneinheiten und als ausführliche mit einem Index versehenen Hilfeseiten zur Verfügung stellt.

Im Hinblick auf die oben genannte enzyklopädische Funktionalität ist in ATLAS2000 die Möglichkeit einer datenbankorientierten Auswahl nach Themen, Räumen, Daten oder Prozessen implementiert, die es dem Nutzer erlaubt, auf verschiedenen Wegen zu den gesuchten Informationen zu gelangen. Die Präsentation dieser Informationen ist zum einen über Karten und Bilder, zum andern mit Hilfe fachspezifischer Visualisierungsverfahren erfolgt. Zusätzlich zu den in ATLAS2000 selbst präsentierten Inhalten verfolgt das Projekt die Möglichkeit, über eine Sammlung von Verweisen zu anderen WWW-Seiten mit ähnlicher Zielsetzung zu gelangen.

Hinsichtlich der in ATLAS2000 implementierten Modelle erlauben hypermedial aufbereitete Beispielrechnungen und Erläuterungen dem Nutzer einen raschen Einstieg sowohl in eine prozessorientierte Betrachtung klimatologischer Vorgänge als auch in die mit den Methoden der computergesteuerten Simulation dieser Prozesse verbundenen Problematik. Durch die Möglichkeit der Interaktion wird dem Nutzer die Gelegenheit gegeben werden, Eingangsdaten und Startparameter für entsprechende Beispielrechnungen zu modifizieren und somit die Auswirkungen dieser Einflußgrößen auf klimatologische Prozesse nachzuvollziehen.

3. TECHNISCHE KONZEPTION

Das Ziel der Architektur ist es, einen auf Standards basierenden flexiblen Zugriff auf Daten zu ermöglichen, einen Weg zu bieten eigene Daten einzubinden und eigene Modellimplementierungen durchzuführen und Nutzer interaktive Modellberechnungen zu ermöglichen. Vorausberechnete Modellabläufe und Ergebnisse (Beispielrechnungen) werden durch die Standardmöglichkeiten des Publizierens im Internet abgedeckt (statische HTML-Seiten) und wurden im ATLAS2000-Prototypen bereits beispielhaft integriert.

3.1.Schichtarchitektur

Durch das Aufteilen der Anwendung in drei Schichten (3-tier application, siehe Figure 1) ist es möglich die drei logischen Komponenten der Anwendung voneinander zu trennen: Oberfläche, Anwendungslogik und Datenhaltung.

Verteilte Web-Anwendungen verteilen ihre Komponenten dabei über verschiedene Computer des Netzwerkes. Ein übliches Vorgehen zur Unterteilung in diese Komponenten ist die Anwendung des Model-View-Controller-Entwurfsmusters (MVC). Das Model (oder die Anwendungslogik) ist "das Interne" der Anwendung und "modelliert" die Daten. Der View und der Controller zusammen formen das Benutzerinterface. Alle drei benötigen eine Datengrundlage (die unterste Schicht), auf der sie arbeiten können.

Bei geowissenschaftlichen Modellen beschränken sich die Datenquellen auf (im wesentlichen) folgende wichtige Möglichkeiten:

- Rasterdatensätze
- Zeitreihen (Meßstationen)
- Punktmessungen

Innerhalb ATLAS2000 soll eine einheitliche Zugriffsmöglichkeit auf all diese Daten ermöglicht werden. Hierzu wird der Zugriff in der Anwendungsschicht abstrahiert, in eine Teilschicht (Zugriffsschicht), und auf Objekte abgebildet (Mapping).

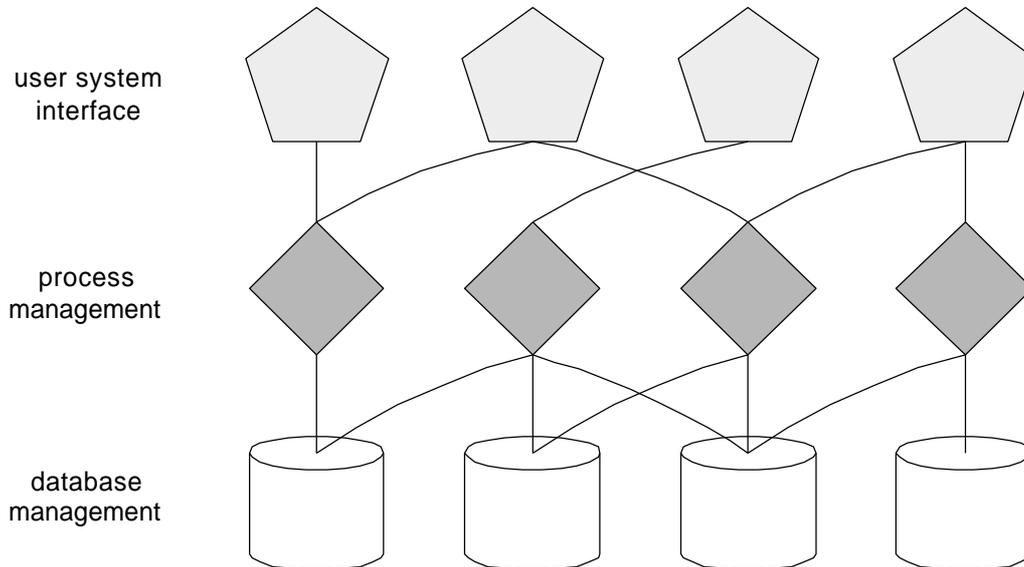


Figure 1 Die drei-schichtige Architektur (3-tier) wird im Internet durch den Browser (user system interface) und Web-Server und (process management, database management) abgebildet.

Bei der Implementierung der Anwendungslogik, mittlere Schicht oder auch Middleware genannt, werden diese gemapten Daten verwendet. In ihr wird die gesamte Komplexität der Anwendung von den Daten und der Visualisierung abstrahiert, und zur Aufgabenverteilung und/oder Komplexitätsreduzierung weiter verfeinert. Dabei wird aus der drei-schichtigen Architektur eine n-schichtige Architektur (siehe Figure 2). Im Internet wird die mittlere Schicht durch den Web-Server, Server-Erweiterungen und *Application Server* abgebildet.

ATLAS2000 verwendet Java als Möglichkeit der Abbildung geowissenschaftlicher Zusammenhänge in die Client/Server-Umgebung Internet. So können auf der Server-Seite zum Beispiel Servlets⁷, Java Server Pages⁸ (JSP) und Enterprise Java Beans⁹ (EJB) eingesetzt werden. So abstrahieren EJBs Vorgänge in der Anwendung bis direkt auf die Persistenz von Datenbankeinträgen und werden mit Hilfe von *Application Servern* und einem in diesen integrierten EJB-Container auf dem Server installiert.

⁷ <http://java.sun.com/products/servlet/>

⁸ <http://java.sun.com/products/jsp/>

⁹ <http://java.sun.com/products/ejb/>

Innerhalb des Projektes ATLAS2000 werden zur Zeit Untersuchungen zu Servlets und JSP durchgeführt, die es ermöglichen dynamisch HTML-Seiten zu generieren.

Visualisierungen werden im Falle einer Internet-Anwendung durch den Browser durchgeführt. Es ist möglich, die im Browser unterstützten Formate (Bilder, Image Maps, Formulare, etc.) entsprechend den *MIME-Media-Types*¹⁰ zur Benutzerinteraktion zu verwenden. Allerdings wird es erst durch die Nutzung der Plugin-Technologien oder von Java-Applets möglich komplexere Interaktionen durchzuführen. Hinzu kommt, daß es so möglich ist, Inkonsistenzen bei der Implementierung von "Standards" in Browsern verschiedener Hersteller zu umgehen.

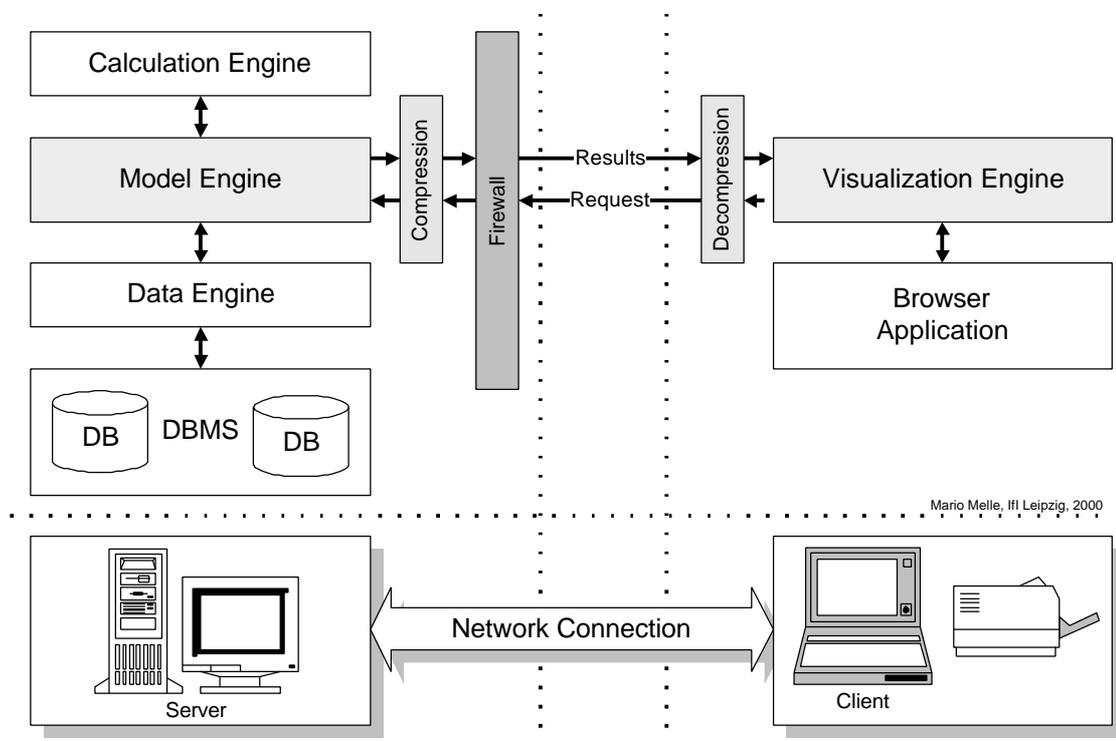


Figure 2 Die Architektur von ATLAS2000 ist entsprechend dem Schichten-Modell aufgebaut. Auf der Server-Seite (links) befindet sich Datenbank-Schicht und beliebige Schichten der Middleware. Auf der Client-Seite befinden sich vor allem die Visualisierung und Teile der Middleware (rechts).

Dieses Szenario führt zu der in Figure 2 gezeigten Architektur. Die *Engines* sind dabei Verfeinerungen (Schichten) der Middleware, die in der *Data Engine*, die Datenbank-Operationen, in der *Visualization Engine*, die Anzeige-Operationen, und der *Model* und *Calculation Engine*, die Modellberechnungen ermöglicht, abstrahiert sind.

¹⁰ Multipurpose Internet Mail Extensions, <http://www.oac.uci.edu/indiv/ehood/MIME/>

Alle *Engines* wurden mit Java implementiert und lassen sich durch Java-Applets in Web-Browser einbinden oder aber als eigenständige Java-Anwendungen ausführen.

4. GEOWISSENSCHAFTLICHE MODELLINTEGRATION

Die Modelle, die zur Modellierung geophysikalischer Prozesse in ATLAS2000 integriert wurden, lassen sich in zwei Kategorien unterteilen. Einerseits handelt es sich um allgemeine statistische Modelle, andererseits um fachspezifische physikalische Modelle. Für beide Kategorien wurden exemplarisch Modelle verschiedener Komplexität ausgewählt, die alle innerhalb der Konzeption des Freiburger Regionalisierungsmodells FREIM liegen. FREIM wurde am IPG ausgehend von konkreten geowissenschaftlichen Anwendungen entwickelt. Es handelt sich hierbei um ein Methodengerüst zur Ableitung flächendeckender Datensätze geophysikalischer Parameter und zur Erschließung des Raum-Zeitkontinuums dieser Parameter. Hierbei werden zeitlich hochaufgelöste Punktmessungen der Parameter in statistischen und deterministischen Modellen mit räumlich hochaufgelösten Flächendatensätzen gekoppelt, so daß eine Ableitung neuer hochaufgelöster Flächendatensätze zu verschiedenen Zeitpunkten ermöglicht wird (GOßMANN ET AL. 1993).

Alle Modelle wurden so aufbereitet, daß eine leichte Bedienung durch Anwender möglich ist. Eingangsdaten können sowohl die, innerhalb von FREIM zur Verfügung stehenden Daten, als auch neue Datensätze von Anwenderseite sein. Für eine weitestgehende Plattformunabhängigkeit wurden alle Modelle nach Java portiert und gekapselt. Bisher wurden folgende Beispiele statistischer Modelle in ATLAS2000 integriert.

4.2. Lineares Regressionsmodell für Temperaturkarten

Die einfachste Möglichkeit, Karten der Luft- oder Oberflächentemperatur aus Meßwerten abzuleiten, besteht darin, durch eine lineare Regression die Lufttemperatur aus der Geländehöhe zu bestimmen. Die Regression ergibt sich aus den Stationsmessungen der Temperatur zu einem ausgewählten Zeitpunkt und der Höhe der Stationen. Mit Hilfe der Regressionsgleichung kann aus dem digitalen Geländemodell (Flächendatensatz) ein Flächendatensatz der Temperatur erzeugt werden. Eine Verbesserung läßt sich durch eine anschließende Residueninterpolation erreichen. Dieses einfache Modell ist nur von didaktischer Bedeutung, da hier alle wichtigen Schritte der Regionalisierung im Rahmen des FREIM-Schemas verdeutlicht werden.

4.3. Multiples Regressionsmodell

Der Zusammenhang zwischen den gemessenen Klimaparametern in einem bestimmten Zeitraum und den sie steuernden Geofaktoren (Relief, Landnutzung, etc.) läßt sich durch eine multiple Regression schätzen. Genügt die Regression bestimmten statistischen Parametern (Signifikanz, Bestimmtheitsmaß), lassen sich die Ergebnisse von den gemessenen Punkten in die Fläche übertragen und erlauben eine Karte für den entsprechenden Klimaparameter und den gewählten Zeitraum zu erstellen. Berechnungen dieser Art wurden am IPG zur Modellierung der Wärmebelastung und der Niederschlagsverteilung durchgeführt (BANZHAF ET AL. 1994).

Neben diesen allgemeineren Modellen mit einem sehr breiten Anwendungsspektrum wurden exemplarisch auch zwei fachspezifische Modelle in ATLAS2000 integriert.

4.4. Kaltluftproduktions-Modell

Als Beispiel eines komplexeren numerischen Modells wird eine Simulation des nächtlichen Kaltluftabfluß in reliefiertem Gelände herangezogen (SCHWAB 1994). Eingangsdaten für das Modell sind Informationen über die Topographie (digitales Geländemodell) und die Landnutzung. Den einzelnen Landnutzungsklassen können unterschiedliche Kaltluftproduktionsraten¹¹ zugewiesen werden. Als Ergebnis erhält man die Kaltluftmächtigkeiten am Ende einer Nacht (Figure 5). Das Modell ermöglicht eine Abschätzung der Veränderungen dieses Prozesses bei verschiedenen Eingriffen des Menschen.

4.5. Modell zur Berechnung der Oberflächentemperatur in windschwachen Strahlungs Nächten

Die nächtliche Oberflächentemperatur spielt eine wichtige Rolle bei der Abschätzung der Frostgefährdung bestimmter Areale in den Übergangsjahreszeiten. Die Oberflächentemperatur läßt sich mit Hilfe der multiplen Regression aus der Landnutzung und geeigneten Reliefparametern modellieren. Dabei wird das Gelände in sogenannte CoForm¹²-Klassen mit ähnlicher Landnutzung und ähnlichem Relief gegliedert. Diesen CoForm-Klassen werden mit Hilfe von Satelliten-Thermalaufnahmen typische Temperaturwerte zugewiesen. Durch Veränderung der Landnutzung im Modell können Anwender klimatologische Auswirkungen von

¹¹ Die nächtliche Kaltluft entsteht bei negativer Strahlungsbilanz durch Abkühlung der bodennahen Luft an der sich aufkühlenden Erdoberfläche.

¹² Cover + Form

landschaftsverändernden Maßnahmen (Bewaldung, Bebauung, etc.) abschätzen. Das Modell wird im folgenden Kapitel im Detail vorgestellt.

5. MODELL ZUR BERECHNUNG DER NÄCHTLICHEN OBERFLÄCHENTEMPERATUREN

Das Modell ermöglicht die Berechnung von Karten der nächtlichen Oberflächentemperatur zu einem bestimmten Zeitpunkt auf der Grundlage von Oberflächentemperatur-Messungen verschiedener Klima-Meßstationen zu einem ausgewählten Zeitpunkt. Im Rahmen von ATLAS2000 stellt dieses Modell eine Erweiterung zu dem einfachen Temperaturmodell dar. Die Temperatur wird hier nicht allein durch die Geländehöhe parametrisiert (lineare Regression) sondern in Abhängigkeit von der Geländehöhe, der Form des umliegenden Reliefs und der Landnutzung. Das Modell wurde im Rahmen des Regionalen Klimaforschungsprojektes REKLIP am Institut für Physische Geographie entwickelt (GOßMANN ET AL. 1998).

5.1. Das Regionalisierungskonzept

Eine Möglichkeit der flächenhaften Erfassung der Oberflächentemperatur (T_s) und damit der langwelligen Ausstrahlung (ET) bietet die Fernerkundung. In wolkenfreien Nächten können Strahlungstemperatur bzw. Ausstrahlung der Landoberflächen von Satelliten aus gemessen und in Form von Thermalbildern dargestellt werden. Dies liefert zum Aufnahmezeitpunkt für eine Vielzahl von Punkten einen Meßwert der nächtlichen langwelligen Ausstrahlung. Dieses Datenkollektiv kann einem Satz von Parametern der Geländeeigenschaften zugeordnet werden und gemeinsam mit diesen durch multivariate statistische Verfahren bearbeitet werden. Wenn auf diese Weise eine Schätzgleichung gewonnen werden kann, mit der die Werte der Thermalaufnahme aus den Geländeeigenschaften berechnet und die in der Thermalaufnahme erkennbaren räumlichen Muster der Oberflächentemperatur bzw. der langwelligen Ausstrahlung reproduziert werden können, so ist dies das entscheidende Werkzeug zur Erzeugung flächendeckender Datensätze für die an den Stationen punktuell gemessene Strahlungsbilanz.

Aus diesem Ansatz ergeben sich folgende Arbeitsschritte.

1. Erstellung eines Referenzdatensatzes der langwelligen Ausstrahlung, der die Grundstrukturen des räumlichen Musters der nächtlichen Strahlungstemperatur der Landoberflächen im gesamten Untersuchungsraum repräsentiert. Er wird aus einer Satelliten-Thermalaufnahme unter Verwendung eines digitalen Geländemodells und einer Landnutzungsklassifizierung abgeleitet.

2. Die Anpassung des Referenzdatensatzes an die Meßwerte der Klimameßstationen mit Hilfe einer affin-linearen Abbildung. Hierbei wird der Referenzdatensatz $T_s(\text{ref})$ durch Stauchung und Verschiebung so transformiert, daß er für den gewählten Zeitpunkt die an den Klima-Meßstationen gemessene Strahlungstemperatur T_s beziehungsweise die zugeordnete langwellige Ausstrahlung ET mit einem möglichst kleinen Restfehler reproduziert. Dabei werden in der Gleichung (Gleichung 1)

$$T_s = a * T_s(\text{ref}) + b$$

die Konstanten a und b mit einer linearen Regression bestimmt.

Insgesamt wurde für die Erzeugung des T_s -Referenzbildes des REKLIP-Gebietes folgende Datengrundlage eingesetzt:

- Landsat-TM-Thermalaufnahme vom 26.11.1986, 22.00 MEZ
- ein digitales Geländemodell des REKLIP-Gebietes
- eine Karte der Landnutzung, die aus einer Landsat-TM-Aufnahme abgeleitet wurde.

5.2. Festlegung der Reliefparameter

Bei genauer Betrachtung des Thermalbildes in Figure 3 erkennt man, daß es einen sehr engen Zusammenhang zwischen der Geländeform, der Landnutzung und den nächtlichen Oberflächentemperaturen gibt (GOBMANN 1984). So besteht die Möglichkeit, Oberflächentemperaturen und damit auch die langwellige Ausstrahlung an jedem Punkt mit Hilfe von Relief und Landnutzung zu parametrisieren. Die Parametrisierung des Reliefs beruhte auf der Überlegung, daß die Strahlungsbilanz und die Oberflächentemperatur in der Nacht durch die Produktion nächtlicher Kaltluft und deren Abflußmöglichkeit erheblich beeinflußt werden. Die Disposition des Geländes für nächtliche Kaltluftzu- und -abflüsse wurde durch Kenngrößen charakterisiert, die für jeden Punkt des Gebietes aus dem digitalen Geländemodell berechnet werden konnten. In einer statistischen Analyse ergab sich, daß die folgenden 5 Parameter die beste Erklärung für das Muster der im Thermalbild vorliegenden Oberflächentemperaturen erbringen:

1. **Reliefparameter R0:** Absolute Höhe des Geländepunktes.
2. **Reliefparameter R1 und R2:** In einer Kreisumgebung mit Radius 3 Pixel (= 360 m) werden alle Pixel betrachtet, deren absolute Höhe größer (kleiner) ist als die absolute Höhe des Pixels im Mittelpunkt. Die Summe der Höhendifferenzen dieser Pixel zum Mittelpunktspixel ergibt Reliefparameter R1 (Reliefparameter R2). R1 ist ein Maß dafür,

wieviel Luft aus der Umgebung zufließen, R2 dafür, wieviel Luft in die Umgebung abfließen könnte.

3. **Reliefparameter R3 und R4:** Wie R1 und R2 nur für eine Ringumgebung mit dem innerem Radius von 3 Pixel und dem äußerem Radius von 7 Pixel (= 840 m). Durch Kombination der Reliefparameter R1 und R2 mit R3 und R4 können auch komplexe Reliefformen beschrieben werden, wie etwa eine kleine Mulde, in der sich Kaltluft sammelt, innerhalb eines größeren Tales, in dem die Luft abfließen kann.
4. **Reliefparameter R5:** In einer Kreisumgebung mit Radius 25 Pixel (= 3 km) werden die Höhendifferenzen aller Pixel zum Mittelpunkt pixel berechnet und die Absolutbeträge aufsummiert. Durch R5 lassen sich großräumige Umgebung eines Punktes beschreiben (Gesamtreliefindex).

5.3. Das Modell zur Berechnung des Referenzmusters der Oberflächentemperatur

In einem nächsten Schritt, muß nun die in dem Satellitenthermalbild vorliegende Oberflächentemperatur T_s als Funktion der Reliefparametern R0, R1, ..., R5, und der Landnutzungsvariablen LNK dargestellt werden. Die Parameter erzeugen einen sechsdimensionalen Reliefmerkmalsraum (ohne Landnutzung). Mit Hilfe des ISODATA-Clusteralgorithmus (TOU ET AL. 1974) wird dieser in 250 Segmente zerlegt. Somit wird ein Datensatz mit 250 Reliefklassen erzeugt. Für jede Reliefklasse kann nun aus dem Thermalbild ein mittlerer Wert der nächtlichen Ausstrahlung ermittelt werden. Um die Landnutzung einbeziehen zu können, wird jede dieser 250 Reliefklassen entsprechend der Landnutzung in 6 Teilklassen untergliedert. Es ergeben sich also insgesamt $6 \times 250 = 1500$ sogenannte CoForm-Klassen, die sich jeweils durch das Relief (Form) und/oder die Landnutzung (Cover) unterscheiden. Für jede Klasse wird aus dem Thermalbild ein repräsentativer T_s -Wert berechnet. Die Funktion zur Approximation der Oberflächentemperatur ist somit durch die 1500 CoForm-Klassen mit den entsprechenden T_s -Werten ($T_s(1,1), \dots, T_s(6,250)$) abschnittsweise konstant definiert. Das hieraus entstehende Wertemuster zeigt zum Thermalbild eine Korrelation von $r = 0.69$ ($B = 0.48$).

Störend sind die an den Klassengrenzen auftretenden deutlich Unstetigkeiten. Eine wesentliche Verbesserung bringt der Einsatz des "Fuzzy-C-Mean"-Clusteralgorithmus (BEZDEK 1992) zur Clusterung der Reliefparameter. Der Algorithmus liefert nicht nur eine Segmentierung des Merkmalsraumes in verschiedene Klassen, sondern auch für jeden Punkt des Merkmalsraumes

Zugehörigkeitswahrscheinlichkeiten (r_1, \dots, r_{250}) zu den einzelnen Klassen. Jedem Punkt des digitalen Geländemodells werden somit über seine Reliefeigenschaften die Reliefklassenanteile zugeordnet, die als Gewichte in die Temperaturschätzung eingehen. Jedem Pixel des Untersuchungsraumes wird somit nicht der T_s -Wert einer CoForm-Klasse zugeordnet, sondern entsprechend seiner Reliefklassenanteile und Landnutzungsanteile eine gewichtete Mittelung aus allen CoForm-Klassen. Die Korrelation konnte mit diesem Ansatz auf $r = 0.74$ ($B = 0.54$) verbessert werden.

5.4. Verknüpfung des Referenzdatensatzes der nächtlichen Ausstrahlung mit den Meßwerten der REKLIP-Stationen

Mit dem oben beschriebenen Konzept läßt sich aus dem Referenzmuster der Oberflächentemperatur mit Hilfe der Meßdaten der Stationen für jeden beliebigen Zeitpunkt in einer Strahlungsnacht eine Karte der Oberflächentemperatur erstellen. An jeder Station wurde das Mittel der Meßwerte für die Zeitspanne 00:00 Uhr bis 04:30 Uhr gebildet und als Ankerwert herangezogen. Der Referenzdatensatz wird entsprechend der **Error! Reference source not found.** so transformiert, daß er an den Stationen diese Ankerwerte möglichst genau annimmt. Die Korrelationen zwischen den Werten des Referenzdatensatzes und den Meßwerten der Stationen lagen für ausgewählte Nächte zwischen 0.66 und 0.74.

Für die Zeitspanne von 00:00 MEZ bis 04:30 MEZ am 08.08.1992 ist die resultierende Karte der Oberflächentemperaturen in Figure 4 dargestellt. Die Karte zeigt alle Strukturen des Satellitenthalmbildes aus Figure 3, die durch die gewählte Relief- und Landnutzungsparametrisierung erfaßt werden. Sie zeigt nicht nur das unterschiedliche Temperaturniveau der großen Landschaftseinheiten wie der Oberrheinebene, der Vorbergzone, des Schwarzwaldes und der Gäulandschaften östlich davon, sondern auch vielfältige Detailstrukturen, die durch das Relief und die Landnutzung bestimmt sind.

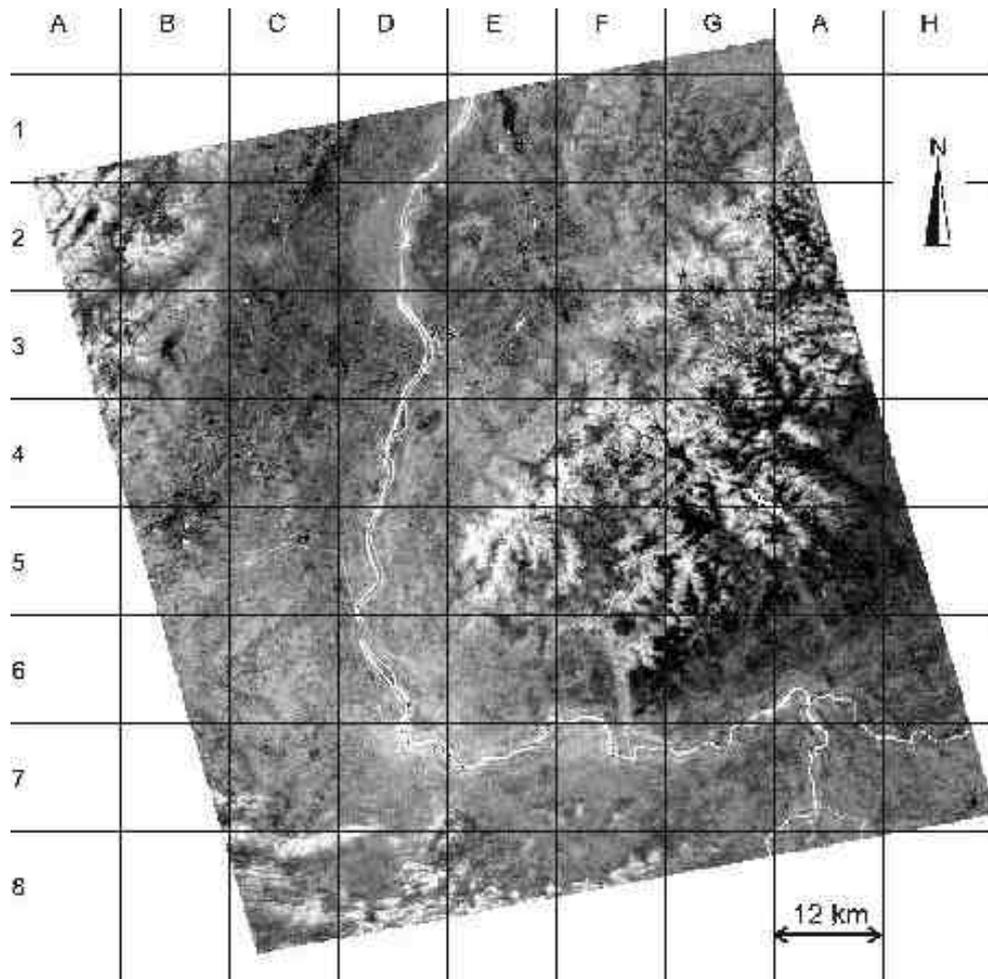


Figure 3 Landsat-TM-Nachtaufnahme des Südteils des REKLIP-Gebietes vom 26.11.1986 22:00 Uhr MEZ (dunkel = kalt, hell = warm). Das Infrarotthermalbild zeigt: Die Oberrheinebene zwischen Basel (D7) und Kaiserstuhl (D2/E2) mit dem Verlauf des Rheins, dem Rhein-Rhone-Kanal (C5/D5) und zahlreichen Baggerseen (z.B. E3) sowie den Flugplatz in Bremgarten (D4) und die Mittelgebirge Vogesen (NW), Schwarzwald (O) und Jura (SW) mit ihren kalten Talsystemen und den warmen bewaldeten Höhenzügen.

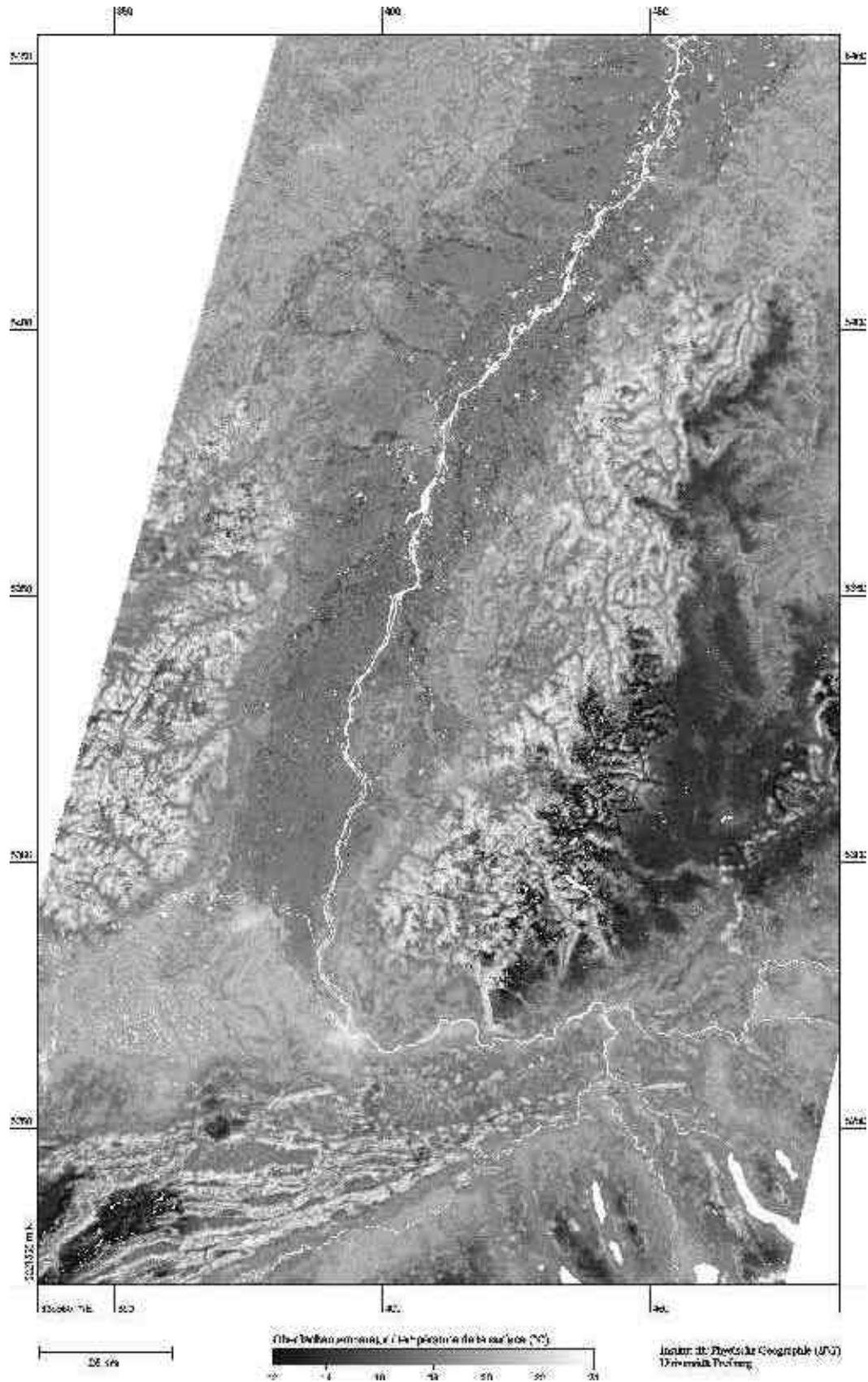


Figure 4 Karte der nächtlichen Strahlungsbilanz des REKLIP-Gebietes am 08.08.1992
00:00 MEZ bis 04:30 MEZ.

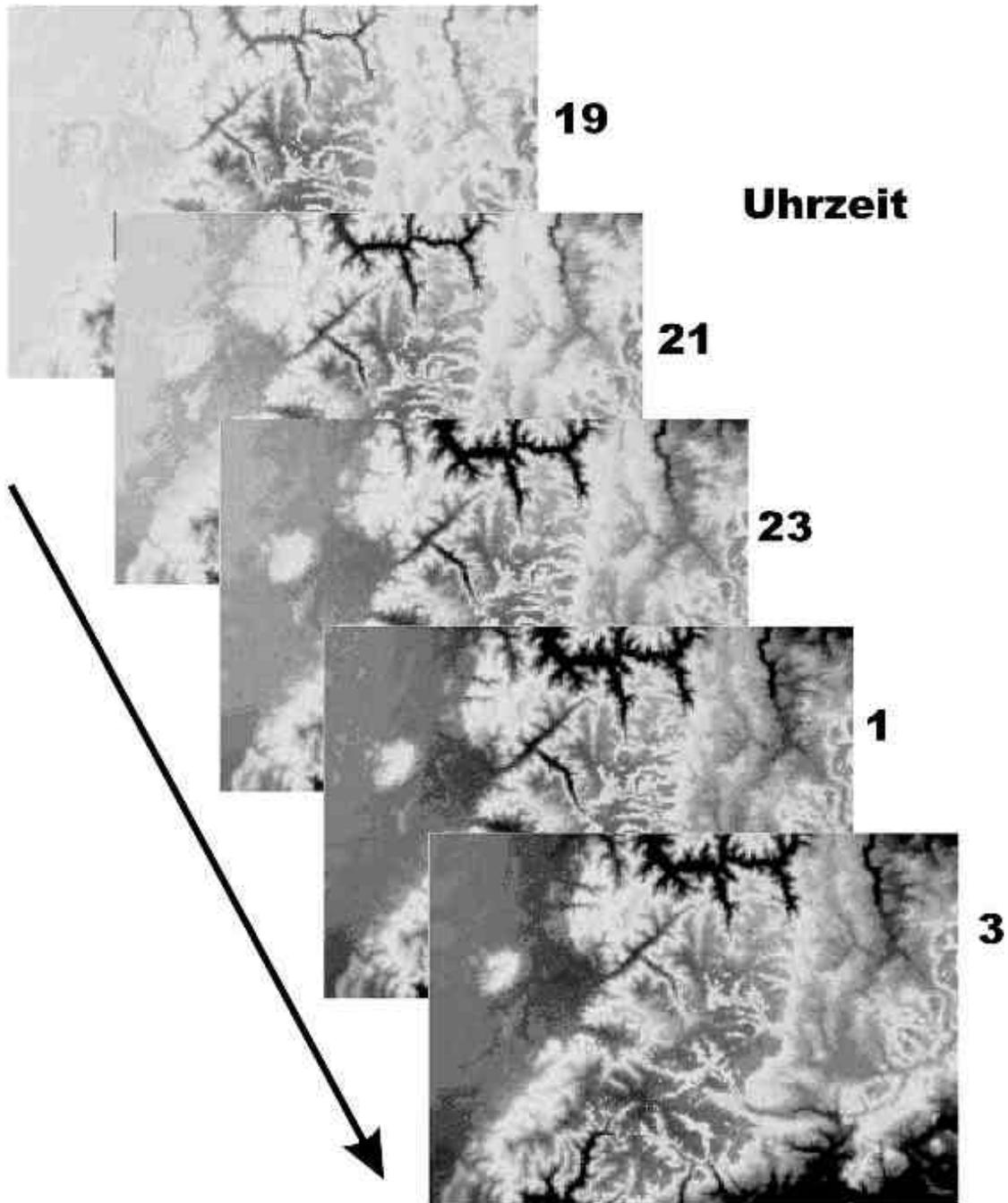


Figure 5 Oberrheinebene und Schwarzwald bei Freiburg. Ergebnisfelder des Kaltluftabflußmodells (Kaltluftmächtigkeiten) für eine wolkenfreie Sommernacht zwischen 19.00 Uhr und 3.00 Uhr.

6. LITERATUR

- BANZHAF ET AL. 1994: Die Modellierung der Wärmebelastung als Beitrag zur bioklimatischen Raumbewertung Mainfrankens, Würzburger Geographische Arbeiten Vol 89, S. 97-109, Geographisches Institut, Würzburg.
- BEZDEK 1992: Fuzzy Models for Pattern Recognition. IEEE Press, New York.
- GOBMAN ET AL. 1998: Zeitliche Dynamik und räumliche Differenzierung der nächtlichen Strahlungsbilanz. In: Fiedler, F., E. Parlow und F. Lichtner (Hrsg.) Regionale Variabilität der Energiebilanz und des Erdbodens, REKLIP-Bericht Nr. 1, Straßburg.
- GOBMAN 1984: Satelliten-Thermalbilder, Ein neues Hilfsmittel für die Umweltforschung? Hrsg: Bundesforschungsanstalt für Landeskunde und Raumordnung, Reihe Fernerkundung in Raumordnung und Städtebau, 16.
- GOBMAN ET AL. 1993: *Regionalisierung ökologischer Daten - alte Aufgaben, neue Lösungswege*, Das Freiburger Regionalisierungsmodell (FREIM), S. 399-418, Geographische Arbeiten Vol 87, Geographisches Institut, Würzburg.
- GOBMAN 1998: Einfluß historischer Landnutzungsänderungen auf die Temperaturen der Landoberflächen in wolkenfreien windschwachen Nächten. In Editions Coprur, Strasbourg, editor *Klima und Raumplanung (REKLIP-Bericht Nr. 4)*, Editions Coprur, 34rue du Wacken, F-67000, Strasbourg, 1998.
- SCHWAB 1994: Die Simulation nächtlicher Kaltluftabflüsse in reliefierten Gelände mit einem einfachen numerischen Modell, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Insitiut für Physische Geographie, Zulassungsarbeit zum Staatsexamen bei Prof. Dr. H. Goßmann.
- TOU ET AL. 1974: Pattern Recognition Principles Reading. Addison-Wesley Publishing Company, Massachusetts.