

DIETER FRITSCH

**Raumbezogene Informationssysteme
und digitale Geländemodelle**

München 1991

Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften
in Kommission bei der C.H.Beck'schen Verlagsbuchhandlung München

Adresse der Deutschen Geodätischen Kommission:

DEUTSCHE GEODÄTISCHE KOMMISSION

D-8000 MÜNCHEN 22 • Marstallplatz 8 • Postfach 220 002

Telefon (089) 23 031 113 • Telefax (089) 23 031 240

Telex 5 213 550 dgfl d

Prüfungskommission:

Hauptberichter Univ.Prof. Dr.-Ing. H. Ebner
Mitberichter: Univ.Prof. Dr.-Ing. K. Schnädelbach
Univ.Prof. Dr. Ir. M. Molenaar

Tag der Einreichung: 5.12.1989

Tag des Habilitationskolloquiums: 30.7.1990

©1991 Deutsche Geodätische Kommission, München

Alle Rechte vorbehalten. Ohne Genehmigung der Herausgeber ist es auch nicht gestattet, die Veröffentlichung oder Teile daraus auf photomechanischem Wege (Photokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
1.1	Historie	7
1.2	Raumbezogene Informationssysteme und digitale Geländemodelle	8
1.3	Zielsetzung, Inhalt und Dank	12
2	Theoretischer Teil	13
2.1	Mathematische Grundlagen	13
2.1.1	Approximationen	13
2.1.1.1	Lineare Modelle	13
2.1.1.2	Parameterschätzungen	13
2.1.1.3	Approximation vermittelt Spline-Funktionen	14
2.1.2	Kubische Splines	16
2.1.2.1	C_1 -Kontinuierliche kubische Splines	17
2.1.2.2	C_2 -Kontinuierliche kubische Splines	18
2.1.2.3	Kubischer Spline mit Nebenbedingung	19
2.2	Grundlagen der digitalen Signalverarbeitung	21
2.2.1	Signaldarstellung	21
2.2.2	Abtastintervall und Abtasttheorem	22
2.2.3	Selektive Systeme	23
2.3	Geometrische Betrachtungen	27
2.3.1	Darstellung räumlicher Objekte	27
2.3.2	Randdarstellung vermittelt Begrenzungsflächen	28
2.3.3	Dreiecksvermaschungen	30
2.3.3.1	Triangulation nach Delaunay	30
2.3.3.2	Triangulation mit minimalem Gewicht	31
2.3.4	Datenverwaltungsstrukturen für Begrenzungsflächen	33
2.3.4.1	Quadtree-Prinzip	33
2.3.4.2	Organisationsformen für Triangulationen	34
2.3.4.3	Datenorganisation für hybride Flächenmodelle	38
2.4	Grundlagen der Informatik	40
2.4.1	Listenstrukturen	40

2.4.2	Datenbankmodelle	41
2.4.2.1	Hierarchisches Modell	42
2.4.2.2	Netzwerkmodell	43
2.4.2.3	Relationales Modell	45
2.4.2.4	Objektorientierte Modelle	46
3	Praktischer Teil	47
3.1	Allgemeine Betrachtungen über raumbezogene Informationssysteme	47
3.1.1	Definitionen	47
3.1.2	Aufbau eines raumbezogenen Informationssystems	48
3.1.2.1	Datentypen und raumbezogene Informationssysteme	50
3.1.2.2	Datentypen und Datenbanken	51
3.1.2.3	Datentypen und Methodenbanken	52
3.1.3	Anforderungen an raumbezogene Informationssysteme	53
3.1.4	Schnittstellen für raumbezogene Informationssysteme	55
3.1.5	Ebenen- oder Folienprinzip	56
3.2	Erläuterungen zu digitalen Geländemodellen	57
3.2.1	Generierung von digitalen Geländemodellen	57
3.2.1.1	Datenerfassung	57
3.2.1.2	Datenaufbereitung	58
3.2.1.3	Approximation	58
3.2.2	Folgeprodukte von digitalen Geländemodellen	59
3.2.3	Vom digitalen Geländemodell zum Geländeinformationssystem	60
3.3	Untersuchungen zur Methodenbank eines Geländeinformationssystems	62
3.3.1	Glättung von Raumkurven mittels approximierender Splines	62
3.3.1.1	Profilglättung	62
3.3.1.2	Glättung von Isolinien	64
3.3.1.3	Glättung von Raumkurven	68
3.3.2	Ableitung von Neigungsmodellen	70
3.3.3	Einsatz von digitalen Filtern	75
3.4	Abfrageräume für Geländeinformationssysteme	78
3.4.1	Abfragen innerhalb großer Maßstäbe	79
3.4.2	Abfragen innerhalb mittlerer und kleinerer Maßstäbe	80

3.5	Integration von Geländemodellen in raumbezogene Informationssysteme	82
3.5.1	Sachdatenabsorption	82
3.5.2	Anbindung eines Geländeinformationssystems an ein raumbezogenes Informationssystem .	83
3.5.3	Totale Integration	85
3.5.3.1	Problemstellung	85
3.5.3.2	Vollständig dreidimensionale Datenhaltung	86
3.6	Bestandsaufnahme verfügbarer Systeme mit Höhenintegration	90
3.6.1	ALK-GIAP	90
3.6.2	ARC/INFO	91
3.6.3	INFOCAM	91
3.6.4	INTERGRAPII-RIS	92
3.6.5	PRIME-WILD S9	92
3.6.6	SICAD	93
4	Zusammenfassende Empfehlungen zur Integration von Geländedaten	94
4.1	Sachdatenabsorption	94
4.2	Geländeinformationssysteme	94
4.2.1	Datenverwaltung	94
4.2.2	Vektor- und Rasterprodukte	95
4.2.3	Konsistenzprüfungen	95
4.2.4	Abfrageraum eines GelIS	95
4.2.5	Schnittstellen eines GelIS	95
4.3	Vollständige 3D – Beschreibungen	96
5	Schluß und Ausblick	97
6	Literatur	99
7	Anhang	107
7.1	Tschebyscheff-Approximation	107
7.2	Parametrisierung von Spline-Funktionen	109
7.2.1	Parametrisierung mit C_0 - und C_1 -Kontinuität	109
7.2.2	Erweiterung der Parametrisierung um C_2 -Kontinuität	111
8	Verzeichnis der Abkürzungen	112

1 Einleitung

1.1 Historie

Die zunehmende Erfassung und Anwendung von raumbezogenen Daten in vielen Bereichen der Geo-Wissenschaften führen zum vermehrten Einsatz von elektronischen Hilfsmitteln und zur Weiterentwicklung der Methodik.

Bedingt durch die schnelle Entwicklung der Computertechnologie (Hardware) sind die Methoden und die Produkte (Software) der graphischen und geometrischen Datenverarbeitung wesentlich ausgebaut worden. Dies hat im Vermessungswesen zu den "Raumbezogenen Informationssystemen" oder auch "Geo-Informationssystemen" geführt, die in der Lage sind, geometrische Informationen (Vektor- und Rasterdaten) sowie Sachinformationen (Attribute) simultan vorzuhalten und zur Problemlösung einzusetzen.

Ein Blick auf die Tabelle 1.1 soll in Anlehnung an A. Meier (1986) die Implikation von Graphik und Geometrie mit dem Vermessungswesen verdeutlichen.

Tabelle 1.1: Implikation von Graphik und Geometrie mit dem Vermessungswesen

	Entwicklung		Anwendung
Zeit	Graphik	Geometrie	Vermessungswesen
1950 – 1960	Vektor- oder Liniengraphik	Einfache geometrische Algorithmen, Drahtmodelle	
1960 – 1970	Interaktive Computergraphik	Approximationsmethoden für Kurven und Flächen, Entwicklung geometrischer Programmiersprachen	Digitale Kartierung, Simulation, digitale Bildverarbeitung, digi- tale Geländemodelle
1970 – 1980	Rastergraphik, Standards, Animation, Computerspiele	Eindeutige Darstellung räumlicher Objekte, Komplexitätsbetrachtungen von geometrischen Algo- rithmen (Hidden lines etc.)	Landinformationssysteme, CAD-Kartographie, automatisierte Liegen- schaftskarte (ALK), digitale Photogrammetrie
1980 – 1990	Kognitive Compu- tergraphik, Bewegung, Compu- tervision	Geometrische Daten- und Methodenbanken, logistische Systeme, Standardi- sierung	Geo-Informationssy- steme, hybride Datenhaltung, ALK-GIAP, ATKIS, GEOGIS, digitale Stereoauswerte- station

Während mit der erstmaligen Bereitstellung der Vektorgraphik zu Beginn der fünfziger Jahre das Vermessungswesen die Entwicklung abwartete, ist heutzutage eine Absorption der Entwicklungen und Produkte von Graphik und Geometrie im Vermessungswesen zu beobachten. Ein Rückblick beginnend mit dem Jahr 1960 zeigt, daß das Vermessungswesen nur zögernd die Mittel der graphischen und geometrischen Datenverarbeitung akzeptierte. Da zu diesem Zeitpunkt digitale Rechenanlagen mit Graphikunterstützung wenig leistungsfähig und zudem teuer waren, war diese Verhaltensweise angemessen. Außerdem mußten eigene methodische und konzeptionelle Entwicklungen in die Wege geleitet werden, um die neuen elektronischen und methodischen Hilfsmittel adaptieren zu können. Das digitale Geländemodell – gerade vorgestellt durch C.L. Miller/ R.A. Laflamme (1958) – fand erste Anwendungen im Planungsbereich. Ebenso wurde die digitale Bildverarbeitung bereits zu diesem Zeitpunkt in Pilotprojekten eingesetzt. Die Verknüpfung von digitaler Kartierung, Simulation, Bildverarbeitung und digitalem Geländemodell wird heutzutage als Geländesyntese bezeichnet.

Mit Beginn der siebziger Jahre wurden die Informationssysteme in das Vermessungswesen eingeführt. Durch das Pilotprojekt "Automatisierte Liegenschaftskarte (ALK)" (AdV, 1970) ist eine Entwicklung eingeleitet worden, die das amtliche Vermessungswesen in der Bundesrepublik Deutschland nachhaltig beeinflußt hat. Der Begriff des Landinformationssystems – näher erläutert in Kapitel 3 – wurde international abgesichert und war als zweidimensionales vektororientiertes Informationssystem vielerorts Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen (G. Eichhorn, 1978, 1980, R. Conzett, 1980, A. Frank, 1983). Die Anbieter von kommerziellen Informationssy-

stemen prägten zu diesem Zeitpunkt die CAD-Kartographie (M. Schilcher, 1985), und die digitale Photogrammetrie zeichnete sich durch Verfahren der Bildkorrelation sowie der digitalen Orthophotoherstellung (W. Kreiling, 1976, W. Göpfert, 1978) langsam ab.

In diesem Jahrzehnt ist ein rasanter Fortschritt der Informationsverarbeitung im Vermessungswesen zu beobachten: an die Stelle der Landinformationssysteme treten die Geo-Informationssysteme, in die ebenfalls Bilddaten miteinbezogen werden, was zu hybriden graphischen Systemen führt (D. Fritsch, 1988b). Im amtlichen Vermessungswesen findet der graphische interaktive Arbeitsplatz (GIAP) der automatisierten Liegenschaftskarte erste Anwendungen (G. Mittelstraß, 1988), das "Amtliche Topographisch-Kartographische Informationssystem (ATKIS)" ist gerade eingeleitet worden (AdV, 1988) – sein Adäquat in Bayern wird als "Geographisches Grundinformationssystem (GEOGIS)" bezeichnet (B. Roder, 1988) – und die Bundeswehr führt das "Topographische Informationssystem (TOPIS)" ein. Ebenso befinden sich digitale photogrammetrische Auswertestationen in der Entwicklung, die Monoauswertungen wie die digitale Orthophotoprojektion (DOP) und auch digitale Stereoauswertungen erlauben. Erste Prototypen hierzu werden bereits seitens der Industrie angeboten – als Beispiele seien das DOP-System EUDICORT von Eurosense und der erste digitale Stereoplotter (DSP1) von Kern genannt (L. Cogan et al., 1988).

Diese kurze Zusammenfassung zeigt den Fluß innerhalb der Informationsverarbeitung auf, deren Konzepte bisher überwiegend flächenhaft (im \mathbb{R}^2) aufgebaut waren. Die Höhe – bisher eher "stiefmütterlich" behandelt – wird erst durch die neueren Entwicklungen in diesem Jahrzehnt in die Informationssysteme integriert, so daß nun erst von "raumbezogenen Informationssystemen" (im Sinne des \mathbb{R}^3) gesprochen werden kann. Einer Bestandsaufnahme sowie konzeptionellen Betrachtungen zur Lösung dieses ist bisher wenig Beachtung zugekommen.

1.2 Raumbezogene Informationssysteme und digitale Geländemodelle

Das digitale Geländemodell, dem bisher eine eher eigenständige Rolle innerhalb einzelner Fachdisziplinen zukam, bringt durch seine umfassende Beschreibung des Geländereiefs weitere Informationen in den Datenbestand eines raumbezogenen Informationssystems mit ein, auf die im Bereich des amtlichen Vermessungswesens, vielen Ingenieur Anwendungen, der Raumordnung, der Ökologie und des Umweltschutzes nicht verzichtet werden kann.

Unter Zuhilfenahme von Abb. 1.1 repräsentiert das digitale Geländemodell neben dem digitalen Grundriß eine weitere zentrale Komponente eines raumbezogenen Informationssystems. Während für eine Datenerfassung im wesentlichen drei verschiedene Modi dienen: nämlich die örtliche Geländeaufnahme, die photogrammetrische Bildauswertung und die Digitalisierung von Höheninformationen aus topographischen Karten, kann erst durch Auswertung und Nachbearbeitung eine strukturierte Geländedarstellung zur Verfügung gestellt werden. Diese ist u. a. wichtiges Hilfsmittel zur Entzerrung von digitalen (gescannten) Luft- und Satellitenbildern.

Die Thematik des digitalen Geländemodells (DGM) kann mittlerweile auf umfangreiche Literatur und vielfältige Anwendungen zurückblicken. Seit seiner Einführung durch das photogrammetrische Labor des Massachusetts Institute of Technology (M.I.T), Cambridge, USA wurden die Methoden und Folgeprodukte des DGM immer weiter entwickelt, so daß heutzutage hochqualitative digitale Geländemodelle schon zur Verfügung stehen bzw. weiterhin Gegenstand von Forschung und Entwicklung sind (H. Ebner/D. Fritsch, 1986). In einem Regelkreis (siehe Abb. 1.2) können unter Verwendung von modernen Anzeigegeräten zum einen Geländedaten fortgeführt werden, und zum anderen abgeleitete Produkte wie Isolinien bis hin zur geschummerten Geländedarstellung visualisiert werden (G. Düsedau et al., 1987, H. Ebner et al., 1988).

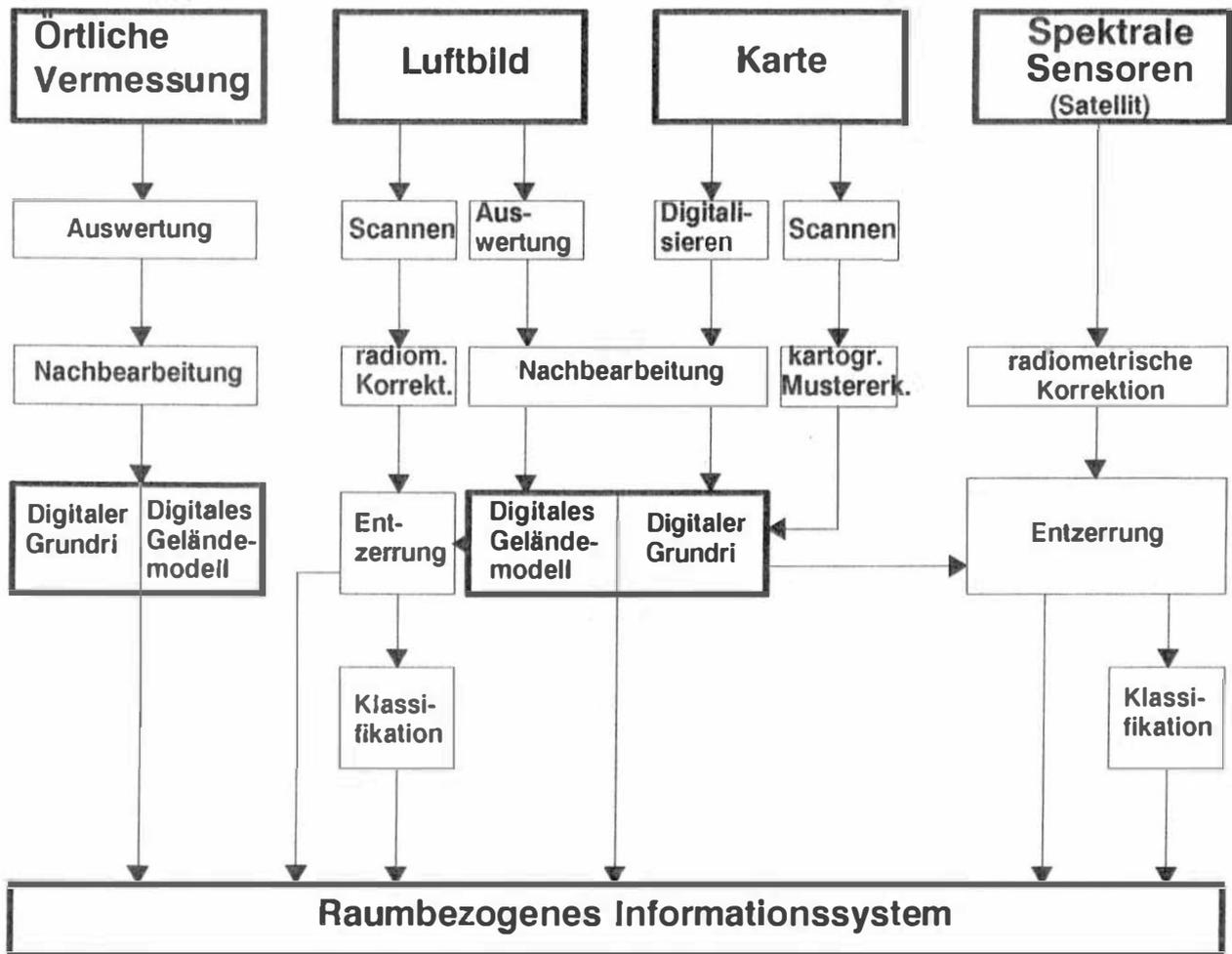


Abb. 1.1: Von der Datenerfassung über das digitale Geländemodell in das raumbezogene Informationssystem

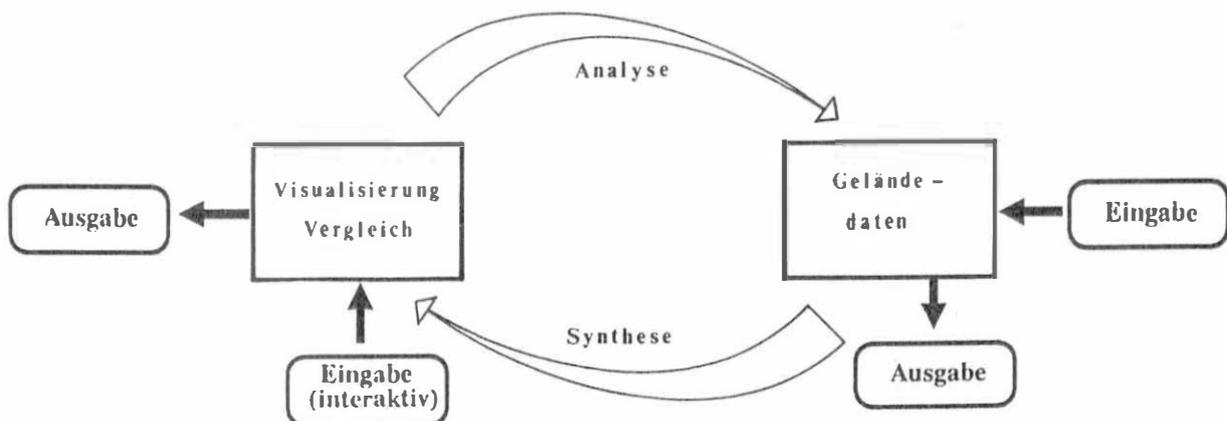


Abb. 1.2: Regelkreis in der Geländedatenverarbeitung

Die Verknüpfung von digitalen Geländemodellen mit Geo-Informationssystemen wurde bereits 1977 von B. Makarovic vorgeschlagen und von R. Adler (1978) detaillierter ausgearbeitet. Zu diesem Zeitpunkt konnte man auf Arbeiten von A.A. Noma (1974), J.R. Jancaitis (1976), A.A. Elassal (1978), D.M. Mark (1978) und A.A. Noma/N.S. Spencer (1978) zurückgreifen, die sich schon mit Datenbasen für digitale Geländemodelle auseinandersetzten. Doch fehlte es zu diesem Zeitpunkt noch an allgemeinen Grundlagen zu Geo-Informationssystemen.

Hier konzentrierte man sich erst einmal auf die digitale Vorhaltung von Karteninformationen – verwiesen sei dabei auf das Projekt der “Automatisierten Liegenschaftskarte” (AdV, 1970, H.W. Stöppler, 1987) im Vermessungswesen, das bereits 1970 in die Wege geleitet wurde und seit 1987 in Nordrhein-Westfalen, Niedersachsen und Hessen erste Anwendungen findet. Schon bald stellte sich heraus, daß Geo-Informationssysteme interdisziplinär gesehen werden müssen.

Zur Begriffsvereinheitlichung soll diese Interdisziplinarität mit der Abb. 1.3 hervorgehoben werden. Gleichzeitig wird ebenso die Bedeutung des digitalen Geländemodells erweitert, das heutzutage in Umweltverträglichkeitsprüfungen, Erosionsstudien, Klimastudien, statistischen Korrelationsrechnungen u.v.a.m. Verwendung findet (H. Kepp, 1988, W. Gillesen et al., 1988).

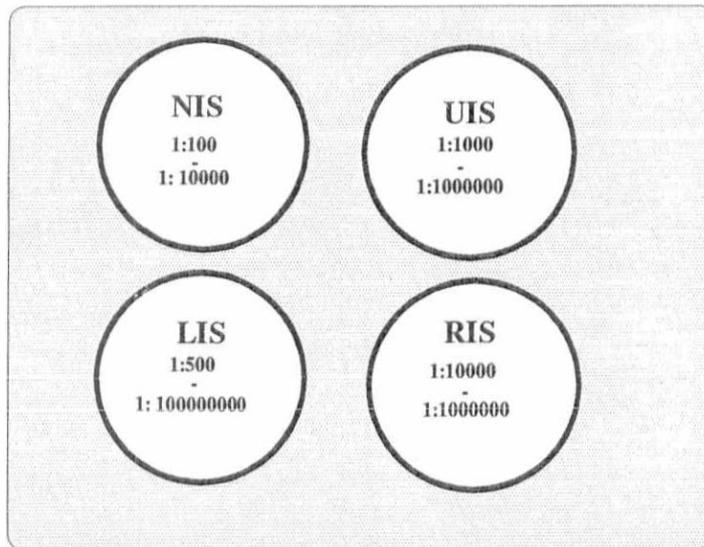


Abb.1.3: Verschiedene Ausprägungen von raumbezogenen Informationssystemen

Neben den bereits angesprochenen *Landinformationssystemen (LIS)* seitens des Vermessungswesens, welche den großen Maßstabsbereich 1:500 – 1:10 000 (Kataster, Ingenieurvermessung, Flurbereinigung), den mittleren Maßstab 1:10 000 – 1:100 000 (Topographie, Kartographie) und auch kleinere Maßstäbe 1:100 000 – 1:100 000 000 (Kartographie, Thematische Kartographie) abdecken, sind im Bereich der Energieversorgung die *Netzinformationssysteme (NIS)* entstanden. Diese beziehen sich überwiegend auf Darstellungen innerhalb großer Maßstäbe (Ver-, Entsorgung, Wasserwirtschaft, Anschlüsse).

Aus der Notwendigkeit der Raubeobachtung haben sich die *Rauminformationssysteme (RIS)* entwickelt, denen auch die Informationssysteme der Statistik (R. Stadler, 1988) zuzuordnen sind. Die Aufgaben reichen hier von der Erfassung der Bevölkerungsentwicklung, Wirtschaft, Siedlungen bis hin zur Aufstellung von Entwicklungsprogrammen, so daß diesen Systemen eine Maßstabsskala von 1:10 000 – 1:1 000 000 gemeinsam ist.

Ebenso sind im Umweltbereich die *Umweltinformationssysteme (UIS)* als umfassende Kontrollsysteme im Entstehen (J. Braedt, 1988). Als Aufgaben seien hier genannt: Erfassung und Kontrolle von Luft, Wasser und Boden, das Aufdecken von Gesundheitsrisiken bis hin zur Erhaltung der Artenvielfalt. Die zugehörige Maßstabsskala umfaßt große, mittlere und kleine Maßstäbe bis ca. 1:1 000 000.

Die Aufzählung der im wesentlichen vier verschiedenen Ausprägungen, die sich in erster Linie durch ihre Anwendungen unterscheiden, läßt eine Klassifikation der heutzutage vorhandenen und geplanten Informationssysteme zu. Dennoch haben diese vier Ausrichtungen viele Gemeinsamkeiten (Datenmanagement, Berücksichtigung und Visualisierung von Höheninformation), auf die später eingegangen wird.

Die Vereinigungsmenge

$$LIS \cup UIS \cup RIS = GIS \quad (1.1)$$

führt zum *Geo-Informationssystem (GIS)*, für das in der jüngsten Vergangenheit gerade im Vermessungswesen

sen *Raumbezogenes Informationssystem (RIS)*¹ substituiert wurde (M. Baumann, 1985, W. Göpfert, 1987, D. Fritsch, 1988b). Im folgenden wird ebenso stets die letztere Bezeichnung verwendet. Vielfach findet man auch jede Untermenge in (1.1) als GIS oder RIS bezeichnet, da zum einen die Übergänge von Rauminformationssystemen nach Umweltinformationssystemen und umgekehrt fließend sind und sich in beiden Elemente von Landinformationssystemen wiederfinden. Zum anderen kann auch ein LIS in verschiedene Richtungen ausgebaut werden.

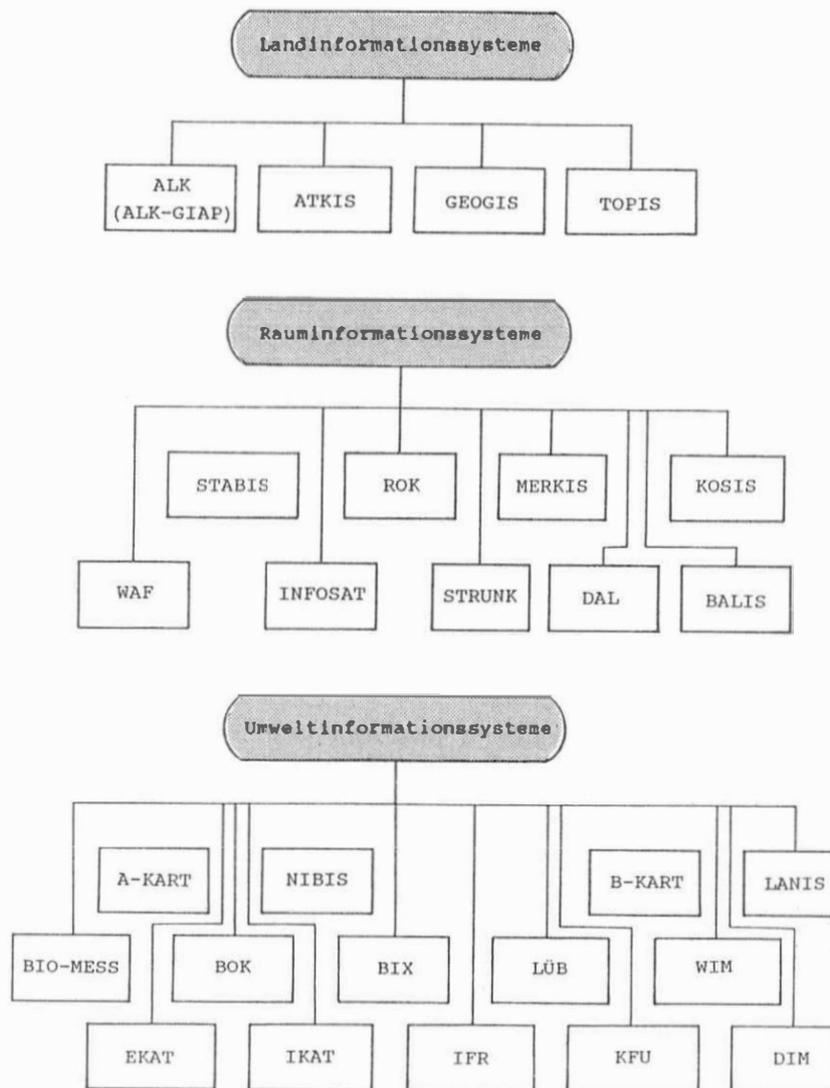


Abb. 1.4: Amtliche (realisierte und tlw. realisierte) Informationssysteme in der BRD (Die Abkürzungen sind im Abkürzungsverzeichnis näher erläutert).

Diese Vielfalt der Informationssysteme ist in der Abb. 1.4 aufgezeigt, wobei diese Abbildung keineswegs den Anspruch auf Vollständigkeit erhebt. Damit soll nur angedeutet werden, wie "bunt" sich die Landschaft der amtlichen Informationssysteme präsentiert. Ebenso gibt sie einen kleinen Überblick, in welchem Bereich und zu welchem Zweck Informationssysteme realisiert bzw. im Aufbau sind, wobei auf das Abkürzungsverzeichnis (siehe 8. Kapitel) verwiesen wird.

Das digitale Geländemodell bildet eine weitere Datengrundlage der *Elemente* wie z. B. ATKIS, GEOGIS, TOPIS, MERKIS, INFOSAT, DAL, ROK, BOK, KFU, LANIS, LÜB, WIM, um nur einige aufzuzählen. Damit wird die Bedeutung von digitalen Geländemodellen in raumbezogenen Informationssystemen einmal mehr herausgestellt.

¹Obgleich die Abkürzung "RIS" für Rauminformationssysteme verwendet worden ist, soll dieses Kürzel in dieser Arbeit stets ein raumbezogenes Informationssystem bezeichnen.

1.3 Zielsetzung, Inhalt und Dank

Während innerhalb einer raumbezogenen Datenhaltung grundsätzlich zwischen Datenerfassung, -speicherung, -analyse und -visualisierung zu unterscheiden ist, sollen mit der vorliegenden Arbeit im wesentlichen Konzepte zur Datenhaltung und Visualisierung, die Darstellung von Abfrageräumen sowie strukturelle Überlegungen über Software-Schnittstellen zur Anbindung vorhandener Höheninformationen sowie zur Höhenintegration aufgezeigt werden. Zum besseren Verständnis der Materie sind dabei ebenso generelle Betrachtungen über digitale Geländemodelle und raumbezogene Informationssysteme anzustellen. Dementsprechend wird die Arbeit neben der Einleitung in zwei Hauptabschnitte – einen theoretischen Teil und einen praktischen Teil – gegliedert. Der theoretische Teil beginnt mit der bisher in der numerischen Mathematik teilweise abstrakt behandelten Ausrichtung der Splineapproximationen. Splines sind ein hervorragendes Hilfsmittel zur kontinuierlichen Darstellung von Raumkurven, welche innerhalb der Computergraphik eine wesentliche Rolle spielen. Insbesondere eignen sich Splines zur Darstellung von Isolinien. Diese Arbeit will ebenso beispielhafte Untersuchungen zu dieser Thematik durchführen. Die mathematische Herleitung erfolgt aus der Sicht eines Numerikers, wobei absichtlich auf theoretische Einordnungen verzichtet wird.

Nach signaltheoretischen Überlegungen, in denen der Frage nach dem optimalen Diskretisierungsintervall und dem Einsatz von selektiven Systemen Rechnung zu tragen ist, werden topologische Betrachtungen angestellt. Dabei ist insbesondere zu klären, ob eine \mathbb{R}^2 -Topologie oder eine \mathbb{R}^3 -Topologie in einer raumbezogenen Datenhaltung eingesetzt werden muß. Den theoretischen Teil schließen einige Grundlagen aus der Informatik ab, um zum besseren Verständnis des Aufbaus von raumbezogenen Informationssystemen beizutragen.

Der praktische Teil beginnt mit generellen Betrachtungen zu raumbezogenen Informationssystemen. Neben dem Aufbau wird dabei auf Daten- und Methodenbanken eingegangen. Diese Unterteilung trägt auch wesentlich zur Einordnung der Grundlagen des theoretischen Teils bei.

Nach den Erläuterungen zum digitalen Geländemodell folgt ein Abriß von der Generierung bis hin zur Ableitung von Folgeprodukten. Die Erweiterung um eine effiziente Datenhaltung kann dann zu einem *Geländeinformationssystem (GELIS)* führen, welches ebenso vorgestellt wird.

Im Abschnitt Untersuchungen zur Methodenbank eines Geländeinformationssystems finden sich graphische Darstellungen zur Glättung von Isolinien, zur Ableitung von Neigungsmodellen und zur DGM-Generalisierung mittels digitaler Filter.

Um typische Fragestellungen in Verbindung mit Höheninformationen aufzuzeigen, werden Abfrageräume nach Maßstäben getrennt aufgebaut. Dabei sind die Abfrageräume weniger hinsichtlich des zugrundeliegenden Datenmodells spezifiziert, sondern ergeben sich durch die Anwendungen. Innerhalb der Integration von Geländedaten in RIS werden die drei möglichen Modelle – die Sachdatenabsorption, die Anbindung von GELIS an RIS und die totale Integration – behandelt. Danach folgt eine Bestandsaufnahme über bisherige Lösungen.

Den Abschluß des praktischen Teils bilden zusammenfassende Betrachtungen zur Integration von Geländedaten. Es folgt dann der Schluß und Ausblick.

An dieser Stelle sei Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Ebner, der auch die erste Berichterstattung für diese Arbeit übernommen hat, recht herzlich für seinen Einsatz zur Thematik der raumbezogenen Informationssysteme sowie für die Diskussionen und Anregungen zu den in dieser Arbeit vorgestellten methodischen Entwicklungen gedankt. Dank gilt auch den Herren Prof. Dr.-Ing. K. Schnädelbach und Prof. Dr. Ir. M. Molenaar für die Übernahme der weiteren Berichterstattung.

Ferner bedankt sich der Autor bei seinen Diplomanden, namentlich Ch. Heipke, G. Düsedau, O. Reschberger, H. Güntsch, M. Anzenhofer und R. Würländer, die mit ihren Untersuchungen wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Abschließend gebührt der Dank all den im praktischen Teil aufgeführten Anbietern von raumbezogenen Informationssystemen, die mit ihrer Offenheit auch diese Arbeit gefördert haben.

2 Theoretischer Teil

2.1 Mathematische Grundlagen

2.1.1 Approximationen

2.1.1.1 Lineare Modelle Zur Behandlung von Problemen der Kurven- bzw. Flächenapproximation müssen lineare Modelle eingeführt werden. Diese bilden die Voraussetzung für das Schätzen von unbekanntem Parametern, da in ihnen der funktionale Zusammenhang, Aussagen über die Gewichtung der diskreten Werte ("Beobachtungen"), Dimensionen und Rangbetrachtungen enthalten sind.

Es sei

$$y + v = Ax, \quad P \text{ pos. definit} \quad (2.1)$$

$$\{y, v\} \in \mathbb{R}^n, \quad x \in \mathbb{R}^m, \quad \text{rg } A = m, \quad n \geq m$$

ein lineares Modell, in dem y ein Vektor von diskreten Werten und v sein zugehöriger Residuum- oder Inkonsistenzvektor ist. Die rechte Seite des Gleichungssystems ist darzustellen durch die Linearkombination einer Matrix A gegebener Koeffizienten mit dem Vektor x der unbekanntem Parameter. Als Gewichtsmatrix wird eine positiv definite Matrix P zugelassen, die in Sonderfällen zu $P = I$ entartet (I Einheitsmatrix).

Eine Erweiterung von (2.1) ist durch die Einführung von g linearen Restriktionen (Bedingungen) $Hx = c$ gegeben, H stellt dabei eine Matrix von gegebenen Koeffizienten dar und c ist der Absolutgliedvektor. Das lineare Modell lautet

$$y + v = Ax, \quad P \text{ pos. definit}, \quad \{y, v\} \in \mathbb{R}^n, \quad x \in \mathbb{R}^m, \quad \text{rg } A = m$$

(2.2)

$$\text{unter}$$

$$Hx = c, \quad c \in \mathbb{R}^g, \quad \text{rg } H = g, \quad n \geq m \geq g$$

In einigen Anwendungen von Kurven- und Flächenapproximationen ist eine Einschränkung des Lösungsraumes durch Ungleichungen als Nebenbedingungen sinnvoll; ferner kann mit diesen Restriktionen eine Minimierung des maximalen Approximationsfehlers herbeigeführt werden (D. Fritsch, 1987). Hierzu dient das folgende Modell, welches als verallgemeinertes lineares Modell bezeichnet wird

$$y + v = Ax, \quad P \text{ pos. definit}, \quad \{y, v\} \in \mathbb{R}^n, \quad x \in \mathbb{R}^m, \quad \text{rg } A = m$$

(2.3)

$$\text{unter}$$

$$Hx \geq c, \quad c \in \mathbb{R}^g, \quad \text{rg } H = g, \quad n \geq m \geq g$$

in dem die Matrix H bekannte Koeffizienten enthält und c den gegebenen Absolutgliedvektor darstellt.

2.1.1.2 Parameterschätzungen Zur Schätzung des unbekanntem Parametervektors x in (2.1) – (2.3) können verschiedene Zielfunktionen herangezogen werden. Innerhalb der Approximation von Kurven und Flächen sind zweckmäßigerweise zwei Zielfunktionen einzusetzen: die Methode der kleinsten Quadrate (L_2 -Approximation) und die Tschebyscheff-Approximation (L_∞ -Approximation). Während die erste Forderung zu linearen Gleichungssystemen führt, die relativ einfach aufzulösen sind, ist für den letzten Fall die Lösung durch lineare bzw. quadratische Programmierung herbeizuführen (W. Krabs, 1983).

Die Zielfunktionen lauten ohne Einschränkung des Lösungsraumes ¹

$$\min_{\mathbf{x}} \|A\mathbf{x} - \mathbf{y}\|_{\mathcal{P}}^2 := \min_{\mathbf{x}} \sum_{i=1}^n p_i v_i^2 \quad (2.4)$$

und

$$\min_{\mathbf{x}} \|A\mathbf{x} - \mathbf{y}\|_{\mathcal{P}}^{\infty} := \min_{\mathbf{x}} \max_{1 \leq i \leq n} |p_i v_i| \quad (2.5)$$

Wird die Methode der kleinsten Quadrate zur Parameterschätzung herangezogen, lassen sich die Schätzformeln für die Modelle (2.1) und (2.2) aus der folgenden Lagrange'schen Funktion $L(\mathbf{x}, \lambda)$ ableiten (Substitutionen: $Q := A^T P A$, $b = A^T P y$ und $\gamma = y^T P y$)

$$\min_{\mathbf{x}} L(\mathbf{x}, \lambda) = \frac{1}{2} \mathbf{x}^T Q \mathbf{x} - b^T \mathbf{x} + \gamma + \lambda^T (H \mathbf{x} - c) \quad (2.6)$$

Die gesuchten linearen Gleichungen ergeben sich aus den partiellen Ableitungen

$$\frac{\partial L}{\partial \mathbf{x}} = Q \tilde{\mathbf{x}} - b - H^T \tilde{\lambda} = 0 \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = -H \tilde{\mathbf{x}} - c = 0$$

Modell (2.1) $\lambda \equiv 0$

$$Q \hat{\mathbf{x}} = b \Rightarrow A^T P A \hat{\mathbf{x}} = A^T P y \quad (2.8)$$

Modell (2.2) $\lambda \neq 0$

$$\begin{bmatrix} Q & H^T \\ H & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{x}} \\ \tilde{\lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b \\ c \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} A^T P A & H^T \\ H & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{x}} \\ \tilde{\lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^T P y \\ c \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Im Anhang 7.1 ist die Parameterschätzung für das Modell (2.3) wiedergegeben, in der ebenso die Zielfunktion (2.5) Berücksichtigung findet.

2.1.1.3 Approximation vermittelt Spline-Funktionen Innerhalb graphischer Anwendungen kommt einer kontinuierlichen Beschreibung von Raumkurven eine besondere Bedeutung zu. Dabei wird häufig die Parameterdarstellung einer impliziten Darstellung vorgezogen. Dies hat den Vorteil, daß weniger komplizierte Gleichungssysteme aufzulösen sind, und einzelne Kurven beim rechnergestützten Entwurf stückweise beschrieben und aneinandergesetzt werden können. Die Übergänge an solchen Nahtstellen lassen sich durch mathematische Bedingungen ausgleichen. Dabei können je nach Anwendung folgende Forderungen gestellt werden

a) C_0 -Kontinuität, d. h. Übereinstimmung (Koinzidenz) der Stützpunkte (2.10)

b) C_1 -Kontinuität, d. h. Koinzidenz der Stützpunkte und der ersten Ableitungen (2.11)

c) C_2 -Kontinuität, d. h. Koinzidenz der Stützpunkte sowie der ersten und zweiten Ableitungen. (2.12)

In der Abb. 2.1 sind die Stetigkeitsforderungen a) - c) dargestellt.

¹Hier wird für $P = \text{diag}(p_{11}, \dots, p_{nn})$ angenommen. Jedoch gelten die Betrachtungen auch für vollbesetzte positiv definite Matrizen, da mit der Cholesky-Faktorisierung $P = RR'$ der Beobachtungsvektor \mathbf{y} in $\tilde{\mathbf{y}} = R'\mathbf{y}$ mit $\tilde{P} = I$ transformiert werden kann.

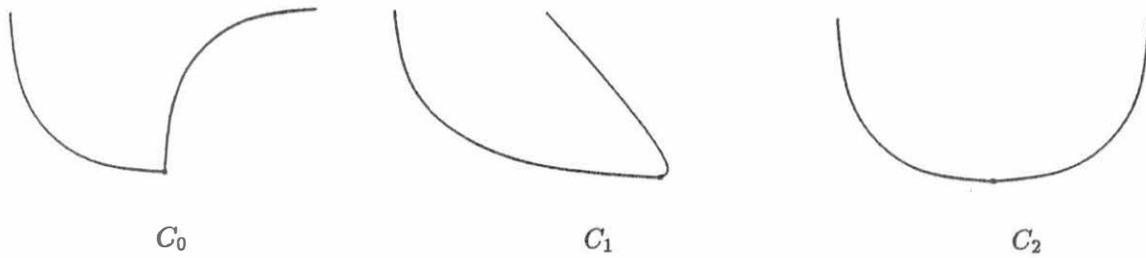


Abb. 2.1: Stetige und stetig differenzierbare Übergänge beim Zusammensetzen von Spline-Funktionen (entn. aus: W.M. Newman / R.F. Sproull, 1986)

Um eine adequate Parametrisierung der Raumkurve durchzuführen, ist zunächst zu ermitteln, ob sie in Abhängigkeit von einem, zwei oder drei Parametern dargestellt ist.

Im eindimensionalen Fall ist eine Funktion

$$x = x(t) \quad (2.13)$$

mit dem unabhängigen Parameter t und den Funktionswerten $x(t)$ zu beschreiben. Bei Vorliegen von Wertepaaren $\{t_i, x_i\} \forall i = 0, 1, 2, \dots, n-1$ lautet das Approximationsproblem

$$\text{Finde } x = x(t) \text{ vermittels } x(t_0), x(t_1), \dots, x(t_{n-1}) \text{ und } t_0 < t_1 < \dots < t_{n-1} \quad (2.14)$$

welches gemäß der Vorgabe *univariat* ist.

Dagegen ist bei Kurven mit zwei oder drei Parametern der unabhängige Parameter t nicht explizit vorgegeben. Eine häufig eingesetzte Parametrisierung benutzt die Bogenlänge t (K.W. Brodlie, 1980, P. Meissl, 1982).

Es sei

$$z = z(x, y) = \text{const.} \quad (2.15)$$

eine ebene Kurve im \mathbb{R}^2 . Ihre Diskretisierung sei ferner repräsentiert durch die Wertepaare $\{x_0, y_0\}, \{x_1, y_1\}, \dots, \{x_{n-1}, y_{n-1}\}$. Vermittels der Sehnenabschnitte

$$t_i = \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2} \quad \forall i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (2.16)$$

und

$$\tilde{t}_N = \sum_{i=1}^{n-1} t_i, \quad t \in [0, \tilde{t}_N[\quad (2.17)$$

ergibt sich eine Approximation für die Bogenlänge t , so daß (2.15) zerfällt in

$$z = z(x, y) \text{ const.} \iff \begin{cases} x(t) \\ y(t) \end{cases} \quad (2.18)$$

dessen diskrete Darstellung mit den Wertepaaren $\{t_0, x_0\}, \{t_0, y_0\}, \{t_1, x_1\}, \{t_1, y_1\}, \dots, \{t_{n-1}, x_{n-1}\}, \{t_{n-1}, y_{n-1}\}$ gegeben ist, und für $\tilde{t}_k = \sum_{i=1}^k t_i \forall k = 1, 2, \dots, n-1$ mit $\tilde{t}_0 := 0$.

Ganz analog zu den vorangegangenen Betrachtungen kann eine Raumkurve u im \mathbb{R}^3

$$u = u(x, y, z) = \text{const.} \quad (2.19)$$

zerlegt werden. Vermittels der Wertetripel $\{x_0, y_0, z_0\}, \{x_1, y_1, z_1\}, \dots, \{x_{n-1}, y_{n-1}, z_{n-1}\}$ lassen sich wiederum die Sehnenabschnitte $t_i \forall i = 1, 2, \dots, n$ definieren

$$t_i = \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2 + (z_i - z_{i-1})^2} \quad (2.20)$$

die die Grundlage zur neuen Parametrisierung (2.17) liefern. Somit läßt sich (2.19) separieren in

$$u = u(x, y, z) \text{ const.} \iff \begin{cases} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{cases} \quad (2.21)$$

Eine Verallgemeinerung zur Parametrisierung von Kurven im \mathbb{R}^n ist nun leicht möglich. Mit

$$\alpha = \alpha(a, b, \dots, z) = \text{const.} \quad (2.22)$$

und den Wertetupeln $\{a_0, b_0, \dots, z_0\}, \{a_1, b_1, \dots, z_1\}, \dots, \{a_{n-1}, b_{n-1}, \dots, z_{n-1}\}$ lassen sich die Abschnitte

$$t_i = \sqrt{(a_i - a_{i-1})^2 + (b_i - b_{i-1})^2 + \dots + (z_i - z_{i-1})^2} \quad (2.23)$$

berechnen und mittels (2.17) aufaddieren. Dadurch zerfällt (2.22) in

$$\alpha = \alpha(a, b, \dots, z) = \text{const.} \iff \begin{cases} a(t) \\ b(t) \\ \vdots \\ z(t) \end{cases} \quad (2.24)$$

Damit zeigt sich, daß die speziellen Raumkurven (2.15), (2.19) und (2.22) aus einem *multivariaten* Approximationsproblem konstruiert werden können, welches allgemein lautet

$$\begin{aligned} \text{Finde } a(t), b(t), \dots, z(t) \text{ mittels } a(t_0), a(t_1), \dots, a(t_{n-1}), b(t_0), b(t_1), \dots, b(t_{n-1}), \dots, \\ \dots, z(t_0), z(t_1), \dots, z(t_{n-1}) \text{ und } t_0 < t_1 < \dots < t_{n-1} \end{aligned} \quad (2.25)$$

2.1.2 Kubische Splines

Die Parameterdarstellung des vorangegangenen Abschnitts ist besonders für Polynomdarstellungen geeignet; ebenso können dann Ableitungen einfach berechnet werden. Polynome höheren Grades sind zwar für die Beschreibung komplexer Kurven besser geeignet, jedoch führt eine steigende Anzahl von Koeffizienten stets zu Problemen und Effizienzeinbußen bei der numerischen Realisierung.

In der jüngsten Vergangenheit haben sich beim interaktiven Generieren von Raumkurven *kubische Polynome* sehr gut bewährt. Bereits in 1964 hat J.C. Ferguson diese Polynomklasse zum Entwurf von Kurven im Flugzeugbau verwendet. Neuere Arbeiten hierzu finden sich in R.E. Barnhill/R.F. Riesenfeld (1974), I.D. Faux/M.J. Pratt (1981) und R.E. Barnhill/W. Böhm (1983).

Die Approximation von Kurven durch kubische Polynome geht aus von der allgemeinen Form

$$p = p(t) \quad (2.26)$$

wobei für den unabhängigen Parameter t gilt

$$t \in [T_j, T_{j+1}] \quad (2.27)$$

Innerhalb jedes Intervalles $[T_j, T_{j+1}]$, das durch die Knoten $T_j \forall j = 0, 1, 2, \dots, m-1$ begrenzt wird, läßt sich ein kubisches Polynom allgemein ansetzen zu

$$p(t) = a_0 + a_1(t - T_j) + a_2(t - T_j)^2 + a_3(t - T_j)^3 \quad (2.28)$$

so daß für jedes Polynom (2.28) die vier unbekannt Parameter a_0, a_1, a_2 und a_3 zu ermitteln sind. Die Auswahl der Knotenlage kann nach verschiedenen Gesichtspunkten erfolgen. Mit den Stetigkeitsbedingungen (2.10) – (2.12) an den Intervallgrenzen (Knoten) wird (2.26) – (2.28) verallgemeinert in die kubische Spline-Funktion

$$s(t) = p_{j,j+1}(t), t \in [T_j, T_{j+1}] \quad \forall j = 0, 1, 2, \dots, n-1 \quad (2.29)$$

Um nun zu glatten Kurven zu gelangen, ist zumindest C_0 - und C_1 -Kontinuität an den Intervallgrenzen zu fordern. Ferner können weitere Bedingungen an (2.29) gestellt werden (P. Meissl, 1982)

a) die ersten Ableitungen $f'(T_0)$ und $f'(T_{m-1})$ sind vorgegeben, welches zu einem *bedingten* Spline führt (2.30)

b) die zweiten Ableitungen sind identisch Null: $f''(T_0) = f''(T_{m-1}) = 0$; der Spline ist ein *freier* Spline (2.31)

c) es soll Periodizität in den Funktionswerten und den ersten Ableitungen vorliegen, also $f(t_0) = f(T_{m-1})$ sowie $f'(T_0) = f'(T_{m-1})$. Dieser Spline wird als *periodischer* Spline bezeichnet. (2.32)

Während a) und b) als Nebenbedingungen an das Approximationsproblem (2.25) zu stellen sind, ist c) zu gewährleisten, indem die zu approximierenden Wertefolgen jeweils am Anfang und am Ende mit vorhergehenden bzw. nachfolgenden Daten aufgefüllt werden.

2.1.2.1 C_1 -Kontinuierliche Kubische Splines Um C_1 -Kontinuität in den Knoten zu gewährleisten, wird das Polynom (2.28) reparametrisiert (vgl. Anhang (7.28)), so daß die folgende Darstellung automatisch diese Forderung beinhaltet

$$\begin{aligned}
 p(t) = & \left\{ 1 - 3 \frac{(t - T_j)^2}{(T_{j+1} - T_j)^2} + 2 \frac{(t - T_j)^3}{(T_{j+1} - T_j)^3} \right\} f(T_j) + \\
 & + \left\{ (t - T_j) - \frac{2(t - T_j)}{(T_{j+1} - T_j)} + \frac{(t - T_j)^3}{(T_{j+1} - T_j)^2} \right\} f'(T_j) + \\
 & + \left\{ \frac{3(t - T_j)^2}{(T_{j+1} - T_j)^2} - \frac{2(t - T_j)^3}{(T_{j+1} - T_j)^3} \right\} f(T_{j+1}) + \\
 & + \left\{ \frac{-(t - T_j)^2}{(T_{j+1} - T_j)} + \frac{(t - T_j)^3}{(T_{j+1} - T_j)^2} \right\} f'(T_{j+1})
 \end{aligned} \tag{2.33}$$

bzw. zusammengefaßt

$$p(t) = a(t)f(T_j) + b(t)f'(T_j) + c(t)f(T_{j+1}) + d(t)f'(T_{j+1}) \tag{2.34}$$

mit den neuen Koeffizienten $a(t), b(t), c(t)$ und $d(t)$ und unbekanntem Parametern $f(T_j), f'(T_j), f(T_{j+1})$ sowie $f'(T_{j+1})$.

Die Schätzung dieser Parameter kann im Modell (2.1) bzw. (2.3) erfolgen. Vermittels (2.29) und (2.34) lautet die Gleichung für eine Diskretisierungsstelle t_i explizit

$$\begin{aligned}
 y_i + v_i &= s(t_i) = p_{j,j+1}(t_i) \quad \forall \quad t_i \in [T_j, T_{j+1}] \quad \wedge \quad j = 0, 1, 2, \dots, m-1 \\
 &= a(t)f(T_j) + b(t)f'(T_j) + c(t)f(T_{j+1}) + d(t)f'(T_{j+1})
 \end{aligned} \tag{2.35}$$

Die Koeffizientenmatrix A ist nach (2.33) bzw. (2.34) folgendermaßen aufgebaut

$$A = \begin{bmatrix} A_0 & & & 0 \\ & A_1 & & \\ & & A_2 & \\ 0 & & & \text{usw.} \end{bmatrix} \tag{2.36}$$

mit den $((k - i) * 4)$ -Submatrizen A_j , wobei $(k - i)$ die Anzahl der Diskretisierungsstellen t_i innerhalb des Intervalls $[T_j, T_{j+1}]$ repräsentiert. Für dieses Intervall ergibt sich mit den Diskretisierungsstellen von i bis k

$$A_j = \begin{bmatrix} f(T_j) & f'(T_j) & f(T_{j+1}) & f'(T_{j+1}) \\ a_j(t_i) & b_j(t_i) & c_j(t_i) & d_j(t_i) \\ a_j(t_{i+1}) & b_j(t_{i+1}) & c_j(t_{i+1}) & d_j(t_{i+1}) \\ \vdots & & & \\ a_j(t_k) & b_j(t_k) & c_j(t_k) & d_j(t_k) \end{bmatrix} \tag{2.37}$$

Die Normalgleichungsmatrix $A^T P A$ zur Auflösung von (2.8) und auch (2.9), welche entsprechend der Koeffizientenmatrix A intervallweise aufgebaut werden kann, besitzt Bandstruktur mit der Bandbreite $s = 4$.

Alle Diskretisierungsstellen sind in Beobachtungsvektoren y_p enthalten, wobei Kurven in Abhängigkeit von einem, zwei bzw. drei Parameter mit (2.25) durch die folgenden Stützinformationen repräsentiert sind

$$\mathfrak{R}^1 : Y_1 = [x(t_0), x(t_1), \dots, x(t_{n-1})]^T \quad (2.38)$$

$$\mathfrak{R}^2 : Y_2 = [y_1, y_2] \text{ mit } y_2 = [y(t_0), y(t_1), \dots, y(t_{n-1})]^T \quad (2.39)$$

$$\mathfrak{R}^3 : Y_3 = [y_1, y_2, y_3] \text{ mit } y_3 = [z(t_0), z(t_1), \dots, z(t_{n-1})]^T \quad (2.40)$$

Die unbekannt Parameter werden hingegen in den Vektoren x_p zusammengefaßt

$$x_p = [f(T_0), f'(T_0), f(T_1), f'(T_1), \dots, f(T_j), f'(T_j), \dots]^T \quad \forall p = 1, 2, \dots \quad (2.41)$$

Man beachte, daß bei der Annahme von voneinander unabhängigen (unkorrelierten) Diskretisierungsstellen, jedoch derselben Gewichtung für jeden Beobachtungsvektor im multivariaten Approximationsproblem (2.25), und hier explizit mit (2.39) bzw. (2.40), anstelle von (2.8) das folgende multivariate Gleichungssystem aufgelöst werden kann

$$\hat{X} = (A^T P A)^{-1} A^T P Y, \quad P = \text{diag}(p_i) \quad (2.42)$$

mit $\hat{X} = [\hat{x}_1, \hat{x}_2]$ im \mathfrak{R}^2 und $\hat{X} = [\hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{x}_3]$ im \mathfrak{R}^3 . Somit läßt sich eine Approximation nach der Methode der kleinsten Quadrate numerisch und zeitlich effizient durchführen.

Zur Beurteilung der Approximationsgüte soll hier entgegen der Gewohnheit im Umgang mit der Methode der kleinsten Quadrate nicht die Varianz der Gewichtseinheit σ_0^2 , die folgendermaßen definiert ist

$$\sigma_0^2 = v^T P v / (n - u) = v^T P v / (n - 2m) \quad (2.43)$$

dienen, sondern der Betrag des maximalen Approximationsfehlers

$$v_0 = \max |v_i| \quad (2.44)$$

der in der Approximationstheorie üblicherweise eingesetzt wird. Aufgrund dieses Fehlermaßes ist zu entscheiden, ob die Approximation nach der Methode der kleinsten Quadrate als ausreichend anzusehen oder aber durch (2.5) zu verbessern ist.

2.1.2.2 C_2 -Kontinuierliche kubische Splines Um neben der C_1 -Kontinuität auch noch C_2 -Kontinuität für die gesuchte kubische Spline-Funktion zu garantieren, sind die Bedingungen hierzu explizit in die Parameterschätzung einzubauen. Gemäß den Betrachtungen im Anhang 7.2.2 resultiert die C_2 -Kontinuität in die Bedingungsgleichungen

$$h_1 f(T_{j-1}) + h_2 f'(T_{j-1}) + h_3 f(T_j) + h_4 f'(T_j) + h_5 f(T_{j+1}) + h_6 f'(T_{j+1}) = 0 \quad (2.45)$$

Ist m die Anzahl der Knoten T_j , so wird mit den $(m-2)$ Bedingungsgleichungen (2.45) C_2 -Kontinuität erzielt.

Im Falle einer Approximation nach der Methode der kleinsten Quadrate sind diese Bedingungsgleichungen im Modell (2.2) zu berücksichtigen. Darüberhinaus können diese ebenso in (2.3) Berücksichtigung finden, welches für die entsprechenden Schlupfvariablen $u_i \forall i = 1, 2, \dots, m-2$ den Wert Null impliziert.

Die Durchführung von (2.2) mit (2.4) kann ebenso im Modell (2.1) erfolgen, indem die Bedingungsgleichungen hohe Gewichte p_i bekommen (K.R. Koch/A.J. Pope, 1969, K.R. Koch, 1987).³ Dies hat den Vorteil, daß anstelle von Bandalgorithmen mit Rand weiterhin nur mit Bandalgorithmen gearbeitet werden kann. Mit der $(m-2) * m$ Matrix H von Bedingungsgleichungen

$$H = \begin{matrix} & f(T_0) & f'(T_0) & f(T_1) & f'(T_1) & f(T_2) & f'(T_2) & f(T_3) & f'(T_3) & \dots \\ \begin{matrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & h_{14} & h_{15} & h_{16} & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & h_{23} & h_{24} & h_{25} & h_{26} & h_{27} & h_{28} & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & h_{35} & h_{36} & h_{37} & h_{38} & \dots \\ \vdots & \vdots \end{matrix} & & & & & & & & & \end{matrix} \quad (2.46)$$

³Hier wurde C_1 -Kontinuität angenommen.

³Auf eventuell auftretende numerische Schwierigkeiten bei der Ausführung sei auch an dieser Stelle hingewiesen.

lautet das zu (2.9) äquivalente univariate Gleichungssystem

$$(A^T P A + g H^T H) \hat{x} = A^T P y, \quad g \in \mathbb{R}_0^+ \quad (2.47)$$

Die Normalgleichungsmatrix $(A^T P A + g H^T H)$ besitzt Bandstruktur mit der Bandbreite $s = 6$. Der Faktor g bestimmt die Stärke der Glättung durch den Einfluß der Bedingungsgleichungen $Hx = 0$ und kann entsprechend variiert werden.

Als Sonderfall kommt die Forderung nach C_2 -Kontinuität für $g = 0$ ganz zum Erlöschen, so daß nach den vorangegangenen Überlegungen lediglich C_1 -Kontinuität erhalten wird. Auf die Verallgemeinerung bzgl. des multivariaten Falls sei auch an dieser Stelle verwiesen.

2.1.2.3 Kubischer Spline mit Nebenbedingung Zu den bisher vorgestellten kubischen Spline-Funktionen weicht die Formulierung des folgenden, von C.H. Reinsch (1967, 1971) vorgeschlagenen approximierenden Splines, tlw. von den zuvor angestellten Betrachtungen ab. Als ein wesentlicher Unterschied ist dabei die Knotenlage bereits durch die Stützpunkte vorgegeben. Somit wird jeder Stützpunkt i , repräsentiert durch $\{t_i, x_i\}$ mit dem unabhängigen Parameter t_i und dem zu approximierenden Funktionswert x_i als Knoten betrachtet.

Unter Vorgabe der strengen Monotonie für t_i , also $t_0 < t_1 < \dots < t_{n-1}$, soll nun eine glättende (approximierende) Spline-Funktion aus den einzelnen Funktionen $g(t)$ der jeweiligen Intervalle so konstruiert werden, daß einerseits

$$\int_t g''(t)^2 dt = \min \quad (2.48)$$

und zum anderen

$$\sum_{i=0}^{n-1} \left[\frac{g(t_i) - x_i}{\sigma_{x_i}} \right]^2 \leq S \quad (2.49)$$

erfüllt wird, d. h. die Summe der Abweichungen der geglätteten von den gegebenen Werten in den Stützpunkten soll unter der Berücksichtigung von relativen Standardabweichungen $\sigma_{x_i} > 0$ der einzelnen Stützpunkte eine bestimmte vorgegebene Schranke $S \geq 0$ nicht überschreiten.

Zur Lösung von (2.48) und (2.49) wird mittels des Lagrange'schen Parameters λ und der Schlupfvariablen u^2 die folgende Lagrange'sche Funktion aufgebaut

$$\min_{g(t), \lambda, u} L(g(t), \lambda, u) := \int_{t_0}^{t_{n-1}} g''(t)^2 dt + \lambda \left\{ \sum_{i=0}^{n-1} \left[\frac{g(t_i) - x_i}{\sigma_{x_i}} \right]^2 + u^2 - S \right\} \quad (2.50)$$

die mit dem Problem (7.7) korrespondiert.

Zusätzlich soll die Lösung $f(t)$ noch die folgenden Bedingungen erfüllen (C.II. Reinsch, 1967):

$$f''''(t) = 0, \quad t_i < t < t_{i+1} \quad \forall i = 0, 1, 2, \dots, n-1 \quad (2.51)$$

$$f^{(k)}(t_i)_- - f^{(k)}(t_i)_+ = \begin{cases} 0 & \text{falls } k = 0, 1 \\ 0 & \text{falls } k = 2 \\ 2\lambda \frac{f(t_i) - x_i}{\sigma_{x_i}^2} & \text{falls } k = 3 \end{cases} \quad (2.52)$$

$$\text{mit } f^{(k)}(t_i)_\pm = \lim_{h \rightarrow 0} f^{(k)}(t_i \pm h)$$

$$\text{und } f''(t_0)_- = f'''(t_0)_- = f''(t_{n-1})_+ = f''''(t_{n-1})_+ = 0$$

Mit Hilfe der Bedingungen (2.52) ergibt sich als Lösung wiederum ein Spline, der sich aus den kubischen Polynomen

$$p_i(t) = a_i + b_i(t - t_i) + c_i(t - t_i)^2 + d_i(t - t_i)^3, \quad t_i \leq t \leq t_{i+1} \quad (2.53)$$

zusammensetzt zu

$$s(t) = p_{i,i+1}(t) \quad \forall i = 0, 1, 2, \dots, n-1 \quad (2.54)$$

und C_2 -Kontinuität aufweist.

Der folgende Lösungsweg wird nun beschriftet:

Durch Einsetzen von (2.54) in die Bedingungsgleichungen (2.53) ergeben sich Beziehungen zwischen den Koeffizienten des Splines

• aus $k = 2$:

$$c_0 = c_{n-1} = 0, d_i = (c_{i+1} - c_i)/3h_i \quad \forall i = 0, 1, 2, \dots, n-1 \quad (2.55)$$

• aus $k = 0$:

$$b_i = (a_{i+1} - a_i)/h_i - c_i h_i - d_i h_i^2 \quad \forall i = 0, 1, 2, \dots, n-1 \quad (2.56)$$

• aus $k = 1$:

$$Tc = Q^T a \quad (2.57)$$

• aus $k = 3$:

$$Qc = \lambda D^{-2}(x - a) \quad (2.58)$$

mit den Substitutionen

$$\begin{aligned} h_i &:= t_{i+1} - t_i \\ c &:= [c_1, c_2, \dots, c_{n-2}]^T \\ x &:= [x(t_0), x(t_1), \dots, x(t_{n-1})]^T = [x_1, x_2, \dots, x_{n-1}]^T \\ a &:= [a_0, a_1, \dots, a_{n-1}] \\ D &= \text{diag}(\sigma_{x_0}, \sigma_{x_1}, \dots, \sigma_{x_{n-1}}) \end{aligned}$$

T ist eine positiv definite tridiagonale $(n-1) \times (n-2)$ -Matrix mit

$$t_{ii} := 2(h_{i-1} + h_i)/3, \quad t_{i,i+1} = t_{i+1,i} = h_i/3$$

Q ist ebenso eine tridiagonale $u \times (u-2)$ -Matrix mit

$$q_{i-1,i} = 1/h_{i-1}, \quad q_{ii} = -1/h_{i-1} - 1/h_i, \quad q_{i+1,i} = 1/h_i$$

Durch Multiplikation von (2.58) mit $Q^T D^2$ erhält man

$$(Q^T D^2 Q + \lambda T)c = \lambda Q^T x \quad (2.59)$$

und durch Umformen von (2.58) ergibt sich

$$a = x - \lambda^{-1} D^2 Qc \quad (2.60)$$

womit bei bekanntem Wert für den Lagrange'schen Parameter λ die Vektoren c und a aus (2.59) und (2.60) bestimmt werden können. Die verbleibenden Koeffizienten b_i und d_i sind vermittels (2.55) und (2.56) zu berechnen.

Der Lagrange'sche Parameter wird aufgrund der folgenden Überlegungen bestimmt: Mit (2.50) gelangt man zu den Bedingungen – adäquat den Ableitungen (7.8) –

$$\frac{\partial L(g(t), \lambda, u)}{\partial \lambda} = \sum_{i=0}^{n-1} \left[\frac{g(t_i) - x_i}{\sigma_{x_i}} \right]^2 = S - u^2 \quad (2.61)$$

$$\frac{\partial L(g(t), \lambda, u)}{\partial u} = 2\lambda u = 0 \quad (2.62)$$

wobei die linke Seite von (2.62) angenähert werden kann durch die dominanten Polynomkoeffizienten $a_i \forall i$

$$\sum_{i=0}^{n-1} \left[\frac{g(t_i) - x_i}{\sigma_{x_i}} \right]^2 \sim (a-x)^T D^{-2} (a-x) = \|a-x\|_{D^{-2}}^2 \quad (2.63)$$

mit

$$\|a-x\|_{D^{-2}}^2 = \|DQ(Q^T D^2 Q + \lambda T)^{-1} Q^T x\|^2 := F(\lambda^2) \quad (2.64)$$

indem (2.59) und (2.60) in (2.63) einzusetzen sind. Weiter ist in (2.62) ersichtlich, daß λ und u zueinander komplementär sein müssen.

Es wird zunächst $\lambda^{(1)} = 0$ gesetzt und geprüft, ob die Bedingung (2.48) erfüllt ist. Ist dies nicht der Fall, wird in einem zweiten Iterationsschnitt $x^{(2)} = 0$ und $\lambda^{(2)} \neq 0$ gesetzt, wobei $\lambda^{(2)}$ mittels (2.64) berechnet wird aus

$$F(\lambda) = S^{1/2} \quad (2.65)$$

Danach ist wiederum (2.48) zu überprüfen. Die Iteration ist beendet, falls (2.48) erfüllt ist, so daß mit dem endgültigen λ gemäß (2.55) und (2.56) die d_i und b_i zu berechnen sind.

Die Wirkungsweise der hier vorgestellten Splineapproximationen ist in Kapitel 3 anhand von Beispielen demonstriert.

2.2 Grundlagen der digitalen Signalverarbeitung

2.2.1 Signaldarstellung

Für die Visualisierung sowohl von Gelände- als auch von Bilddaten in raumbezogenen Informationssystemen werden in jüngster Zeit vielfach Rasterbildschirme eingesetzt (D. Fritsch, 1987b, W. Göpfert, 1987), die eine zweidimensionale äquidistante Informationsmatrix voraussetzen. Des weiteren kann ein digitales Geländemodell in einem Raster definiert sein, so daß der Rasterdatenverarbeitung, die als Bestandteil der digitalen Signalverarbeitung zu interpretieren ist, eine wesentliche Rolle zukommt. Im Falle des so definierten digitalen Geländemodells repräsentiert die Gesamtheit aller Höhen ein zweidimensionales digitales Signal

$$x(m, n) \quad \forall \quad m, n = 0, 1, 2, \dots \quad (2.66)$$

ebenso kann ein digitales Bild durch die Gesamtheit aller vorliegenden Grauwerte beschrieben werden. Das Signal (2.66) wird häufig auch als *Zahlenfolge* oder *Zahlenfeld* im \mathbb{R}^2 bezeichnet.

Vermittels des Einheitsimpulses

$$d(m, n) = \begin{cases} 1 & m = n = 0 \\ 0 & m = n \neq 0 \end{cases} \quad (2.67)$$

der auch um k, l Einheiten verschoben werden kann

$$d(m-k, n-l) = \begin{cases} 1 & m = k, n = l \\ 0 & m \neq k, n \neq l \end{cases} \quad (2.68)$$

ergibt sich mit den Funktionswerten $x(k, l) \forall k, l = 0, 1, 2, \dots$ die fundamentale Operation (L.R. Rabiner/B. Gold, 1975)

$$x(m, n) = \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{l=0}^{L-1} x(k, l) d(m-k, n-l) = x(m, n) * d(m, n) \quad (2.69)$$

die als Faltung oder auch Konvolution bezeichnet wird. Bei der Definition von (2.69) ist das Signal $x(m, n)$ als kausal anzusehen mit seinen Kausalitätsgrenzen $K-1$ und $L-1$, also $k = 0, 1, 2, \dots, K-1$ und $l = 0, 1, 2, \dots, L-1$.

Für den eindimensionalen Fall reduziert sich (2.69) auf

$$x(m) = \sum_{k=0}^{K-1} x(k) d(m-k) = x(m) * d(m) \quad (2.70)$$

wobei $x(k) \forall k$ auch als Funktionswerte eines Profils interpretiert werden können.

2.2.2 Abtastintervall und Abtasttheorem

Ein grundlegendes Problem bei der Erfassung von Geländedaten ist die Ermittlung der optimalen Diskretisierungseinheit, mit der die Geländeoberfläche zu diskretisieren ist. Insbesondere bedingt die Integration von digitalen Geländemodellen in raumbezogene Informationssysteme die Abschätzung bzw. Vorgabe von Genauigkeitsmaßen, um Konsistenzprobleme zu überwinden und Qualitätsaussagen abzuleiten. Dabei sind die DGM-Daten mit einer geringst möglichen Anzahl von Stützpunkten zu erfassen, wobei dennoch die DGM-Produkte mit hinreichender Genauigkeit zur Verfügung gestellt werden können.

In der Praxis findet man häufig Fälle von Über- bzw. Unterdiskretisierungen, welche zwangsläufig zu Problemen, wie vermehrter Zeitaufwand für die Datenerfassung und -verarbeitung und ungenauen digitalen Geländemodellen, führen.

Während in lokalen Anwendungen das Gelände überwiegend tachymetrisch erfaßt wird, wobei vorweg keine Abschätzungen über die notwendige Datendichte möglich sind, vermag die Photogrammetrie schon bei der Datenerfassung objektive Kriterien zur Verfügung zu stellen (B. Makarovic, 1977b, K. Tempfli, 1982, H. Ebner/W. Reinhardt, 1984, D. Fritsch, 1985, 1988a). Basierend auf umfangreichen Untersuchungen (A.E. Balce, 1986, 1987, E. Dirscherl, 1987) ist in D. Fritsch (1988a) nachgewiesen, daß verschiedene Methoden zur Ableitung der kleinsten Diskretisierungseinheit durch eine vorweg auszuführende Datenglättung zur Elimination von Meßfehlern durchaus zu übereinstimmenden Resultaten kommen können. Dabei hat sich das Verfahren der *linearen Interpolation* als robust und sehr schnell herausgestellt, welches zur Ermittlung der kleinsten Diskretisierungseinheit (Abtastintervall) hinreichende Vorinformationen liefert. Als Glättungsverfahren können dabei die 2.1.2 vorgestellten approximierenden kubischen Splines – und hier insbesondere der bedingte kubische Spline 2.1.2.3 – herangezogen werden.

Gegeben sei ein geglättetes Profil $x(m) \forall m = 0, 1, 2, \dots, M - 1$, dessen Abtastintervall $\Delta_p \ll \Delta_{opt}$ – dem optimalen Abtastintervall – vorgegeben wird. Das Verfahren der linearen Interpolation ermittelt Δ_{opt} rekursiv vermittels gröberer (ausgedünnter) Profile bei einer gleichzeitigen Qualitätskontrolle. Mit dem ersten Profilmittel beginnend, läßt sich der nächste Nachbar ermitteln durch die Vorschrift

$$\hat{x}(m+n) = x(m) + \frac{x(m+k) - x(m)}{k} n \quad \forall n = 1, 2, \dots, k-1 \quad (2.71)$$

wobei $\hat{x}(m+n)$ den interpolierten Stützpunkt, $x(m)$ den ersten Bezugspunkt und $x(m+k)$ den zweiten Bezugspunkt darstellen, der um $k\Delta_p$ Einheiten von $x(m)$ entfernt ist.

Die Qualitätskontrolle läßt sich vermittels der Differenzen "beobachtet – gerechnet" durchführen

$$\hat{\epsilon}(m+n) = x(m+n) - \hat{x}(m+n) \quad (2.72)$$

und ist zusammenzufassen in dem Fehlermaß

$$\hat{\sigma}_{int}^2 = \frac{\|\hat{\epsilon}\|^2}{r} =: RMS(k) \quad (2.73)$$

Dieser Wert ist zu vergleichen mit der Vorgabe σ_s^2 : wenn $RMS(k)$ kleiner ist als σ_s^2 , wird die Rekursion fortgesetzt durch Vergrößerung des Profils um Δ_p . Unter der Voraussetzung von $k\Delta_p$ als Abtastintervall der entsprechenden Rekursion, $k = 2, 3, \dots, K$, wobei K die Zahl repräsentiert, vermittels derer die Vorgabe σ_s^2 gerade überschritten wird, ergibt sich das optimale Abtastintervall (A.E. Balce, 1987)

$$\Delta_{opt} = \left\{ K - 1 + \frac{\sigma_s^2 - RMS(K-1)}{RMS(K) - RMS(K-1)} \right\} \Delta_p \quad (2.74)$$

Aus (2.74) folgt für $K = 2 \Rightarrow \Delta_{opt} = \Delta_p$ unter $RMS(1) = \sigma_s^2$.

Nach der Ermittlung des optimalen Abtastintervalls stellt sich stets die Frage nach der Rekonstruktion des Kontinuums. Dabei kommt dem *Abtasttheorem* eine zentrale Bedeutung zu (S.D. Stearns, 1979), welches lautet

$$\Delta_{opt} < \frac{1}{2f_{max}} \quad (2.75)$$

wobei mit f_{max} die höchste im Kontinuum enthaltene Frequenzkomponente (Nyquistfrequenz) bezeichnet ist. Mit der Kreisfrequenz $\omega = 2\pi f$ erfolgt die zu (2.75) äquivalente Formulierung

$$\Delta_{opt} < \frac{\pi}{\omega_{max}}$$

Somit stellt sich das optimale Diskretisierungsintervall (Abtastintervall) dar als

$$\Delta_{opt} = \Delta_{opt}(\sigma_s^2, w_{max}) \quad (2.76)$$

d. h. Δ_{opt} ist zum einen eine Funktion einer vorgegebenen Genauigkeit σ_s^2 und zum anderen der Frequenz w_{max} , die man unbedingt rekonstruieren will. Wie in D. Fritsch (1984b, 1985b) gezeigt, lassen sich (2.75) und (2.76) zur Ableitung eines Verfahrens zur Ermittlung des optimalen Abtastintervalls nutzen, auf das an dieser Stelle nicht eingegangen werden soll. Das Abtasttheorem ist ebenso bei jedem Wechsel von Äquidistanzen zu beachten.

2.2.3 Selektive Systeme

Zur Manipulation von Geländedaten sind in vielen Anwendungen selektive Systeme vorteilhaft einzusetzen. Es handelt sich dabei konkret um digitale Filter und Differentiatoren, die zum einen Übergänge zwischen verschiedenen Äquidistanzen gewährleisten, für weiche (fließende) Schummerungen sorgen, und zum anderen Neigungsmodelle ableiten können.

Wird mit $x(m, n)$ das Eingangs- und mit $y(m, n)$ das Ausgangssignal eines selektiven Systems bezeichnet, so lassen sich beide Signale funktional darstellen durch (L.R. Rabiner/B. Gold, 1975)

$$y(m, n) = \Phi[x(m, n)] \quad (2.77)$$

mit einem beliebigen Operator Φ , der das selektive System charakterisiert. Unter der Annahme eines linearen und verschiebungsinvarianten selektiven Systems läßt sich (2.77) darstellen als

$$y(m, n) = \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{l=0}^{L-1} h(k, l) x(m-k, n-l) = h(m, n) * x(m, n) \quad (2.78)$$

d. h. das Ausgangssignal wird durch eine gleitende Mittelbildung erhalten mit den Gewichtskoeffizienten $h(k, l)$, die in ihrer Gesamtheit als *Impulsantwort* bezeichnet werden. Im \mathbb{R}^1 vereinfacht sich (2.78) zu

$$y(m) = \sum_{k=0}^{K-1} h(k) x(m-k) = h(m) * x(m) \quad (2.79)$$

Das gefilterte Signal (2.78) bzw. (2.79) ist phasenverschoben um $(K-1)/2$ und $(L-1)/2$ Stützstellen, falls K und L ungerade sind; für K, L gerade ist (2.78) bzw. (2.79) nicht an den Stützstellen selbst, sondern zwischen ihnen definiert. Um Nullphase zu erzielen, ist (2.78) bzw. (2.79) umzuschreiben in

$$y(m, n) = \sum_{k=-(K-1)/2}^{(K-1)/2} \sum_{l=-(L-1)/2}^{(L-1)/2} h(k, l) x(m-k, n-l) \quad (2.80)$$

und

$$y(m) = \sum_{k=-(K-1)/2}^{(K-1)/2} h(k) x(m-k) \quad (2.81)$$

Die Gewichtskoeffizienten $h(k, l)$ bzw. $h(k)$ können je nach Anwendung empirisch vorgegeben werden oder sind durch Vorgaben im Frequenzbereich zu ermitteln.

Während empirisch vorgegebene Impulsantworten überwiegend in der Manipulation der Radiometrie ihren Einsatz finden, ist die Geometrie häufig mit gezielt entworfenen Gewichtskoeffizienten zu verändern. Hierzu ist der Frequenzbereich einzubeziehen, um signaltheoretische Überlegungen wie das Abtasttheorem oder bestimmte Frequenzgänge zu realisieren.

Als Hilfsmittel zur Transformation vom Signalbereich in den Frequenzbereich und umgekehrt dient die Fouriertransformation (B. Gold/C.M. Rader, 1969), so daß sich der folgende funktionale Zusammenhang ergibt

$$\begin{aligned} H(e^{j\omega_1}, e^{j\omega_2}) &= \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{l=0}^{L-1} h(k, l) e^{-j(k\omega_1 + l\omega_2)} \\ &= H_{Re}(e^{j\omega_1}, e^{j\omega_2}) + jH_{Im}(e^{j\omega_1}, e^{j\omega_2}) \end{aligned} \quad (2.82)$$

$H(e^{j\omega_1}, e^{j\omega_2})$ wird als Frequenzantwort des selektiven Systems bezeichnet – andere Benennungen sind: Übertragungsfunktion oder Frequenzgang. Die i.d.R. komplexe Funktion ($j = \sqrt{-1}$) läßt sich gemäß der Euler'schen Schreibweise (L.R. Rabiner/B. Gold, 1975) separieren in das Produkt zwischen Amplitudenspektrum $|H(e^{j\omega_1}, e^{j\omega_2})|$ und Phasenspektrum $\arg H(e^{j\omega_1}, e^{j\omega_2})$

$$H(e^{j\omega_1}, e^{j\omega_2}) = |H(e^{j\omega_1}, e^{j\omega_2})| e^{j \arg H(e^{j\omega_1}, e^{j\omega_2})} \quad (2.83)$$

Für die Berechnung von Amplituden- und Phasenspektrum gelten die Beziehungen (L.R. Rabiner/B. Gold, 1975)

$$|H(e^{j\omega_1}, e^{j\omega_2})| = \sqrt{[H_{Re}(e^{j\omega_1}, e^{j\omega_2})]^2 + [H_{Im}(e^{j\omega_1}, e^{j\omega_2})]^2} \quad (2.84)$$

$$\arg H(e^{j\omega_1}, e^{j\omega_2}) = \arctan \{H_{Im}(e^{j\omega_1}, e^{j\omega_2})/H_{Re}(e^{j\omega_1}, e^{j\omega_2})\} \quad (2.85)$$

in denen mit $H_{Re}(e^{j\omega_1}, e^{j\omega_2})$ der Realteil und mit $H_{Im}(e^{j\omega_1}, e^{j\omega_2})$ der Imaginärteil bezeichnet sind. Während das Phasenspektrum innerhalb des Filterprozesses meistens als Invariante gesehen wird – zu erreichen durch linearphasige und nullphasige Impulsantworten – ist das Amplitudenspektrum zu verändern. Bei den Vorgaben handelt es sich um Tiefpässe, Hochpässe, Bandpässe und Bandsperren, abhängig davon, welche Teile des Frequenzbereiches passieren dürfen (siehe Abb. 2.2).

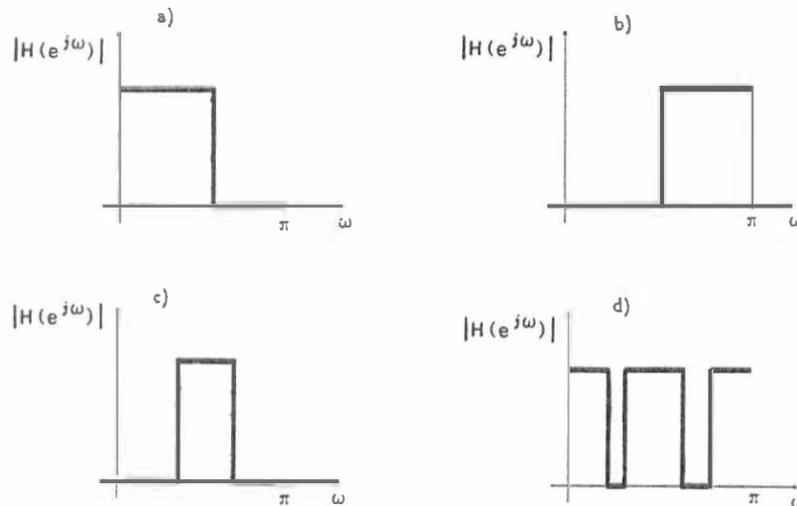


Abb. 2.2: Selektive Systeme a) Tiefpaß b) Hochpaß c) Bandpaß d) Bandsperre

Um rotationsinvariante Impulsantworten zu gewährleisten, sind rotationsinvariante Frequenzgänge vorauszusetzen, d. h. $\omega^2 := \omega_1^2 + \omega_2^2$.

Rotationsinvarianz ist dagegen innerhalb der Differentiation keine generelle Prämisse, wenngleich auch hier der Wunsch nach richtungsunabhängigen Ableitungen besteht. Der Frequenzgang eines idealen Differentiators ist mit der Abb. 2.3 wiedergegeben.

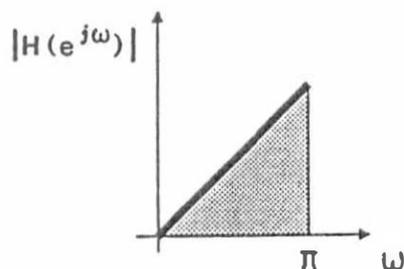


Abb. 2.3: Frequenzgang des Differentiators

Aufgrund des Gibbs'schen Phänomens (S.D. Stearns, 1979) sind die Vorgaben gem. Abb. 2.2 und Abb. 2.3 abzuschwächen, so daß sie durch Kosinuspolynome zu funktionalisieren sind (L.R. Rabiner/B. Gold, 1975, D. Fritsch, 1982). Basierend auf D. Fritsch (1982, 1983, 1984a) wurde mit H. Güntsch (1985) und U. Tretter (1987) ein umfangreiches Programmpaket weiterentwickelt, das beliebige Frequenzgänge im \mathfrak{R}^2 mittels des Modells (2.3) und dem Lernke-Algorithmus (D. Fritsch, 1985) approximieren kann. In der Abb. 2.4 ist ein entworfener Tiefpaßfilter wiedergegeben.

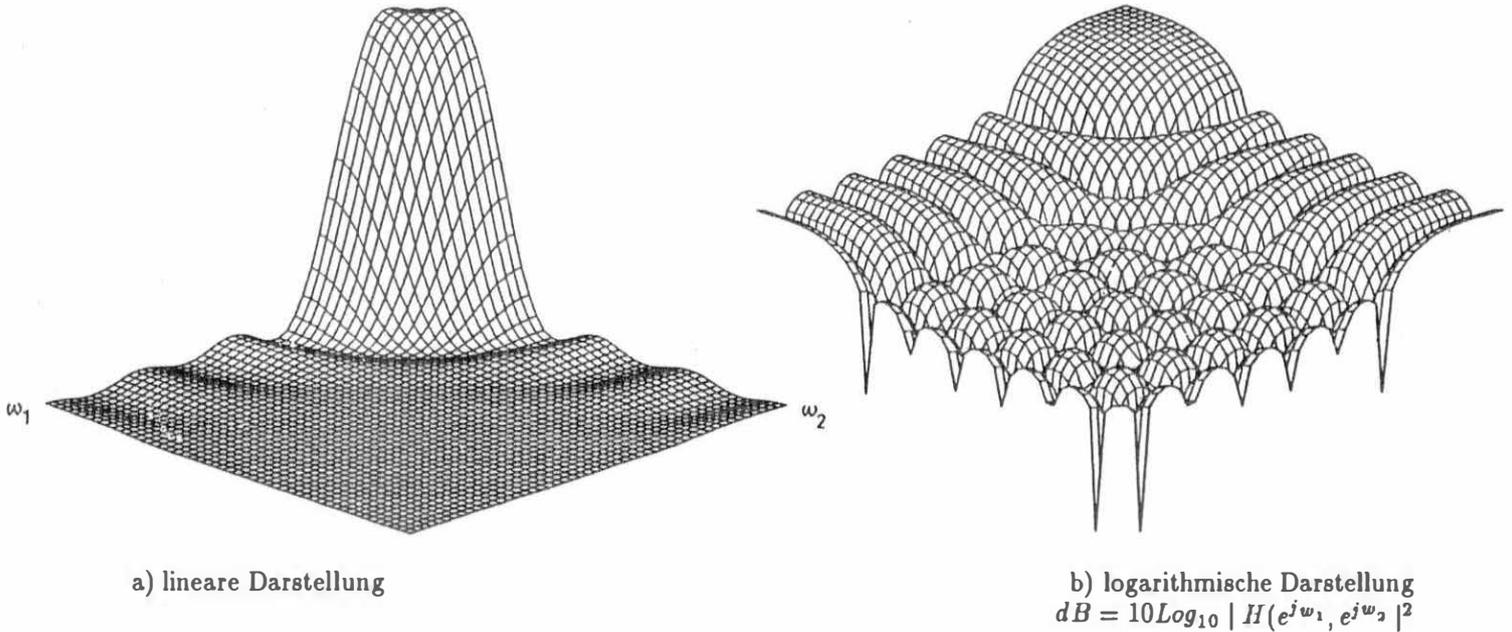


Abb. 2.4: Realisierter Tiefpaßfilter

Für die Differentiation des Signals $x(m, n)$ ist (2.80) bzw. (2.81) einzusetzen, woraus sich die folgenden Operationen ableiten lassen

$$\Delta x_m(m, n) = h_m(m, n) * x(m, n) \quad (2.86)$$

$$\Delta x_n(m, n) = h_n(m, n) * x(m, n) \quad (2.87)$$

Dabei stellen $h_m(m, n)$ bzw. $h_n(m, n)$ die Impulsantwort des Differentiators in m - und n -Richtung dar. Der Gesamtgradient wird erhalten aus

$$\Delta x(m, n) = \{[\Delta x_m(m, n)]^2 + [\Delta x_n(m, n)]^2\}^{1/2} \quad (2.88)$$

und ist als *digitales Neigungsmodell* zu interpretieren.

Während mit T.W. Parks/J.H. Mc Clellan (1972) ein sehr leistungsfähiges Programmpaket zur Ermittlung von selektiven Systemen im \mathfrak{R}^1 zur Verfügung steht, haben Untersuchungen gezeigt (M. Anzenhofer, 1988), daß Gradienten so lokal wie möglich zu berechnen sind. Dabei haben sich insbesondere die folgenden Differentiatoren bewährt

a) einfacher Differentiator

$$h_m(m, n) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -1/2 & 0 & 1/2 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad h_n(m, n) = h_m^T(m, n) \quad (2.89)$$

b) Sobel-Differentiator

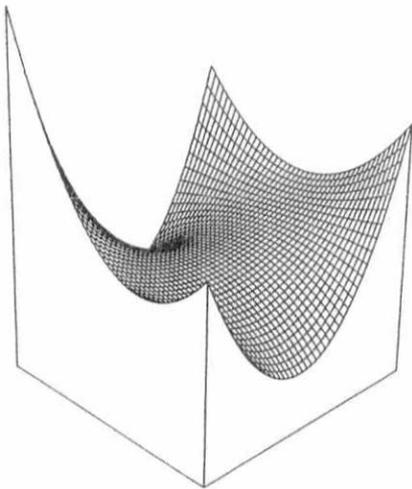
$$h_m(m, n) = \frac{1}{8} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad h_n(m, n) = h_m^T(m, n) \quad (2.90)$$

Die Durchführung der numerischen Differentiation mittels des Sobel-Operators ist an dem folgenden Beispiel demonstriert, in dem der Gesamtgradient in einem Rastermodell für die Position $m = 40, n = 30$ berechnet wird

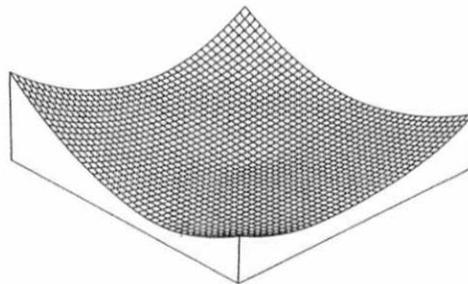
$$\begin{aligned}\Delta x_m(40, 30) &= \frac{1}{8} \{-x(39, 29) + x(41, 29) - 2x(39, 30) + \\ &\quad + 2x(41, 30) - x(39, 31) + x(41, 31)\} \\ \Delta x_n(40, 30) &= \frac{1}{8} \{-x(39, 29) + 2x(40, 29) + x(41, 29) - \\ &\quad - x(39, 31) - 2x(40, 31) - x(41, 31)\} \\ \Delta x(40, 30) &= \sqrt{\Delta x_m^2(40, 30) + \Delta x_n^2(40, 30)}\end{aligned}$$

In der Abb. 2.5 ist das digitale Neigungsmodell einer analytischen Fläche – erhalten durch (2.90) – dargestellt. Es hat sich gezeigt, daß der Sobel-Differentiator auch gegenüber Rauscheinflüssen sehr robust ist und in den untersuchten Fällen sehr gute Ergebnisse geliefert hat.

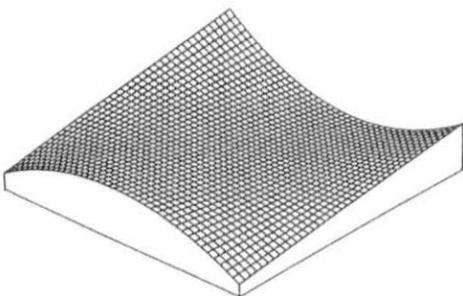
a) Analytische Fläche



b) Neigungsmodell "Sobel"



c) Gradient "Sobel" in m -Richtung



d) Gradient "Sobel" in n -Richtung

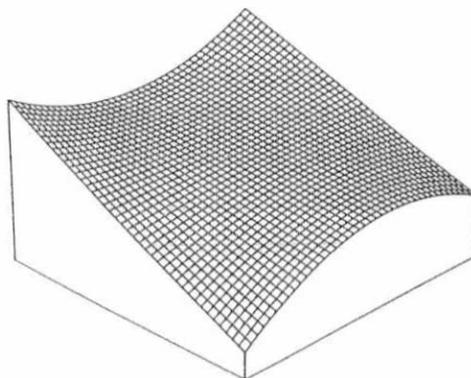


Abb. 2.5: Digitales Neigungsmodell

2.3 Geometrische Betrachtungen

Innerhalb der Geometrie ist in die Geometrie des Raumes (Metrik) und die Geometrie der Nachbarschaft (Topologie) zu unterscheiden. Während erstere i.d.R. durch die x, y, z -Koordinaten im \mathbb{R}^3 gegeben ist, sind in letzterer innere, äußere und zusammenhängende Beziehungen darzustellen. Erst die Vereinigung von Metrik und Topologie kann zu umfassenden Datenmodellen führen, wie sie in einer raumbezogenen Datenhaltung benötigt werden.

2.3.1 Darstellung räumlicher Objekte

Räumliche Objekte $O_i \forall i = 1, 2, \dots$, wie sie beispielsweise in Informationssystemen abzulegen sind, seien im folgenden stets auf den dreidimensionalen euklidischen Raum beschränkt

$$O_i \subset \mathbb{R}^3 \quad (2.91)$$

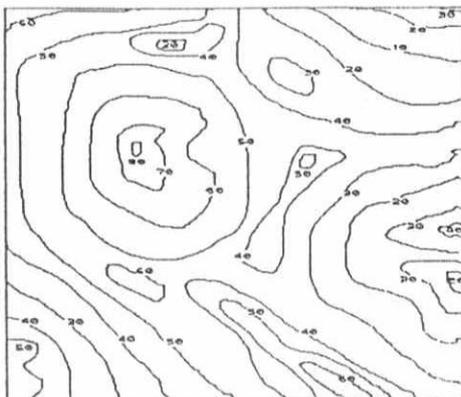
Die Beschreibung eines räumlichen Objekts kann in verschiedenen Modellansätzen erfolgen, von denen die drei wichtigsten aufgeführt werden

1. das *Linienmodell*, in dem das Objekt durch die Verbindung von Punkten (Knoten) P beschrieben wird, also $L = L(P)$
2. das *Flächenmodell* setzt analytische oder approximierende Flächen F ein, um das Objekt darzustellen. Dabei sind analytisch nicht einfach beschreibbare Flächen durch die Angabe von Stützinformation (Stützpunkte, Kanten, etc.), Tangentenvektoren und Krümmungseigenschaften zu approximieren. Dies führt zu der Beschreibung $F = F(L, P)$
3. im *Volumenmodell* ist das Objekt durch Standard- oder Profilkörper wiederzugeben. Ebenso können hier Boolesche Ausdrücke über Primitivkörper definiert werden (A. Meier, 1986). Der funktionale Ansatz lautet: $V = V(F, L, P)$

Die funktionale Beschreibung der obigen Modelle zeigt, daß die Dimension der Darstellungsprimitiven um jeweils einen Freiheitsgrad reduziert ist. Entsprechend diesen Betrachtungen lassen sich jetzt topologische Grundprimitive (GP) einführen. Es sind dies p Punkte (Knoten) $P_j \forall j = 1, 2, \dots, p$, l Linien (Kanten) $L_k \forall k = 1, 2, \dots, l$ und f Flächen (Blöcke) $F_m \forall m = 1, 2, \dots, f$, mit denen Objekte im \mathbb{R}^3 zu beschreiben sind.

In der Abb. 2.6 finden sich die zuvor genannten Modelle wieder, wobei jedoch das Flächenmodell in einer regelmäßigen und einer unregelmäßigen Struktur dargestellt ist.

a) Linienmodell



b) Flächenmodell "Raster"

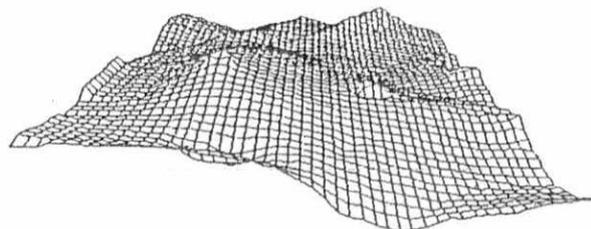
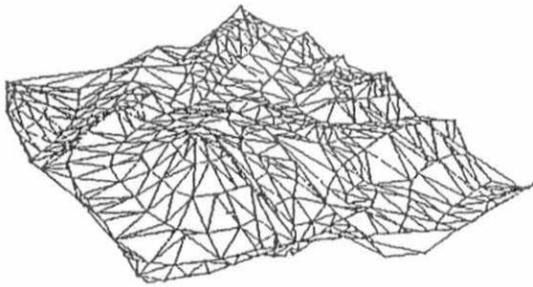
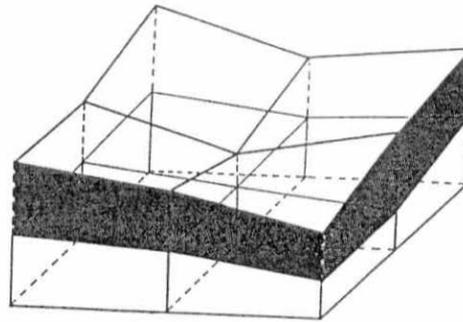


Abb. 2.6: Geländedarstellungen

c) Flächenmodell "Dreiecke"



d) Volumenmodell



Fortsetzung Abb. 2.6: Geländedarstellungen

Es folgt direkt, daß zur hinreichenden Geländedarstellung stets die *Randmodelle* 1) und 2) ausreichen, wobei wegen einer effizienten Datenverwaltung und -verarbeitung das Flächenmodell zu bevorzugen ist. Zudem kann durch die Überlagerung (Superposition) verschiedener Flächenmodelle das Volumenmodell approximiert werden. Dies hat maßgeblichen Einfluß auf die Datenverwaltung eines DGM: es zeigt nämlich, daß man in einer raumbezogenen Datenhaltung mit einer *zweidimensionalen* (\mathbb{R}^2) Topologie auskommen kann.

Für weitere Betrachtungen zum Flächenmodell wird die folgende Definition eingeführt (K.P. Müller/H. Wölpert, 1976)

Definition 2.1 : Ein Flächenmodell $F = F(L, P)$ heißt *plättbar*, wenn es in der Ebene so gezeichnet werden kann, daß keine Schnittpunkte von Linien $L_i, L_j \in L$ vorkommen, die nicht zugleich Punkte $P_k \in P$ des Flächenmodells sind.

Im Anschluß hieran sei noch die folgende Definition gegeben, die dann zu dem Satz von Euler – wichtiges Konsistenztheorem für Flächenmodelle – führt

Definition 2.2 : Eine ebene Abbildung (Landkarte) besteht aus einem plättbaren Flächenmodell. Die Linien des Flächenmodells heißen *Grenzen*, die Ebenenstücke zwischen den Linien nennt man *Flächen* (Blöcke, Länder). Die Abbildung (Landkarte) heißt *zusammenhängend*, wenn das dazugehörige Flächenmodell zusammenhängend ist.

Satz 2.9: (Satz von Euler) Für jede ebene Abbildung (Landkarte) mit p Punkten, l Linien und f Flächen, die zusammenhängend ist, gilt

$$C = p - l + f = 2 \quad (2.92)$$

Bem.: Man nennt C die *Charakteristik* der Abbildung; f muß dabei stets den Außenraum enthalten.

Der Beweis dieses Satzes ist in K.P. Müller/H. Wölpert (1976) durchgeführt. Der Satz von Euler ist eine fundamentale topologische Beziehung und für die raumbezogene Datenhaltung ein maßgebliches Konsistenztheorem.

2.3.2 Randdarstellung vermittels Begrenzungsflächen

Zur Ableitung von effizienten Datenverwaltungsstrukturen bietet die Randdarstellung vermittels Begrenzungsflächen eine gute Möglichkeit, da sich hier metrische und topologische Informationen separieren lassen. Dabei sei angenommen, daß die Objekte zusammenhängend sind. Zur Demonstration der Vorgehensweise innerhalb

der Randdarstellung mit Begrenzungsflächen wird das in der Abb. 2.7 gegebene Objekt betrachtet. Seine Randdarstellung ist mit der Abb. 2.8 wiedergegeben.

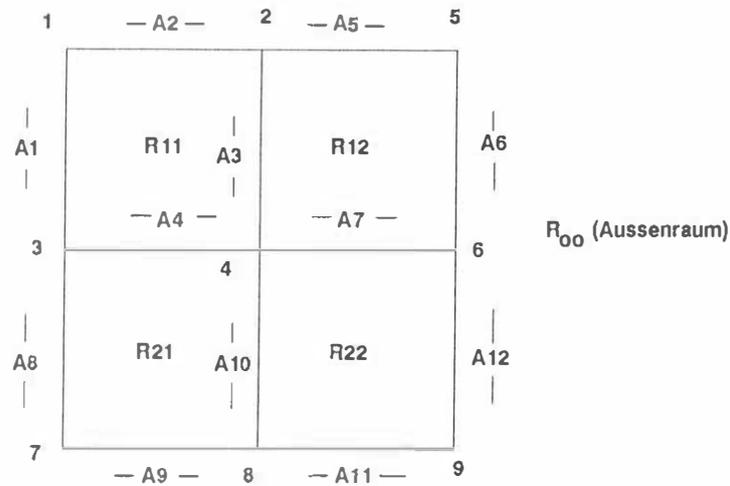


Abb. 2.7: Flächenmodell "Raster" bestehend aus den Elementen R_{11}, \dots, R_{22}

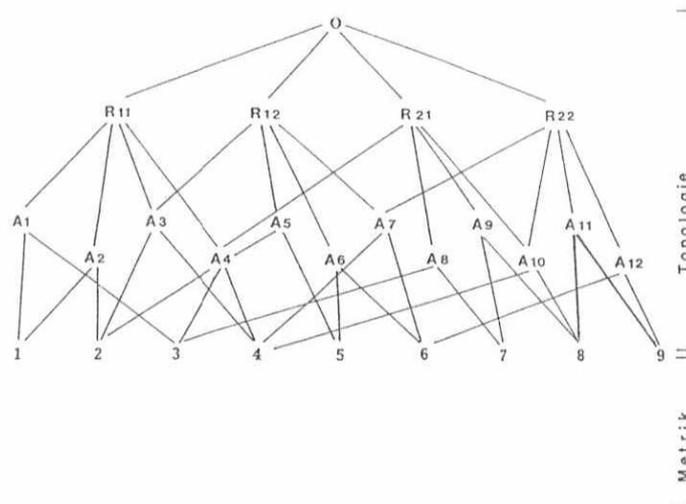


Abb. 2.8: Randdarstellung des Flächenmodells "Raster"

Die Separation von metrischer und topologischer Information erlaubt zum einen Möglichkeiten des schnellen Zugriffs auf die gewünschte Information und zum anderen Vorteile bei der Überprüfung der Datenkonsistenz. In dem hier vorgestellten Beispiel gilt die Konsistenzbedingung (Satz von Euler)

$$9 - 12 + 5 = 2$$

Ferner lassen sich topologische Beziehungen zwischen den Flächen, Kanten und Eckpunkten aufstellen

- jede innere Fläche R_{ij} hat genau 4 Kanten
- jede Kante A_i gehört zu genau 2 Nachbarflächen
- jede Kante ist durch genau 2 Eckpunkte definiert
- jeder Eckpunkt gehört zu mindestens zwei Kanten

die nicht nur komplementär sind, sondern auch redundant sein dürfen.

Mit diesen Bedingungen können bei jeder Benutzereingabe oder Modifikation die Daten getestet werden. Zu

einer hochqualitativen Darstellung von Flächenmodellen sind vielfach reine Rasterstrukturen unzureichend. Dies ergibt sich aus der Tatsache, daß zusätzliche Flächeninformationen wie Kanten und Einzelpunkte *innerhalb* der Rasterelemente vorliegen können oder aber die Stützpunkte zur Ableitung von Flächenmodellen von vorneherein so verteilt sind, daß sie geomorphologische Knicke repräsentieren. Die Ableitung eines Rastermodells würde dann diesen Anforderungen nur bedingt Rechnung tragen können.

Es besteht daher die Notwendigkeit, die Flächenbeschreibung dieser Vorgabe anzupassen, was zu Dreiecksvermaschungen führt. Wie in H. Ebner/D. Fritsch (1986) aufgezeigt, können Dreiecksvermaschungen auch lokal die Rasterstruktur ergänzen, so daß die Flächenmodelle "Raster" und "Dreiecke" durch ein kombiniertes Modell in der Form von "Raster und Dreiecke" zu ergänzen sind. Auf Grund der unterschiedlichen Datenstruktur kann dieses Modell auch als "hybrides Flächenmodell" (siehe Abb. 2.9) bezeichnet werden, wobei sogar die Rasterweite noch variabel sein kann (W. Reinhardt, 1988, H. Ebner et al., 1988).

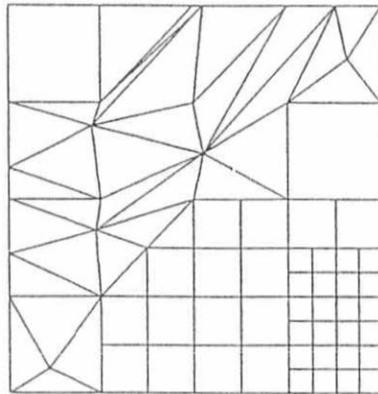


Abb. 2.9: Topologie eines hybriden Flächenmodells

2.3.3 Dreiecksvermaschungen

2.3.3.1 Triangulation nach Delaunay Der Aufbau von Dreiecksvermaschungen läßt sich nach der Vorschrift einer Delauney-Triangulation erreichen. Die zweidimensionale Delauney-Triangulation ist ein Flächenmodell bestehend aus Linienabschnitten über einer Punktmenge in der x, y -Ebene. Dabei wird eine maximale Anzahl von Dreiecken angestrebt, deren Seiten sich nicht schneiden. Dies ist zu erreichen, wenn im Umkreis eines jeden Dreiecks kein weiterer Punkt der Stützpunktmenge enthalten ist (D.T. Lee/W.S. Schachter, 1980, H.J. Gottschalk, 1981). In der Abb. 2.10 ist das Prinzip der Delauney-Triangulation wiedergegeben. Während der Umkreis i weitere Stützpunkte enthält und somit nicht zu einer maximalen Anzahl von Dreiecken führt, erfüllt der Umkreis j die Zielfunktion der Delauney-Triangulation.

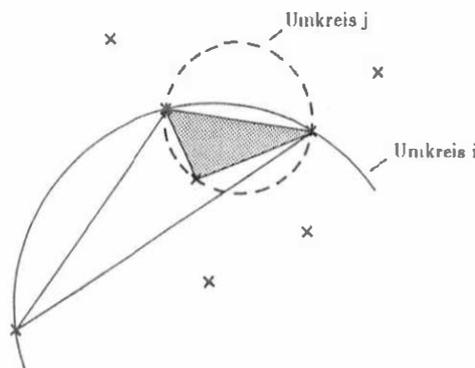


Abb. 2.10: Dreiecksvermaschung nach Delaunay

Die Triangulation ist geometrisch eindeutig unter der Voraussetzung, daß in der gesamten Stützpunktmenge nicht mehr als drei Punkte auf einem Kreis liegen. Abstandsberechnungen zwischen den Punkten sowie

die Prüfung des Gegenwinkels zum kleinsten Punktabstand oder aber Transformationsrechnungen bilden dabei die Konstruktionsgrundlagen. Bezeichnet N die Anzahl der Stützpunkte in der x, y -Ebene, so sind nach D.T. Lee/W.S. Schachter (1980) Rechenoperationen in der Größenordnung $O(N \log N)$ zum Aufbau der Triangulation notwendig. Als Erweiterung der Delauney-Triangulation ist die Vorgabe von Punktkonstellationen zu sehen, wie z. B. Punkte auf Kanten müssen Dreiecksseiten bilden. Über Anwendungen der Delauney-Triangulation zum Aufbau von Dreiecksflächenmodellen für digitale Geländemodelle wird in F. Steidler (1986) und F. Steidler et al. (1986a) berichtet. W. Reinhardt (1988) gibt eine iterative Vorgehensweise zum Aufbau einer optimalen Dreiecksstruktur an, um Geländekanten als Dreiecksseiten anzuhalten. Dies führt zu einem Austauschalgorithmus, der die Triangulation nach Delauney beendet, wenn die Zwangsbedingungen erfüllt sind (H. Ebner et al., 1989).

2.3.3.2 Triangulation mit minimalem Gewicht Als Triangulation mit minimalem Gewicht wird die Methode bezeichnet, die innerhalb der unregelmäßig angeordneten Stützpunktmenge eine Triangulation erzeugt, für die die Summe der Dreiecksseiten minimal wird (M. Gerstl et al., 1979).

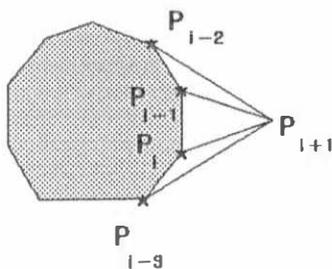
Bezeichnet N wiederum die Anzahl der Stützpunkte, so gibt es $\binom{N}{2}$ mögliche geradlinige Verbindungen in der x, y -Ebene. Werden diese Verbindungen der Länge nach geordnet und alle die Linien ausgeschieden, die eine kürzere schneiden, erhält man die Triangulation mit minimalem Gewicht. Während in R.-D. Dümpe/H.J. Gottschalk (1970) noch mit einem Algorithmus gearbeitet wurde, der zum Aufbau der Triangulation Operationen in der Größenordnung $O(N^3)$ benötigt, wird in K.R. Koch (1985) der in M. Gerstl et al. (1979) beschriebene Algorithmus zur Dreiecksvermaschung angesetzt und auf eine Verminderung der Rechenoperationen auf $O(N \log N)$ hingewiesen. Damit entspricht der Aufwand dem einer Delauney-Triangulation.

Die folgenden Schritte führen zu einer Triangulation mit minimalem Gewicht:

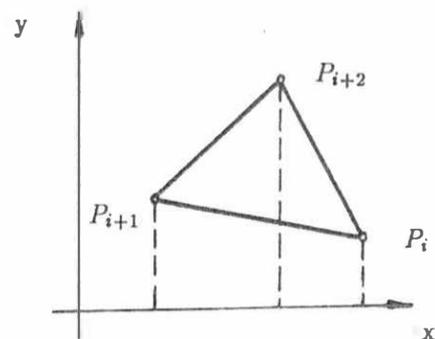
1. Sortieren der Meßdaten hinsichtlich des Abstands zu einer Koordinatenachse

$$x_i < x_{i+1} \text{ oder } y_i < y_{i+1} \text{ für } x_i = x_{i+1} \quad (2.93)$$

2. Initialisierung mit den ersten Punkten
3. Generierung einer konvexen Hülle mit Beschriftung der Hüllpunkte im Gegenuhrzeigersinn (siehe Abb. 2.11)
4. Sukzessives Einsetzen neuer Punkte in die konvexe Hülle und Bilden einer neuen Hülle
5. Austausch einzelner Dreiecksseiten wegen der minimalen Gewichtsbedingung, d. h. die Schaffung möglichst gleichseitiger Dreiecke
6. Bilden von Dreiecken aus den berechneten Punktverbindungen.



a) Konvexe Hülle



b) Dreiecksnumerierung

Abb. 2.11: Generierung einer konvexen Hülle

Die Entscheidung darüber, welche Punkte der Hülle mit dem Punkt P_{i+1} zu verbinden sind, wird mit Hilfe des Flächeninhalts von Dreiecken gefällt. Für ein Dreieck mit den Punkten P_i, P_{i+1}, P_{i+2} , deren Numerierung

im Uhrzeigersinn erfolgt (siehe Abb. 2.11b), ergibt sich die Fläche nach der Gauß'schen Flächenformel zu

$$2A = (x_{i+2} - x_i)(y_{i+1} - y_i) - (x_{i+1} - x_i)(y_{i+2} - y_i) \quad (2.94)$$

die stets positiv ist. Erfolgt die Bezeichnung im Gegenuhrzeigersinn, ergibt sich eine negative Fläche. Werden jetzt die Punkte der Hülle im Gegenuhrzeigersinn bezeichnet, dann sieht der Punkt P_{i+1} zwei Punkte dieser Hülle, wenn der Flächeninhalt des mit diesen Punkten gebildeten Dreiecks positiv ist (vgl. Abb. 2.11a).

Um innerhalb des Triangulationsgebiets Bruchkanten oder Strukturlinien zu berücksichtigen, muß die Forderung nach minimaler Summe der Seitenlängen aufgehoben werden. Dabei kann allerdings eine Triangulation angestrebt werden, die unter Berücksichtigung von geomorphologischer Information (Geländekanten, Einzelpunkte) eine minimale Summe der Verbindungslinien besitzt (K.R. Koch, 1985).

In der Abb. 2.12 ist eine Triangulation mit minimalem Gewicht dargestellt. Ein Erfahrungsbericht im Umgang mit dieser Triangulierungsmethode findet sich in M. Anzenhofer (1988)

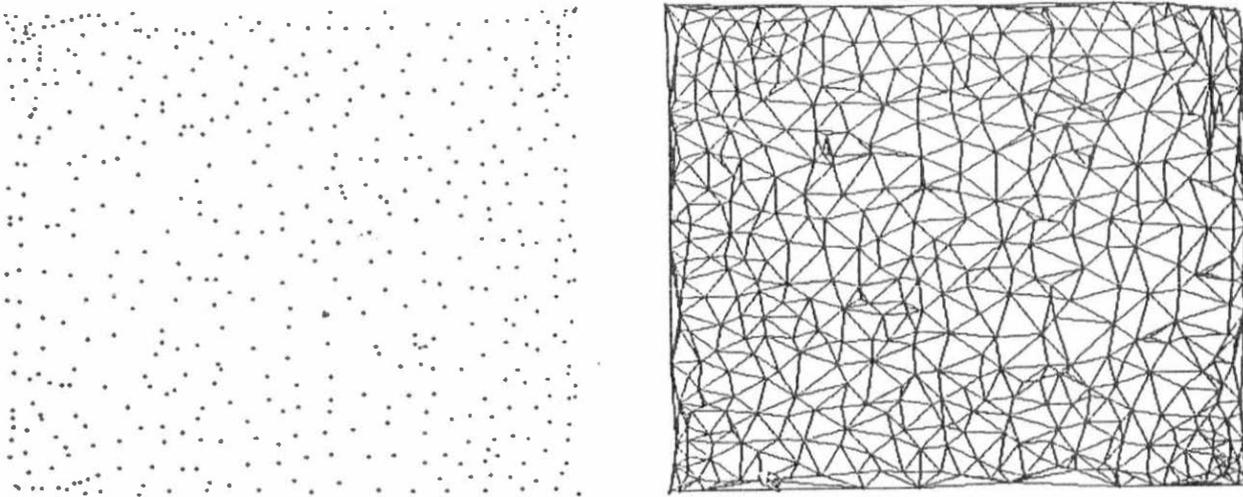


Abb. 2.12: Triangulation mit minimalem Gewicht

Vermittels der hier angegebenen Triangulationen lassen sich Dreiecks-Flächenmodelle oder auch die hybriden Flächenmodelle aufbauen. Die Randdarstellung eines Flächenmodells "Dreiecke" oder "Raster und Dreiecke" kann analog zu der Abb. 2.8 erfolgen.

Für Überprüfungen der Konsistenz von Dreiecksvermaschungen gilt ebenso der Satz von Euler, der an der Abb. 2.13 demonstriert wird (Dreiecke A, B, C, D, E, F und I bilden dabei eine "zusammenhängende Fläche", der Rest gehört zum Außenraum).

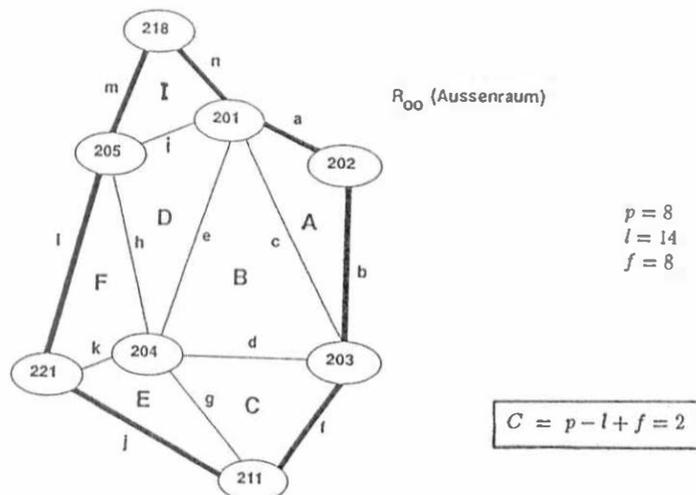


Abb. 2.13: Lokale Dreiecksvermaschung

2.3.4 Datenverwaltungsstrukturen für Begrenzungsflächen

Zu einer effizienten Verwaltung von Begrenzungsflächen sind verschiedene Organisationsformen einsetzbar. Während sich für das Flächenmodell "Dreiecke" verschiedene topologisch orientierte Verwaltungen auf der Grundlage von Eckpunkten und Verbindungslinien bewährt haben (L. Gründig, 1988) ist die Organisation von Rastermodellen sehr elegant mittels Baumstrukturen durchzuführen. Das hybride Flächenmodell ist dabei unter ein Rastermodell zu subsumieren, da auch hier die Flächenverwaltung rein rasterorientiert erfolgen kann. Ferner ist auch eine Rasterorganisation über einem Dreiecks-Flächenmodell denkbar, wenn Nachbardreiecke mitverwaltet werden.

2.3.4.1 Quadtree-Prinzip Das Quadtree-Prinzip ist eine Erweiterung der Methode der binären Bäume auf zwei Dimensionen (E. Denert/R. Franck, 1977). Es basiert auf einer sukzessiven Zerlegung des Gesamtgebiets der Größe $2^n * 2^n$ (Anzahl der Rasterelemente) in quadratische Teilgebiete. Diese Blockstruktur kann durch einen Binärbaum vom Grade 4 beschrieben werden. Das gesamte Teilgebiet mit seinen $2^n * 2^n$ Rasterzellen bildet dabei die "Astknoten", wobei die Höhe (Niveau) des Baumes durch n vorgegeben ist. Jeder Knoten läßt sich wiederum in 4 Richtungen aufweiten, nämlich NW (Nordwest = 1), NO (Nordost = 2), SO (Südost = 3) und SW (Südwest = 4). Mit der Abb. 2.14 und 2.15 ist die sukzessive Unterteilung eines Flächenmodells "Raster" im Quadtree-Prinzip wiedergegeben

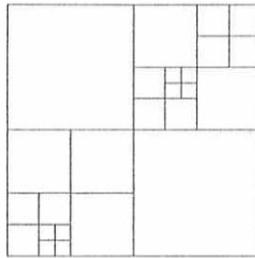


Abb. 2.14: Sukzessive Unterteilung eines Flächenmodells "Raster" im Quadtree-Prinzip

Auf der Basis dieser Unterteilung lassen sich verschiedene Datenverwaltungskonzepte realisieren, die innerhalb eines breiten Spektrums zwischen einer hierarchischen Datenfileverwaltung bis hin zur Verwaltung in relationalen Datenbanken anzusiedeln sind.

Die Verwaltung einer Quadtree-Struktur kann durch verschiedene Datenfiles gewährleistet werden, die entsprechend der topologischen Hierarchie der Abb. 2.15a die Verzweigungsrichtungen der Astknoten zum Inhalt haben können (siehe Abb. 2.15b).

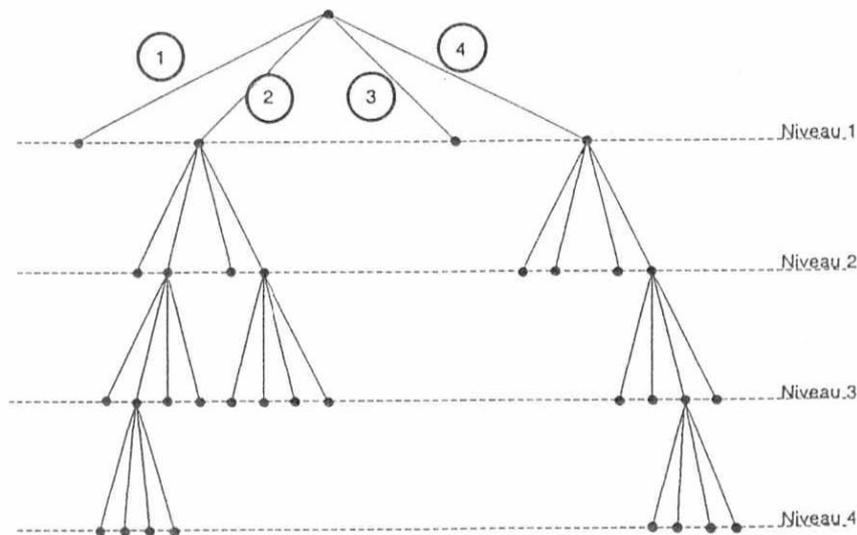


Abb. 2.15a: Die Quadtree - Struktur des Flächenmodells "Raster"

Somit läßt sich die Unterteilung in jeweils 4 neue Teilgebiete anhand der hierarchisch geordneten Datenfiles sehr schnell realisieren. Große Gebiete können effizient verwaltet werden, indem der einzelne Quadtree des 0. Niveaus das Grundelement einer regelmäßigen Gebietsunterteilung sein kann, die im Matrixformat geführt ist. Die Quadtree-Unterteilung ist nicht an Quadrate gebunden – ebenso sind Rechtecke in diesem Modus zu verwalten und als konsistentes Datenhaltungskonzept für eine raumbezogene Datenhaltung einzusetzen (K. Fischer, 1982, B. Sonne, 1988, N. Bartelme, 1988). Die Anpassung der Größe der Quadtree-Elemente an die Datendichte wird auch als “Prinzip der dynamischen Zellteilung” bezeichnet (siehe Abb. 2.16).

Hierarchie	Knoten (Verzweigungen)	Datenfile																											
0. Niveau	<table border="1"><tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr></table>	1	2	3	4	<table border="1"><tr><td>0</td></tr></table>	0																						
1	2	3	4																										
0																													
1. Niveau	<table border="1"><tr><td>2</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr><tr><td>4</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr></table>	2	1	2	3	4	4	1	2	3	4	<table border="1"><tr><td>1</td><td>2</td></tr><tr><td>4</td><td></td></tr></table>	1	2	4														
2	1	2	3	4																									
4	1	2	3	4																									
1	2																												
4																													
2. Niveau	<table border="1"><tr><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr><tr><td>2</td><td>4</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr><tr><td>4</td><td>4</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr></table>	2	2	1	2	3	4	2	4	1	2	3	4	4	4	1	2	3	4	<table border="1"><tr><td>2</td><td>2</td><td>2</td></tr><tr><td>2</td><td>4</td><td></td></tr><tr><td>4</td><td>4</td><td></td></tr></table>	2	2	2	2	4		4	4	
2	2	1	2	3	4																								
2	4	1	2	3	4																								
4	4	1	2	3	4																								
2	2	2																											
2	4																												
4	4																												
3. Niveau	<table border="1"><tr><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr><tr><td>4</td><td>4</td><td>3</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr></table>	2	2	2	1	2	3	4	4	4	3	1	2	3	4	<table border="1"><tr><td>3</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td></tr><tr><td>4</td><td>4</td><td>4</td><td>3</td></tr></table>	3	2	2	2	4	4	4	3					
2	2	2	1	2	3	4																							
4	4	3	1	2	3	4																							
3	2	2	2																										
4	4	4	3																										

Abb. 2.15b: Verwaltung der Quadtree-Struktur

Innerhalb des Flächenmodells “Raster” zur Darstellung von Geländeinformation hat dieses Konzept zu den variablen Maschenweiten geführt (E. Abmus, 1982, H. Ebner/D. Fritsch, 1986, H. Ebner et al. 1988), die – wie schon vorher aufgeführt – lokale Dreiecksvermaschungen enthalten können.

Die Überlagerung des einzelnen Quadtree mit einer regelmäßigen Gebietsunterteilung ist bereits genutzt in dem DGM-Programmsystem HIFI88 (H. Ebner/R. Ilöbler, 1988), womit große Gebiete (Regionen, Land) effizient verwaltet werden können.

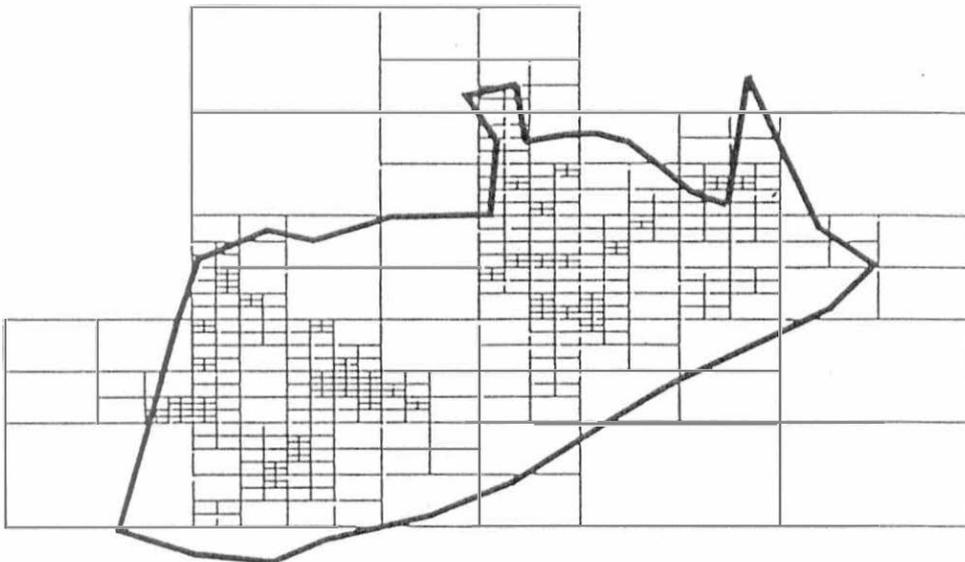


Abb. 2.16: Prinzip der dynamischen Zellteilung (Quelle: B. Sonne, 1988)

2.3.4.2 Organisationsformen für Triangulationen Das Prinzip der dynamischen Zellteilung kann auch für eine Organisation von Triangulationen gewertet werden. Während in L. Gründig (1988) eine “Divide and Conquer”-Strategie basierend auf D.T. Lee/W.S. Schachter (1980) zum lokalen Aufbau und anschließender Vereinigung von Triangulationen empfohlen wird, wird sich hier lediglich der Verwaltung innerhalb der Quadtree-

Struktur (Abb. 2.15) zugewendet. Dazu bieten sich verschiedene Organisationsformen an, auf die im folgenden näher einzugehen ist.

a) Organisation vermittelt Nachbardreiecke

Dabei werden die entstandenen Dreiecke in einer Liste erfaßt, die für jedes Dreieck die Eckpunkte sowie Zeiger zu den angrenzenden Dreiecken enthält. Die Nachbardreiecksinformation fällt direkt an. Wird jetzt innerhalb der Triangulierung nach Nachbarschaftsbeziehungen gefragt, um z. B. nachträgliche Punkte oder Linien einzubinden, ist die Information über alle in einem Punkt endenden Dreiecksseiten zur Verfügung zu stellen. Dies ist in einer Organisation nach Dreiecken nicht leicht zu unterstützen, wie an dem Beispiel der Abb. 2.13 zu zeigen ist.

Dreiecke	Dreiecks-Pkt.	Nachbardreiecke
A	201 202 203	-- B
B	201 203 204	A C D
C	203 204 211	B - E
D	201 204 205	B F I
E	204 211 221	F - C
F	205 204 221	D E -
I	201 205 218	D - -

Abb. 2.17: Organisation nach Dreiecken

Während für die Dreieckspunkte die zugehörigen Dreiecke noch relativ einfach ermittelt werden können (wobei jedoch der gesamte Datenfile zu durchsuchen ist), sind die Dreiecksseiten nur durch umständliche und dadurch zeitintensive Abfragen zu rekonstruieren.

b) Organisation vermittelt Dreiecksseiten

Werden die Endpunkte jeder Kante in einer Liste (Datenfile) verwaltet, so können zusätzliche Zeiger die von jedem Dreieckspunkt ausgehenden Kanten miteinander verbinden. Für das mit der Abb. 2.15 gegebene Beispiel ergibt sich die in der Abb. 2.18 wiedergegebene Struktur.

Kante	Eckpunkte	Zeiger
a	201 202	c b
b	203 202	- -
c	201 203	e d
d	204 203	g f
e	201 204	i h
f	211 203	- -
g	204 211	k j
h	205 204	l -
i	201 205	n m
j	221 211	- -
k	204 221	- l
l	205 221	- -
m	218 205	- -
n	201 218	- -

Abb. 2.18: Organisation nach Dreiecksseiten

Der Aufbau der Triangulation läuft jetzt folgendermaßen ab: Die Kante a ist durch einen "Erstzeiger" mit der Kante c verbunden, nach deren Zugriff sich des "Zweitzeigers" der Kante a bedient wird. Nach Aufbau des Dreiecks A (a, b, c) wird die Kante b abgearbeitet, bei der jedoch keine Zeigerinformation vorliegt und somit direkt nach c weitergegangen wird usw. Dadurch wird jede Kante sequentiell nach Erst- und Zweitzeigern abgefragt.

Somit lassen sich direkt für jede Kante die entsprechenden Dreiecke rekonstruieren, die aus den Endpunkten der Dreieckskante und ihren verzweigten Kanten gebildet werden. Die Numerierung der Dreiecke kann dabei jedoch nicht berücksichtigt werden.

c) Vollständige Organisation von Dreiecken

Entsprechend der Organisation mittels Nachbardreiecke (Flächenorganisation) und der Organisation mittels Dreieckskanten (Linienorganisation) können in einer vollständigen Organisation die Dreiecke nach Flächen, Linien, Punkten und zusätzlichen Angaben organisiert sein. Diese Form der Verwaltung von Topologie und Metrik resultiert aus der Randdarstellung des Flächenmodells "Dreiecke", die analog zur Abb. 2.8 zu sehen ist (dabei sind die Rastermaschen R_i durch Dreiecke D_k zu ersetzen und jedem Dreieck D_k drei Kanten zuzuordnen). Als zusätzliche Informationen können die Begrenzung des Flächenmodells, Anzahl der Dreiecke, Punktzahl sowie Minimal- und Maximalwerte für die Koordinaten x, y, z gespeichert werden.

Für die in der Abb. 2.13 wiedergegebenen zusammenhängenden Dreiecke A, B, C, D, E, F und I ergibt sich die in Abb. 2.19 wiedergegebene vollständige Organisation basierend auf Dreiecksflächen.

Zus. Information	
Anzahl Punkte	8
Anzahl Außenpkt.	7
Anzahl Dreiecke	7
Min. z - Koord.	...
Max. z - Koord.	...

Hülleninformation	
Außenpunkt - Nr.	
201	
202	
203	
211	
221	
205	
218	

Dreiecksinformation	
Dreiecke	Nachbardreiecke
A	B
B	A,C,D
C	B,E
D	B,F,I
E	C,F
F	E,D
I	D

Punktinformation	
Dreieck	Punkt - Nr.
A	201,202,203
B	201,203,204
C	203,204,211
D	201,204,205
E	204,211,221
F	204,205,221
I	201,205,218

Koordinaten (Metrik)			
Pkt.	x	y	z
201	x_{201}	y_{201}	z_{201}
202	x_{202}	y_{202}	z_{202}
203	x_{203}	y_{203}	z_{203}
204	x_{204}	y_{204}	z_{204}
205	x_{205}	y_{205}	z_{205}
211	x_{211}	y_{211}	z_{211}
218	x_{218}	y_{218}	z_{218}
221	x_{221}	y_{221}	z_{221}

Abb. 2.19: Vollständige Organisation mittels Dreiecksflächen

In der Abb. 2.20 ist eine vollständige Organisation mit Dreieckskanten dargestellt. Ein Vergleich mit der Organisation nur nach Dreieckskanten zeigt, daß hierbei ebenso die Numerierung der Dreiecke erhalten werden kann, wenn sie zusätzlich Berücksichtigung findet.

Zus. Information	
Anzahl Punkte	8
Anzahl Außenpkt.	7
Anzahl Dreiecke	7
Min. z - Koord.	...
Max. z - Koord.	...

Hülleninformation	
Außenpunkt - Nr.	
	201
	202
	203
	211
	221
	205
	218

Kanteninformation			
Kanten	Punkte	Zeiger	
a	201 202	c	b
b	203 202	-	-
c	201 203	e	d
d	204 203	g	f
e	201 204	i	h
f	211 203	-	-
g	204 211	k	j
h	205 204	l	-
i	201 205	n	m
j	221 211	-	-
k	204 221	-	l
l	205 221	-	-
m	218 205	-	-
n	201 218	-	-

Koordinaten (Metrik)			
Pkt.	x	y	z
201	x_{201}	y_{201}	z_{201}
202	x_{202}	y_{202}	z_{202}
203	x_{203}	y_{203}	z_{203}
204	x_{204}	y_{204}	z_{204}
205	x_{205}	y_{205}	z_{205}
211	x_{211}	y_{211}	z_{211}
218	x_{218}	y_{218}	z_{218}
221	x_{221}	y_{221}	z_{221}

Abb. 2.20: Vollständige Organisation nach Dreieckskanten

Eine weitere vollständige Darstellung ergibt sich, wenn nach Flächen, Linien und Punkten geordnet wird (siehe Abb. 2.21)

Ein Vergleich der Organisationsarten von a), b) und c) zeigt, daß ein größerer Aufwand in der Datenorganisation zu leistungsfähigeren Datenhaltungen führt. Während in der CAD-Graphik überwiegend mit den Organisationsformen a) und b) gearbeitet wird, sind in einer raumbezogenen Datenhaltung vollständige Organisationen anzustreben. Der einfachen Fortführung einer vollständigen Organisation nach Flächen, Kanten und Punkten steht ein langsamer Bildaufbau der Triangulation entgegen, während die vollständige Organisation nach Dreieckskanten durch die Verzeigerungen für einen schnellen Bildaufbau sorgt. Hierbei erschweren jedoch die Verzeigerungen die Fortführung.

Da in der raumbezogenen Datenhaltung der Visualisierung von Triangulationen eine eher untergeordnete Rolle zukommt, ist aus Fortführungsgründen die vollständige Organisation nach Dreiecksflächen oder nach Flächen, Kanten und Punkten zu empfehlen.

Zus. Information	
Anzahl Punkte	8
Anzahl Außenpkt.	7
Anzahl Dreiecke	7
Min. z - Koord.	...
Max. z - Koord.	...

Hülleninformation	
Außenpunkt - Nr.	
	201
	202
	203
	211
	221
	205
	218

Dreiecksinformation	
Dreieck	Zeiger
A	a,b,c
B	c,d,e
C	d,f,g
D	e,h,i
E	g,j,k
F	h,k,l
I	i,m,n

Kanteninformation	
Kante	Zeiger
a	201,202
b	202,203
c	201,203
d	203,204
e	201,204
f	203,211
g	204,211
h	204,205
i	201,205
j	211,221
k	204,221
l	205,221
m	205,218
n	201,218

Koordinaten (Metrik)			
Pkt.	x	y	z
201	x_{201}	y_{201}	z_{201}
202	x_{202}	y_{202}	z_{202}
203	x_{203}	y_{203}	z_{203}
204	x_{204}	y_{204}	z_{204}
205	x_{205}	y_{205}	z_{205}
211	x_{211}	y_{211}	z_{211}
218	x_{218}	y_{218}	z_{218}
221	x_{221}	y_{221}	z_{221}

Abb. 2.21: Vollständige Organisation nach Flächen, Linien und Punkten

2.3.4.3 Datenorganisation für hybride Flächenmodelle Entsprechend den vorangegangenen Überlegungen lassen sich Organisationsformen für hybride Flächenmodelle durch die Kombination von Gitterstrukturen mit Triangulationen angeben. Die dominierende Organisation kann dabei eine rasterorientierte Vorgehensweise sein, die innerhalb einer Baumstruktur hierarchisch aufgebaut ist, und auf dem niedersten Niveau die geometrischen Grundelemente Raster und Dreiecke verwaltet. Somit bietet sich das Quadtree-Prinzip für die hierarchische Datenorganisation an (Organisation im Raster), während die Triangulationen nach Kanten, Flächen oder auch in Kombination (vollständige Organisation) zu verwalten sind.

Die Vorgehensweise einer Datenorganisation für ein hybrides Flächenmodell soll an dem Beispiel der Abb. 2.22 demonstriert werden.

a) Topologie

b) Binärbaum

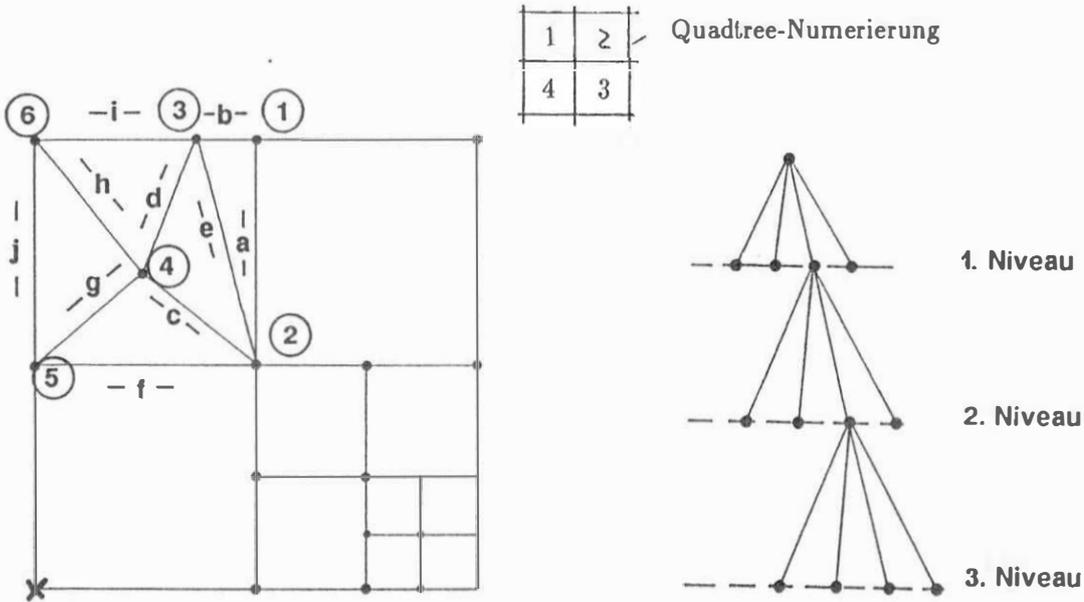


Abb. 2.22: Hybrides Flächenmodell

Dabei sind drei Datenfiles aufzubauen, von denen einer die Zellentopologie und zwei die Metrik wiedergeben (siehe Abb. 2.23). Innerhalb der Zellentopologie kommt man mit einer einfachen Dreiecksorganisation aus, so daß hier die Organisation nach Dreieckskanten gewählt wurde. Dieser File beginnt mit einer Kopfzeile (Header), in der die Zentralpunktposition i, j , die Potenz n und ein Indikator der Quadtreeunterteilung zu finden sind. Die Rastertopologie kann durch die Verzweigung des Binärbaumes wiedergegeben werden.

i, j	Regionale	Metrik	$\Delta x, \Delta y = 200 \text{ m}$
		$z_{i-1,j-1}$	$z_{i-1,j}, z_{i-1,j+1}$
		$z_{i,j-1}$	$z_{i,j}, z_{i,j+1}$
		$z_{i+1,j-1}$	$z_{i+1,j}, z_{i+1,j+1}$
		$z_{i+2,j-1}$	$z_{i+2,j}, z_{i+2,j+1}$

"Ausgangszelle"

Zellentopologie			
i, j	$3 = n$	IND = 0	"Header"
0			
1	3		
2	3, 3		
a	1, 2		b, e
b	1, 3		-, -
c	3, 2		d, e
d	3, 4		i, h
e	4, 2		g, f
f	5, 2		-, -
g	4, 5		-, -
h	6, 4		j, g
i	3, 6		-, -
j	6, 5		-, -

IND = 0
 "Alle Knoten des
 Quadrees sind vorhanden"

IND = 1
 "Die individuellen Knoten des
 Quadrees sind gespeichert"

lokale Metrik					
$\Delta x = \Delta y = 100 \text{ m}$		$\Delta x = \Delta y = 50 \text{ m}$		$\Delta x = \Delta y = 25 \text{ m}$	
z_{ij}	Zeiger	z_{ij}	Zeiger	z_{ij}	Zeiger
z_{11}	5	z_{11}	-	z_{11}	-
z_{21}	2	z_{21}	-	z_{21}	-
z_{31}	-	z_{31}	43	z_{31}	-
z_{41}	-	z_{41}	-	z_{41}	32
z_{22}	1	z_{22}	-	z_{22}	-
Pkt.	x	y	z	Zeiger	
1	,	,	,	51	
2	,	,	,	21	
3	x_3	y_3	z_3	-	
4	x_4	y_4	z_4	-	
5	,	,	,	11	
6	,	,	,	$i, j+1$	

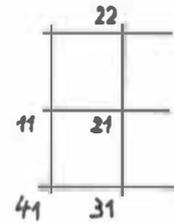


Abb. 2.23: Datenorganisation im hybriden Flächenmodell

Innerhalb der lokalen Metrik wird vermittelt der Zeiger sichergestellt, daß die Koordinaten redundanzfrei abgespeichert werden können. Während für die Rasterelemente die x, y -Koordinaten jederzeit rekonstruierbar und daher nicht unbedingt abzuspeichern sind, müssen die Dreieckspunkte vollständig in x, y und z abgelegt werden. Dabei können jedoch Dreieckspunkte mit Rasterpunkten zusammenfallen, was durch die Verzeigerungen zu berücksichtigen ist. Für die Numerierung der Zeiger wurde in der Abb. 2.23 ein Matrix-Modus gewählt, d. h. der Zeiger 51 bei Dreieckspunkt 1 wird durch das Raster der lokalen Metrik bedient (5. Zeile, 1. Spalte).

2.4 Grundlagen der Informatik

Mit Hinblick auf die Datenverwaltung von raumbezogenen Daten ist die Thematik der Datenbanksysteme hochaktuell. Obwohl Datenbanksysteme der Informatik schon seit einigen Jahren nicht mehr ausschließlich im kommerziellen Bereich wie Bank- und Finanzwesen, Materialbuchungen usw. sondern auch im technisch-wissenschaftlichen Bereich Anwendungen finden, werden sie für raumbezogene Datenhaltungen nur langsam angenommen. Das mag zum einen daran liegen, daß in erster Linie graphische Informationen zu verwalten sind im Gegensatz zu den alphanumerischen Daten in kommerziellen Anwendungen. Zum anderen war die Handhabung der bisher angebotenen Systeme sehr schwerfällig und von daher ihr Gebrauch in technischen Anwendungen wenig nützlich (D.J. Rudolf, 1988).

In der jüngsten Zeit ist jedoch ein Wandel zu verzeichnen. So erfreut sich besonders das relationale Modell – die Darstellung der Daten in zweidimensionalen Tabellen – großer Beliebtheit. Gängige Systeme wie INGRES, ORACLE, INFORMIX, INVOIS-86 oder EMPRESS sind neuerdings auch auf Mikrorechnern lauffähig.

Dennoch ist festzustellen, daß in der raumbezogenen Datenhaltung Datenbanksysteme dominieren, die für den jeweiligen Anwendungsfall maßgeschneidert wurden, da es an einer umfassenden theoretischen Darstellung von Datenmodellen noch fehlt. Um jedoch die seitens der Informatik angebotenen Datenbankstrukturen zu nutzen – die vielleicht entsprechend den Anforderungen einer raumbezogenen Datenhaltung reorganisiert bzw. erweitert werden müssen – sollen im folgenden die Grundkonzepte von Datenbanken dargelegt werden.

2.4.1 Listenstrukturen

Bei der niederen Datenorganisation – auch physikalische Speicherung genannt – können die Daten durch sequentielle Dateien, index-sequentielle Dateien, im direkten Zugriff und in der Form von Listen organisiert und abgespeichert werden. Da Listenstrukturen in der raumbezogenen Datenhaltung überwiegen, sind diese nachfolgend näher erläutert. Dabei handelt es sich um *einfache Listen*, in denen die Daten sequentiell Zeile für Zeile gespeichert sind, um *geordnete Listen*, bei denen die Reihenfolge der Datenzeilen bestimmten Ordnungsprinzipien unterliegt, und um *indizierte Listen*, die noch zusätzliche Indexregister (inverse Listen) bereitstellen.

1. Die *einfachen Listen* stellen die einfachste Form einer Datenbasis dar. Sobald ein neues Element zu integrieren ist, wird dieses an das Ende der Liste gesetzt. Es ist natürlich einfach Daten hinzuzufügen, doch wird für die Suche nach einer Datenzeile zuviel Zeit benötigt, da bei n Elementen etwa $(n + 1)/2$ Suchoperationen benötigt werden, um ein entsprechendes Element ausfindig zu machen.
2. Die *geordneten Listen* können nach bestimmten Kriterien geordnet werden, wie z. B. x -, bzw. y - bzw. z -Koordinate in aufsteigender Reihenfolge oder aber alphanumerische Daten sind hinsichtlich des Alphabets zu ordnen. Der Zugriff auf geordnete Listen ist sehr viel schneller; bei n Elementen werden ca. $\log_2(n + 1)$ Suchoperationen benötigt. Nachteilig dabei ist jedoch, daß für einzufügende Elemente innerhalb der Liste Platz zu schaffen ist.
3. *Indizierte Listen* erlauben ebenso einen schnellen Zugriff. Eine indizierte Liste ist mit einem Sachbuch zu vergleichen, bei dem der Informationszugriff durch ein Indexregister ermöglicht wird. Dabei ist die eigentliche Information in einer *direkten* Liste und der Index in einer *inversen* Liste abzulegen. Bezeichnet n_1 die Anzahl der Zeilen des Indexregisters, und n_2 die Anzahl der Zeilen eines Datenblocks in der direkten Liste, so beträgt die Anzahl der Suchoperationen ca. $(n_1 + 1)/2 + (n_2 + 1)/2$ (P.A. Burrough, 1986). Umständlich ist bei indizierten Listen jedoch das Einfügen und das Löschen von Informationen, da nicht nur die direkte Liste, sondern auch die inverse Liste korrigiert werden muß. Mit indizierten Listen läßt sich ebenso eine Trennung von Metrik und Topologie durchführen. Für die in 2.3.3.4 gegebene Organisation nach Dreieckskanten (topologische Information) können bei einem Index nach Eckpunkten geordnet auch die Koordinaten untergebracht werden. Dabei ist jedoch auch die Umkehrung denkbar, indem die Eckpunkte samt Koordinaten die direkte Liste und die Topologie die inverse Liste darstellen.

Wird das in Abb. 2.13 dargelegte Beispiel einmal als direkte Liste betrachtet, so lautet seine zugehörige inverse Liste (Abb. 2.24)

Eckpunkt	Koordinaten			Kanten
	x	y	z	
201	-8.94	40.06	45.02	a, c, e, i, n
202	30.82	29.74	48.74	a, b
203	31.07	-21.44	51.21	b, c, d, f
204	-28.35	-19.78	52.05	d, e, g, h, k
205	-38.70	-21.05	60.18	h, i, l, m
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

Abb. 2.24: Aufbau einer inversen Liste

Die Grundgesamtheit aller Listen in einer raumbezogenen Datenhaltung bedarf einer höheren Organisationsstruktur, wo gleichzeitig Hilfsprogramme zur Verfügung gestellt werden, die vor Systemzusammenbrüchen, Inkonsistenzen in der Datenhaltung, Verfälschungen u.v.m. schützen. Diese höhere Organisationsform ist durch Datenbankstrukturen gegeben, auf die näher einzugehen ist.

2.4.2 Datenbankmodelle

Bei dem Aufbau von Datenbanken für RIS bedient man sich mehr und mehr den Richtlinien der Informatik. Das bedeutet, daß einige wichtige Forderungen eingehalten werden müssen wie (J. Niedereichholz, 1983)

1. Redundanzfreiheit der Daten
2. Vielfachzugriff
3. Batch- und Interaktiver Betrieb

4. Strukturflexibilität
5. Antwortzeitverhalten
6. Sicherheit

Diese Vorgaben sind nur mit einer umfangreichen Hilfsprogrammsammlung – dem Datenbankenverwaltungssystem – zu gewährleisten. Dadurch ergibt sich der in der Abb. 2.23 dargestellte Aufbau einer raumbezogenen Datenbank, in dem mehrere Datenbanken, die unterschiedliche Datensätze beinhalten, von dem Datenbankenverwaltungssystem angesprochen werden.

Für die Struktur der Datenbanken stehen vier unterschiedliche Modelle zur Verfügung (C.J. Date, 1986)

1. das hierarchische Modell
2. das Netzwerk-Modell
3. das relationale Modell
4. das objektorientierte (topologische) Modell

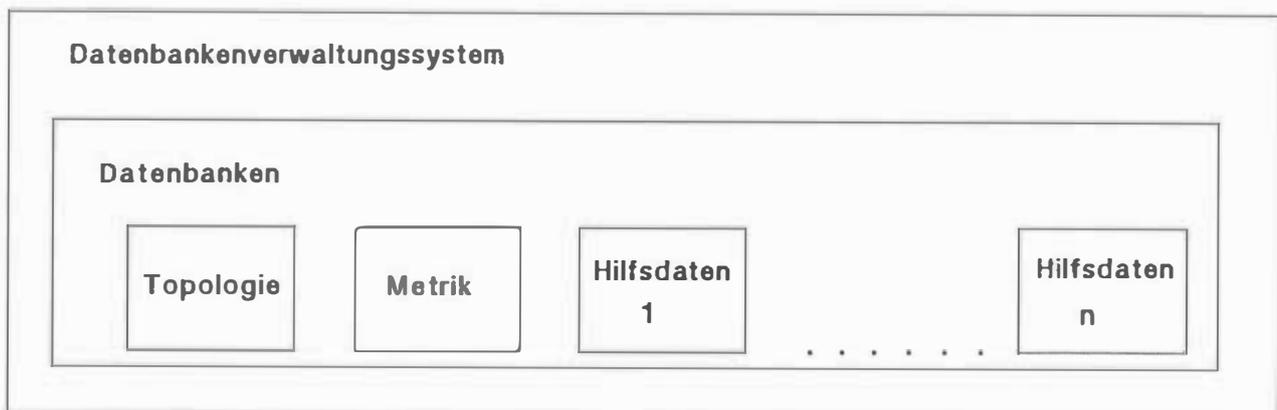


Abb. 2.25: Aufbau einer raumbezogenen Datenhaltung

2.4.2.1 Hierarchisches Modell Hierarchische Datenbanksysteme sind sehr einfach zu verstehen. Hierarchisch bedeutet dabei, daß die Beziehungen zwischen den Daten nur von der Größenordnung $1 : m$ sein können. Wird mit m die Anzahl der "Kinder" bezeichnet, so erlaubt diese eins – zu – viele Beziehung jedem Kind lediglich ein Elternteil. Dadurch ist die Struktur von vorneherein stark eingengt und impliziert die Kenntnis aller möglichen auftretenden Beziehungen zwischen den Daten. In einer raumbezogenen Datenhaltung ist dieses Modell für die Verwaltung von Flächenmodellen "Raster" sehr gut geeignet, da hier diese Voraussetzungen erfüllt sind.

Als Beispiel sei die in der Abb. 2.15 dargestellte Quadtree-Struktur als hierarchisches Modell betrachtet (siehe Abb. 2.26).

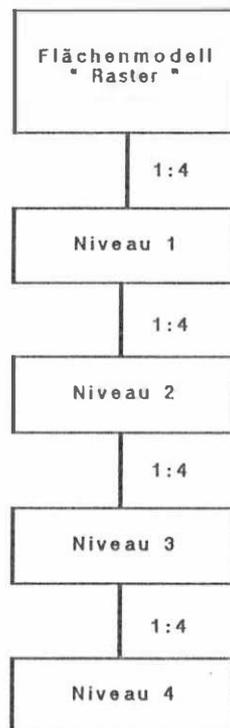


Abb. 2.26: Die Quadtree – Struktur als hierarchisches Modell

Die Datenerfassung, -änderung und -speicherung im hierarchischen Modell ist sehr einfach zu handhaben. Der Zugriff auf die Datensätze kann dabei durch Schlüsselattribute erfolgen. Während auf der Basis von Quadtree-Zerlegungen Flächenmodelle "Raster" noch redundanzarm abzuspeichern sind, ist dies bei der Speicherung von Triangulationen und weiterer unregelmäßig gegebenen Lageinformationen nicht mehr gewährleistet.

Außerdem können sich die inversen Listen, über welche die hierarchischen Beziehungen verwaltet werden, sehr stark aufblähen. In der Abb. 2.27 wird die Datenstruktur des hierarchischen Modells am Beispiel des einfachen Flächenobjekts a) erläutert (vgl. P.A. Burrough, 1986)

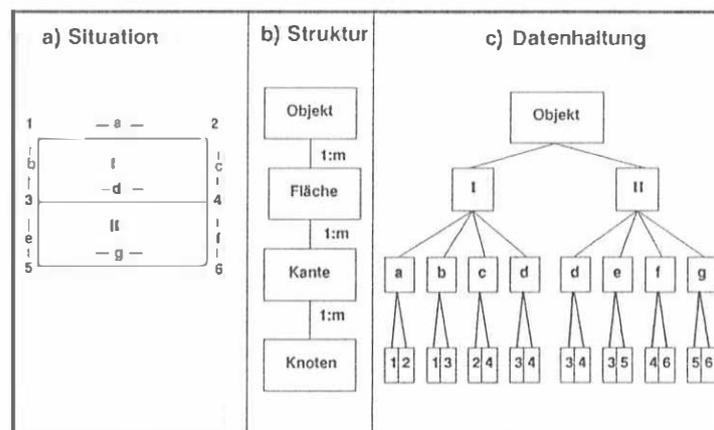


Abb. 2.27: Hierarchisches Modell

2.4.2.2 Netzwerkmodell Das Netzwerkmodell ist eine Erweiterung des hierarchischen Modells, indem neben den $1 : m$ Beziehungen nun auch $m : 1$, $1 : m$ und $m : n$ Beziehungen zugelassen werden. Sind im Netzwerk nur $1 : m$ Beziehungen zugelassen, so ergibt sich als Spezialfall das hierarchische Modell. Ein Kind kann im Netzwerk mehrere Eltern haben und die Eltern können gleichzeitig mehrere Kinder haben. Der große Vorteil des Netzwerks liegt in seiner Redundanzfreiheit und seiner Flexibilität. Die Abb. 2.28 zeigt das einfache Flächenobjekt als Netzwerk und läßt den Unterschied in der Datenhaltung erkennen. Netzwerkmodelle

finden sich häufig in der raumbezogenen Datenhaltung (K. Fischer, 1982, P.A. Burrough, 1986, G. Mittelstraß, 1987); eine zusätzliche Verzeigerung zur Verdeutlichung der graphischen Laufrichtung sorgt für einen schnellen Bildschirmaufbau der graphischen Informationen. Dem guten Antwortzeitverhalten, das gerade im interaktiven Betrieb wichtig ist, steht die erschwerte Fortführung der Daten gegenüber, da die Verzeigerungen gleichfalls fortgeführt werden müssen. Aus diesem Grund ist das Netzwerkmodell für raumbezogene Daten geeignet, die wenig Dynamik besitzen.

Die datentechnische Realisierung eines Netzwerks ergibt sich direkt durch den Aufbau von index-sequentiellen Listen in Ringstruktur. Für die Situationsdarstellung a) können die folgenden Listen aufgebaut werden (siehe Abb. 2.29)

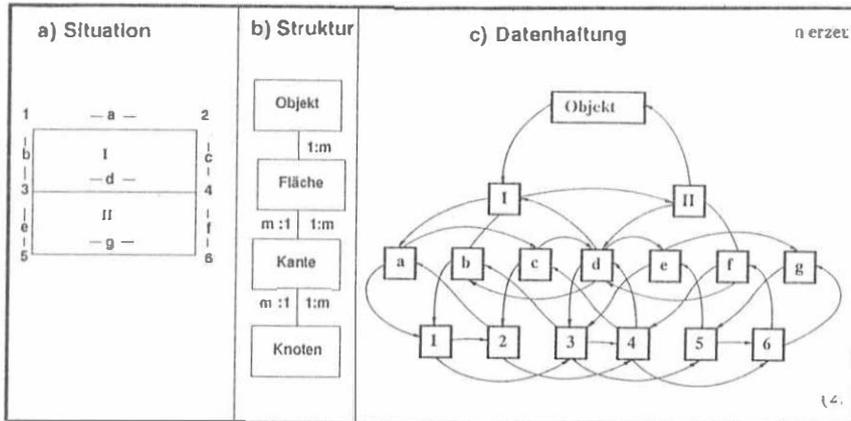


Abb. 2.28: Netzwerkmodell

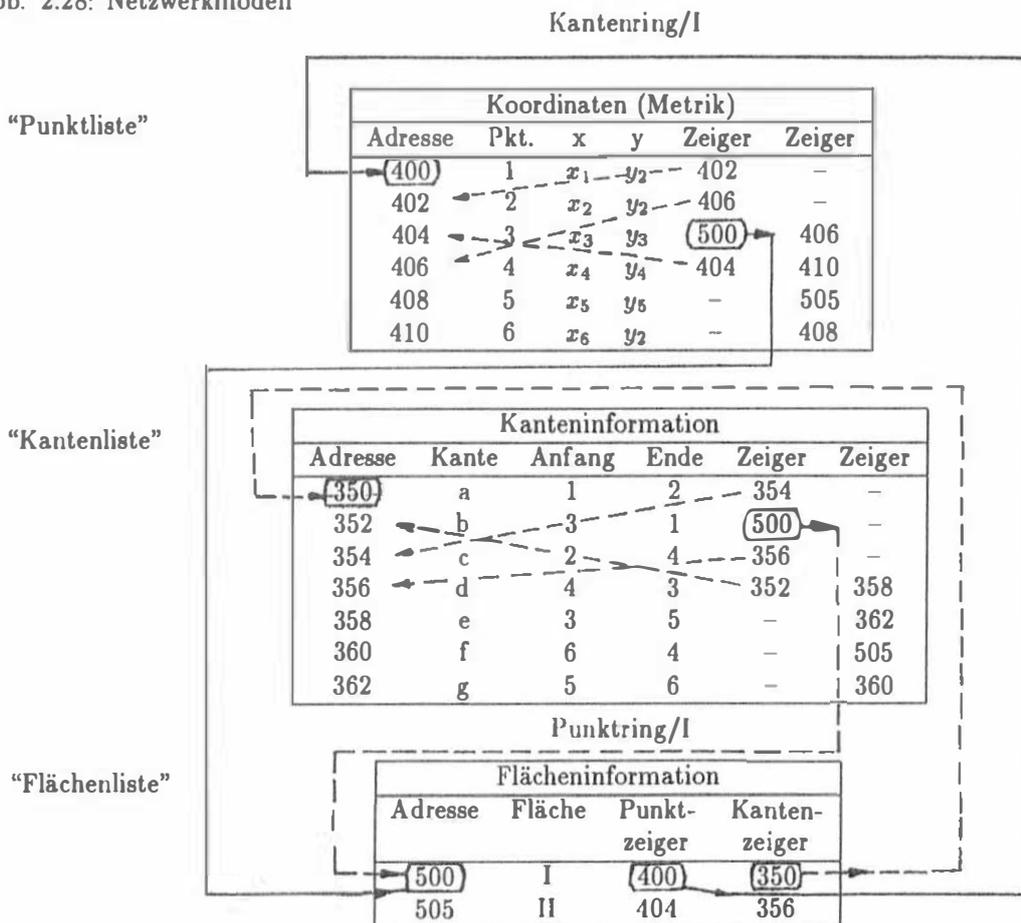


Abb. 2.29: Index-sequentielle Listen in Ringstruktur

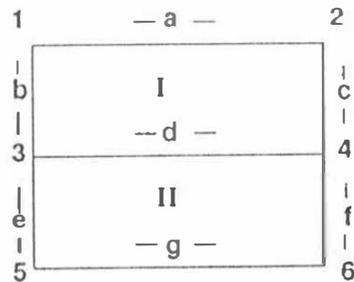
Dabei sind die Zeiger spaltenweise abzuarbeiten, so daß nacheinander die Situationselemente aufgebaut werden können.

2.4.2.3 Relationales Modell Das relationale Datenmodell verfolgt eine sehr einfache Struktur: Ein Satztyp soll keine Hierarchie enthalten. Dabei werden Tabellen (Matrizen) aufgebaut, der Spalten über die Spaltennamen – als *Domänen* bezeichnet – und deren Zeilen über die Zeilennamen bzw. Zeilennummern zu erreichen sind. Die Zeilennamen werden auch *Tupel* genannt.

Dieses Modell wurde erstmals von E.F. Codd (1970) vorgestellt. Seit dieser Zeit hat es beträchtliche Erweiterungen erfahren, so daß es auch in der raumbezogenen Datenhaltung angewendet wird (G. Moon/D. Skiba, 1986, J.P. Göllner, 1987, W. Bühler et al., 1988). Während neuere Systementwicklungen vollständig relational orientiert sind, gibt es auch Kombinationen zwischen Netzwerken und relationalen Modellen (K. Fischer, 1983, ESRI, 1988).

Die Verteilung der Daten innerhalb der raumbezogenen Datenhaltung erfolgt so, daß die Redundanz so weit wie möglich reduziert wird, welches mit hierarchischen oder netzwerkartigen Tabellen erreicht werden kann. Somit scheinen Ähnlichkeiten mit den zuvor existierenden Datenbankstrukturen zu bestehen. Ein Vergleich zeigt jedoch, daß die Verknüpfung der Tabellen im relationalen Modell über die gespeicherten Werte entsteht, während in den vorangegangenen Strukturen eine Beziehung durch Verweise (Zeiger) auf ein bestimmtes Element gegeben ist. Da die Werte extra abzulegen sind, ergibt sich zwangsläufig eine größere Redundanz des Datenbanksystems. In der Abb. 2.30 ist das einfache Flächenmodell relational abgespeichert. Jedoch sei darauf hingewiesen, daß es sich bei diesen Tabellen um keine Normierungen im Sinne von E.F. Codd (1970) handelt.

a) Situation



b) Datenspeicherung

Punkt-Nr.	Koordinaten	Kanten
1	x_1, y_1, z_1	a, b
2	x_2, y_2, z_2	a, c
3	x_3, y_3, z_3	b, d, c
4	x_4, y_4, z_4	c, d, f
5	x_5, y_5, z_5	e, g
6	x_6, y_6, z_6	f, g

“0-Tabelle” (Punkte)

Kante	Anf. Pkt.	End-Pkt.	Fläche links	Fläche rechts ...
a	1	2	0	1
b	1	3	1	0
c	2	4	0	1
d	3	4	1	2
e	3	5	2	0
f	4	6	0	2
g	5	6	2	0

“1-Tabelle” (Linien)

Fläche	Flächen-Nr. (ID)	Kanten
1	I	a, b, c, d
2	II	d, e, f, g

“2-Tabelle” (Flächen)

Objekt	Objekt-Name	Kanten
1	Beispiel	a, b, e, g, f, c

“Objekt-Tabelle”

Abb. 2.30: Relationales Modell

Die Verbindung von Graphik-Tabellen mit Nichtgraphik-Tabellen ist durch Identifikatoren (ID) zu gewährleisten. Als Nichtgraphik-Informationen seien die folgenden Beschreibungen gegeben

Flächen Nr. (ID)	Größe	Eigentümer
I	350m ²	Hans Müller, xStadt
II	376m ²	Otto Schmidt, yStadt

die nun über die Flächen-Nummer als Identifikator mit der Graphik verknüpft werden können.

Der große Vorteil einer relationalen Datenbank ist der, daß es keine fest vorgegebenen Hierarchien gibt. Der Benutzer gibt durch Befehle einer eigens hierfür bereitgestellten Abfragesprache (Structured Query Language) an, auf welche Datenuntermengen zugegriffen werden soll. Da diese Mengen in der Regel nicht im gewünschten Format gespeichert sind, werden mit den Methoden der relationalen Algebra neue Tabellen erzeugt, deren Formate dem Wunsch des Benutzers entsprechen. Ein weiterer Vorteil des relationalen Modells ist seine einfache Fortführung.

Dementgegen stehen jedoch viele Operationen, um zur gesuchten Information zu gelangen. Die Antwortzeiten lassen sich verbessern, indem inverse Listen (Indexdateien) die Suchvorgänge beschleunigen helfen.

2.4.2.4 Objektorientierte Modelle Objektorientierte Datenbankmodelle befinden sich gerade in der Entwicklung. Diese basieren auf dem sogenannten "objektorientierten Programmieren" (B.J. Cox, 1986, H. Güntsch, 1988a, S. Alagić, 1989), für das z. B. die Programmiersprachen "Smalltalk" (H.J. Hoffmann, 1987) und "Modula" (S. Alagić) eingesetzt werden können. Es gibt leider noch keine allgemein anerkannte Definition für die Objektorientierung in Datenbanken (H.J. Schek, 1988); dennoch sind bereits gemeinsame Merkmale vorhanden. Das Ziel ist dabei die stärkere Berücksichtigung von Operationen und Funktionen auf Datenbankobjekten und weniger deren (topologische) Struktur.

Unter "objektorientiert" werden aber auch einfache Superimpositions-Techniken und Klassifikationen der Graphik nach Objektschlüsselkatalogen (z. B. OSKA der AdV) verstanden, die im folgenden als "objektorientiertes Management" aufgeführt sind. Eigentlich handelt es sich dabei lediglich um ein *objektweises* Vorgehen.

Objektorientiertes Management Bei dem objektorientierten Management wird die Randbeschreibung vermittels Flächenmodellen durch eine abgestufte Hierarchie ergänzt: Objektklasse, Objekt und Objektteil, die der Topologie des entsprechenden Modells "aufgesetzt" wird (siehe Abb. 2.31).

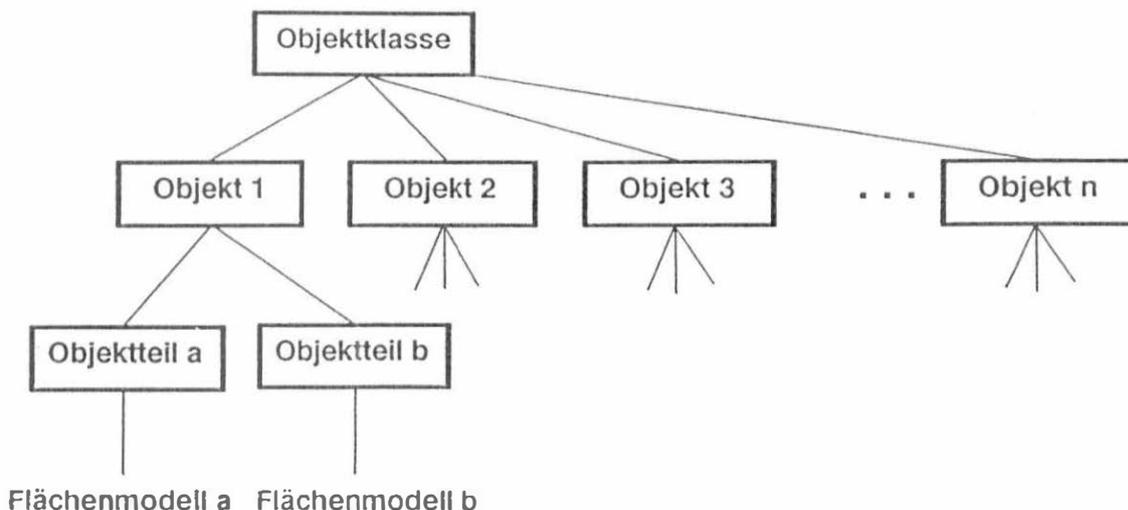


Abb. 2.31: Objektorientiertes Management

So kann die Objektklasse der Grundstücke ein Grundstück enthalten, das sich aus verschiedenen Flurstücken zusammensetzt oder aber ein Gebäude stellt sich als die Vereinigung von Wohnhaus mit Garage dar. Ein weiteres Beispiel ist die 3D-Beschreibung einer sehr großen zusammenhängenden Fläche, für die zur umfassenden Beschreibung das Rand-(Grenz)polygone durch eine Dreiecksvermaschung zu ergänzen ist.

Auf der Basis des objektorientierten Managements sind in jüngster Zeit einige RIS entstanden, über die in B. Späni/N. Bartelme (1988), W. Bühler et al. (1988), K. Menke (1989) und J.R. Herring (1989) berichtet wird. Dabei werden jedoch die zuvor zitierten Datenbankmodelle eingesetzt, deren Merkmale in der Tabelle 2.1 zusammengefaßt sind.

Tabelle 2.1: Merkmale unterschiedlicher Datenbankstrukturen

Modell	Redundanz	Zugriff	Flexibilität	Fortführung
Hierarchisch	hoch	schnell	keine	einfach
Netzwerk	keine	schnell	hoch	aufwendig
Relational	hoch	langsam	sehr hoch	einfach

3 Praktischer Teil

3.1 Allgemeine Betrachtungen über raumbezogene Informationssysteme

3.1.1 Definitionen

Mit der bereits in der Einleitung aufgezeigten Vielfalt von Informationssystemen (IS) innerhalb der BRD stellt sich gleich zu Beginn des praktischen Teils die generelle Frage nach der Definition eines Informationssystems. Dazu wird die von R. Conzett (1980), der Pionierarbeit im Bereich der Landinformationssysteme leistete, wiedergegeben: "Beschränkt sich die Funktion eines Systems auf die Aufnahme, Verarbeitung, Speicherung und Wiedergabe von Informationen, so nennen wir es Informationssystem. Ein Informationssystem besteht somit aus der Gesamtheit der Daten und der Verarbeitungsanweisungen. Es soll dem Benutzer ermöglichen, daraus ableitbare Informationen in einer verständlichen Form zu erhalten."

Somit ist ein Informationssystem in seiner einfachsten Form ein Frage-Antwort-System (siehe Abb. 3.1).

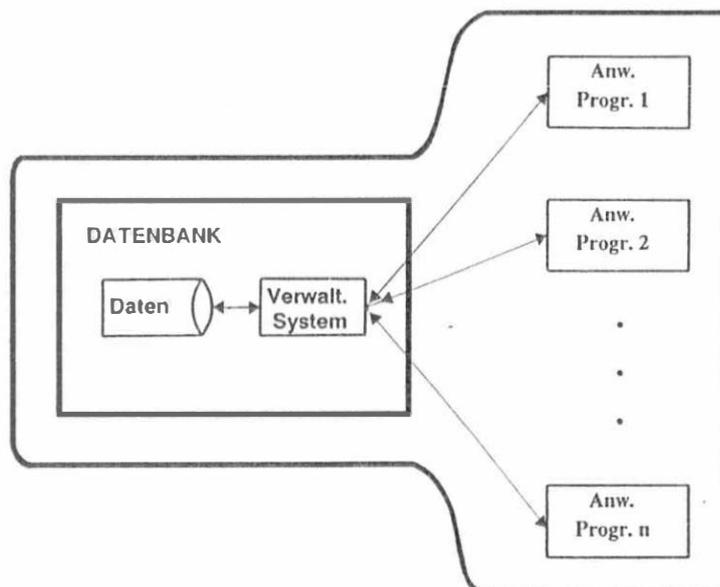


Abb. 3.1: Informationssystem als Frage-Antwort-System

Da sich hier in dieser Arbeit – wie in der Einleitung erwähnt – ausschließlich mit Informationssystemen auseinandergesetzt wird, die vermittle der *elektronischen Datenverarbeitung* (EDV) aufgebaut und vorgehalten werden, sind weitere Definitionen aufzuzeigen, die zumindest für das Vermessungswesen noch Gültigkeit besitzen. So lautet die fast schon klassische Definition des Landinformationssystems aus dem Jahre 1974 (FIG-Commission 5, 1974):

“Ein Landinformationssystem dient zur systematischen Erfassung, Speicherung, Verarbeitung und Darstellung aller auf den Grund und Boden bezogenen und ihn kennzeichnenden Daten als Grundlage für Recht, Verwaltung und Wirtschaft und als Hilfe für Planungs- und Entwicklungsmaßnahmen”.

Während mit dieser Definition lediglich ein zweckgerichtetes Informationssystem – nämlich das Landinformationssystem – näher umschrieben wird, soll eine weitere Definition, die mit der Resolution Nr. 301 auf dem 16. FIG Kongreß in Montreux, Schweiz, gegeben wurde, aufgezeigt werden.

“Ein Landinformationssystem ist ein Instrument, um Entscheidungen in Recht, Verwaltung und Wirtschaft zu treffen, sowie ein Hilfsmittel für Planung und Entwicklung. Es besteht aus einer Datensammlung einer bestimmten Region, welche sich auf den Grund und Boden bezieht, und andererseits aus Verfahren und Methoden für die systematische Erfassung, Aktualisierung, Verarbeitung und Verbreitung dieser Daten. Die Grundlage eines Landinformationssystems bildet ein einheitliches, räumliches Bezugssystem für die gespeicherten Daten, welches auch eine Verknüpfung der im System gespeicherten Daten erleichtert.”

Diese Definition zeigt bereits an, daß ein LIS neben seinen wesentlichen Komponenten – dem Liegenschaftskataster und dem Grundbruch – auch weitere Informationen wie Topographie, Luft- und Satellitenbilder sowie Informationen aus Umwelt- und Rauminformationssystemen enthalten kann. Somit lassen sich in erweitertem Sinne raumbezogene Informationssysteme definieren, die “alle raumbezogenen Daten der Erdoberfläche, der Lithosphäre und Atmosphäre bis zu den fachthematischen Sachverhalten der Wirtschafts- und Sozialgeographie enthalten” (W. Göpfert, 1987).

Dabei dienen die raumbezogenen Daten der Beschreibung geometrischer Objekte bezüglich ihrer Position in übergeordneten Koordinatensystemen, ihrer Attribute, die als alphanumerische Beschreibungen der Objekte aufzufassen sind, und ihren räumlichen Nachbarschaftsbeziehungen zu anderen Objekten (Topologie).

3.1.2 Aufbau eines raumbezogenen Informationssystems

Aufbauend auf dem in Abb. 3.1 dargestellten Informationssystem handelt es sich bei einem raumbezogenen Informationssystem um ein sehr komplexes Datenverarbeitungssystem, das sich im wesentlichen in vier Hauptbestandteile gliedert. Diese Komponenten sind die Benutzer-Schnittstelle, die Rechnerbestandteile und Rechnerleistung (Hardware), die Datenorganisation mit den Anwendungsprogrammen (Software) und die Daten (siehe Abb. 3.2) – man spricht auch von einem *Vierkomponenten-Modell*.

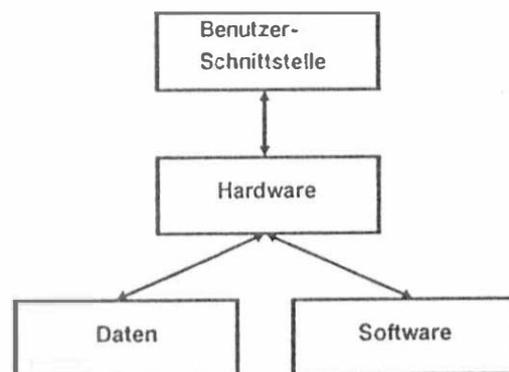


Abb. 3.2: Komponenten eines raumbezogenen Informationssystems

Die Entwicklung und Leistungsfähigkeit eines RIS ist direkt an den technologischen Fortschritt innerhalb der Computerhardware und der Methoden gebunden. Innerhalb der Hardwarebereitstellung sind kaum mehr Einschränkungen gegeben. Während die Host-Prozessorleitung durch RISC-Architekturen (Reduced Instruction Set Computer) immer leistungsfähiger wird, findet sie weitere Unterstützung durch Satellitenprozessoren (Vektorrechner, Transputer). Zur Datenspeicherung dienen Medien von hoher Datendichte in Winchester- oder Lasertechnologie (optische Platten). Weitere periphere Bestandteile sind hochauflösende graphische Bildschirme sowie Ein- und Ausgabegeräte in der Form von Scannern, Digitalisiertablets, Stift- und Rasterplotter und Bildschirmskopierer.

Daher ist das Hauptaugenmerk innerhalb der Weiterentwicklung von RIS der Weiterentwicklung von RIS der Datenorganisation und -manipulation (Software) zuzuwenden. Die Software gliedert sich im wesentlichen in die fünf Module: Dateneingabe, Abfragen, Antworten, Datenbank mit -verwaltungssystem und der Methodenbank, in der Algorithmen zur Datenmanipulation in kodierter Form zur Verfügung stehen. Innerhalb der Dateneingabe ist die Datenqualität zu überprüfen, so daß hier ein *Dateneditor* zur Verfügung stehen sollte. Bei der Architektur der Datenbank ist grundsätzlich in drei Ebenen zu unterscheiden (C.J. Date, 1986):

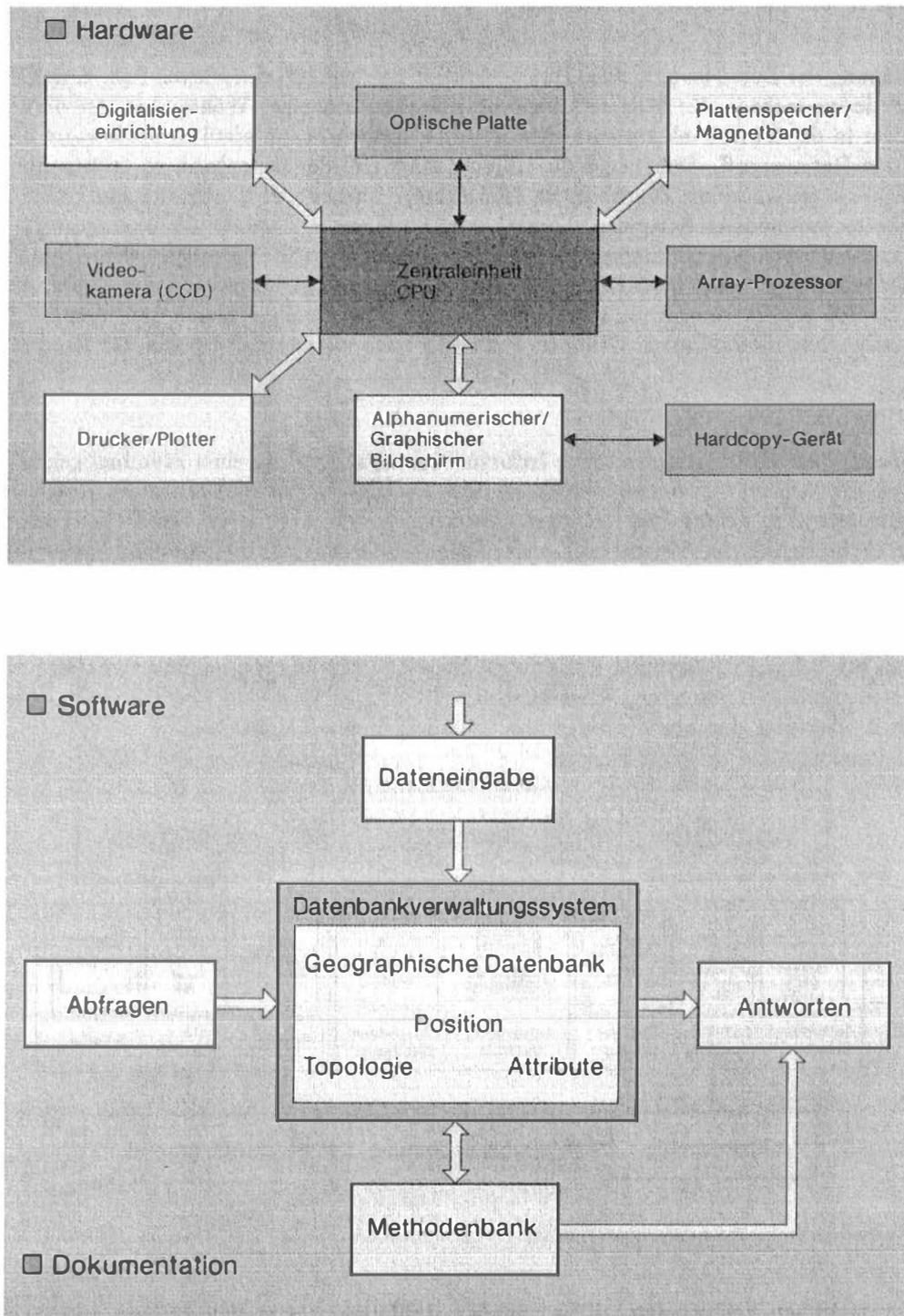


Abb. 3.3: Aufbau eines raumbezogenen Informationssystems

- die interne Ebene, die der physikalischen Datenspeicherung am nächsten liegt, d. h. hier ist die Art der tatsächlichen Datenspeicherung festgelegt (z. B.: direkter Zugriff (direct access))
- die externe Ebene, die dem Anwender des RIS am nächsten liegt, d. h. hier ist vorgegeben, wie die Datenvisualisierung und der Umgang mit der DB erfolgen soll (z. B.: Verwendung Rasterbildschirm)
- die konzeptionelle Ebene, in der Datenstrukturen sowie Datenbankmodelle festgelegt werden, und die somit zwischen der internen und externen Ebene liegt (z. B.: Randbeschreibung vermittelt Flächenmodelle organisiert in einer relationalen Datenbank)

Bei der Handhabung der Daten ist sich einer Datendefinitionssprache (im einfachsten Fall: z. B. OSKA) und der Datenmanipulationssprache (z. B.: SQL, relationale Algebra) zu bedienen. Während erstere die Definition oder Beschreibung der in der Datenbank gespeicherten Objekte ermöglicht, unterstützt die letztere die Datenmanipulation und den Datenzugriff. Dabei sind die Objekte innerhalb der Datenbank zu ordnen hinsichtlich ihrer Geometrie und ihrer semantischen Beschreibung (Attribute). Ebenso von Bedeutung sind dabei Schnittstellen zur Kommunikation mit anderen Systemen. Vielfach wird – wie mit R. Conzett (1980) aufgezeigt – die Software für sich als raumbezogenes Informationssystem bezeichnet, die auf verschiedenen Hardware-Umgebungen implementiert werden kann (vgl. Abb. 3.3). Doch nicht nur die amtlichen Informationssysteme sind auf Portabilität ausgerichtet; ebenso gibt es kommerzielle Anbieter von RIS, insbesondere kleine und mittlere Unternehmen. Im folgenden soll – aus methodischen Gründen – ein RIS auch als unabhängig von der Hardware betrachtet werden.

3.1.2.1 Datentypen und raumbezogene Informationssysteme In einer raumbezogenen Datenhaltung ist als erstes zu differenzieren zwischen *Geometrie-* und *Sachdaten*. Ferner können die Daten der Geometrie weiter unterteilt werden in *Vektordaten* und *Rasterdaten* (siehe Abb. 3.4). Diese drei Datentypen unterscheiden sich in der Datengewinnung, der Datenstruktur, der Datenspeicherung, der Datenmanipulation und auch in der Datenausgabe.

Während innerhalb der Vektordaten Objekte durch objektorientiertes Management klar beschrieben werden können (M. Molenaar, 1989), liegen für Rasterdaten noch keine allgemein gültigen Regeln zur Objektdefinition vor. So können für Vektordaten explizit Beziehungen zwischen Flächen, Linien und Punkten jeweils untereinander als auch in gemischter Form angegeben werden z. B. zwei Flächen sind Nachbarn oder Fläche 1 liegt als Insel in Fläche 2 oder aber eine Linie (Fluß) endet (mündet) in eine Fläche (See).

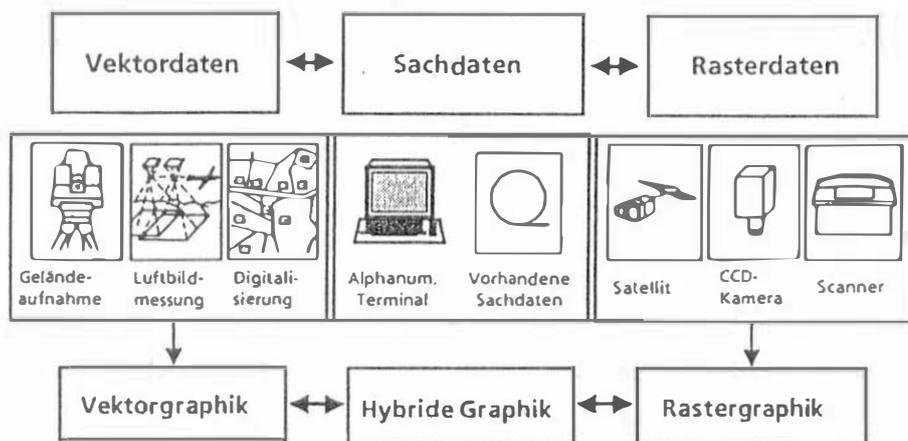


Abb. 3.4: Unterschiedliche raumbezogene Daten

Die Kombination von Vektordaten mit Sachdaten (Attributen) hat zu den *vektororientierten* RIS geführt, die überwiegend im großmaßstäblichen Bereich eingesetzt werden, wohingegen Rasterdaten mit Sachdaten die *rasterorientierten* Informationssysteme bilden. Diese befinden sich gerade erst in der Konzeption und sollen überwiegend zu Problemstellungen (im mittleren und kleinen Maßstab) herangezogen werden. Jedoch lassen sich auch Anwendungen beispielsweise in der Landwirtschaft und Bodenkunde angeben, wo diese Systeme ebenso vorteilhaft eingesetzt werden können. Die Integration von Vektor-, Sach- und Rasterdaten führt zu hybriden graphischen Systemen (M. Schilcher/U. TheiBing, 1987, J. Kammerer et al., 1988, D. Fritsch, 1988, M. Schilcher/D. Fritsch, 1989), deren Anwendungen in allen drei Maßstabsbereichen zu suchen sind.

Die zuvor betrachteten Flächenmodelle "Raster", "Dreiecke" und "Hybrid" können sowohl als Vektor-, Sach- und Rasterdaten bezeichnet werden, je nachdem, wie ihre Organisation in den vektor- bzw. rasterorientierten Informationssystemen gelöst ist. Während in der vektororientierten Datenhaltung Flächenmodelle durch Attribute bzw. eigenständige Datenbasen vorzuhalten sind, können in rasterorientierten Systemen z. B. Geländeinformationen in der Form des "Gridings" – auch als thematische Raster bezeichnet – bereitgestellt werden (P. Riegger, 1989). Ebenso ist Geländeinformation, wenn sie z. B. im Rastermodus strukturiert wird, als reine Rasterdatenbasis zu verwalten. Die Verknüpfung von Geländeinformation sowohl zur Vektor – als auch zur Rastergraphik ist mit der Abb. 3.5 gegeben.

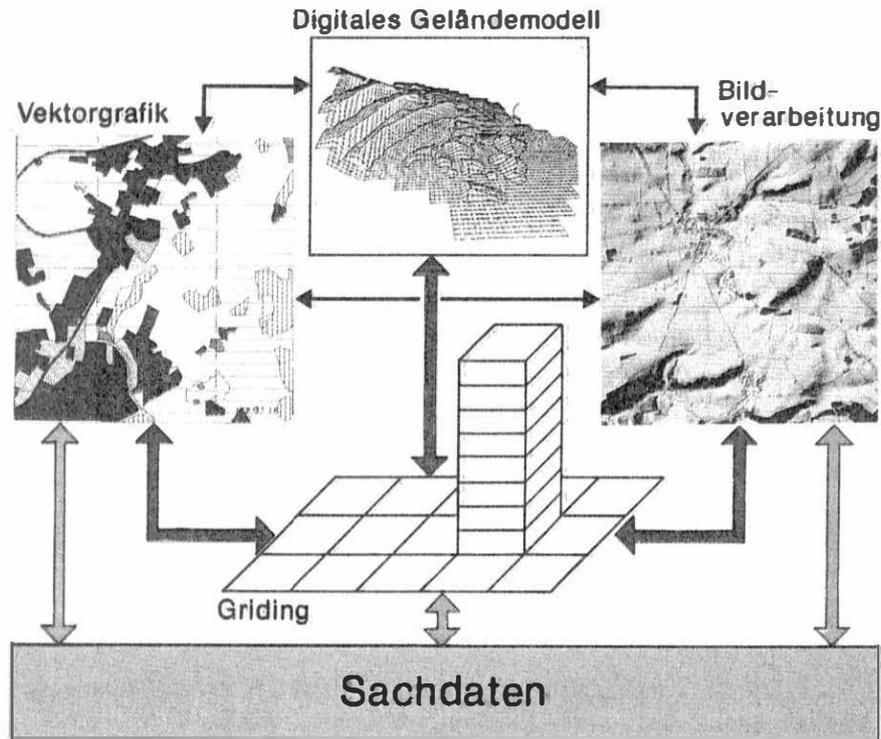


Abb. 3.5: Organisation von Geländeinformation

Unter Gridding wird dabei die Organisation von Geländeinformation in einem äquidistanten Raster verstanden, der sich jedoch in der Äquidistanz von einem bereits vorhandenen Flächenmodell "Raster" unterscheiden kann, und mit weiteren Attributen wie Bewuchs, Bodenart, Grundwasserspiegel usw. zu versehen ist. Das Gridding stellt somit einen thematischen Raster von beliebiger Tiefe dar, der mittels Interpolation Sachdaten für beliebige x , y -Positionen präzisieren kann.

3.1.2.2 Datentypen und Datenbanken Die Datenhaltung der zuvor erwähnten Datentypen kann durchaus in verschiedenen Datenbanken mit zugehörigen Datenbankenverwaltungssystemen erfolgen (siehe Abb. 3.6), die in ihrer Vereinigungsmenge die raumbezogene Datenbank (RDB) bilden.

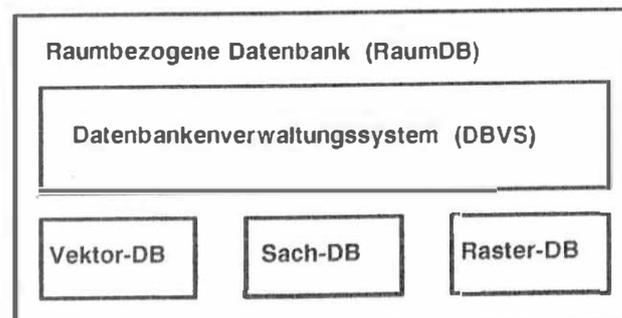


Abb. 3.6: Raumbezogene Datenbank

Während die Vektorgraphik häufig in Netzwerken organisiert ist (K. Fischer, 1982, C.B. Jones/I.M. Abraham, 1986, G. Mittelstraß, 1988), sind für die Sachdaten relationale Datenbanken eingerichtet worden (K. Fischer, 1983, M. Sittard, 1988, E. Wieser, 1988). Neuere Entwicklungen innerhalb der vektororientierten Informationssysteme propagieren ausschließlich relationale Datenbanksysteme (G. Moon/D. Skiba, 1986).

In der Rasterdatenverwaltung ist eine hierarchische Datenbank mit Quadtree-Prinzip sehr leistungsfähig (D.M. Mark/J.P. Lanzon, 1985); zudem kann mit dieser Datenverwaltung sogar eine Objektskelettierung herbeigeführt werden, wenn objektorientiert vorgegangen wird (D. Fritsch/M. Schilcher/H. Yang, 1988). Die Objektbildung erfolgt dabei mit klassifizierten Bilddaten, indem manuell oder aber rechnergestützt klassifiziert wird. Als Objektklassen ergeben sich: Straßen, Gewässer, Wohngebiete, Industriegebiete, Grünflächen, Agrikulturflächen, Sonstige etc.. Jede Objektklasse wird dann im Quadtree-Prinzip verwaltet und liefert auf der untersten Quadtree-Ebene die Skelettierung der Objekte.

3.1.2.3 Datentypen und Methodenbanken Die Methodenbanken sind als *Sammler* aller Anwendungsprogramme aufzufassen, um die Vektor-, Sach- und Rasterdaten im mengentheoretischen Sinn zu vereinigen, zu schneiden oder aber Differenzmengen abzuleiten. Sie sind als Systeme zur Datenkontrolle und -manipulation zu interpretieren, die sich grundsätzlich unterscheiden hinsichtlich der Vektor- und Rasterdaten (siehe Abb. 3.7)



Abb. 3.7: Raumbezogene Methodenbank

Das Methodenbankenverwaltungssystem enthält einen Katalog der zur Verfügungen stehenden Module, deren Methodik über Hilfsfunktionen dem Benutzer zugänglich gemacht werden kann. Darüberhinaus sind diese Module ebenso wie die Daten zu archivieren, d. h. Sicherungen vorzuhalten, um bei Systemzusammenbrüchen evtl. fehlerhafte Module einzuspielen.

Die Programmodule innerhalb der raumbezogenen Datenbank lassen sich im wesentlichen gliedern in Module zur

- a) Datenkontrolle und Datenfortführung
- b) Datenkonvertierung
- c) Datenkombination

Zu a) In der Qualitätskontrolle sowie Fortführung von raumbezogenen Daten ist es einerseits erforderlich, daß die Informationen aus den Datenbanken schnell zur Verfügung stehen und dann bearbeitet werden können, was im interaktiven Modus für Änderungen kleineren Umfangs zu bewerkstelligen ist. Dementgegen müssen jedoch auch Neuerfassungen in größerem Umfang möglich sein, wozu Programme zur Dateneingabe und Datenaufbereitung dienen.

Zu b) Die wesentliche Bedeutung der Datenkonvertierung ist in der Darstellung der Daten an verschiedenen Ausgabegeräten, die Übergabe an andere Informationssysteme und in der Konvertierung von Vektordaten nach Rasterdaten und umgekehrt zu sehen. Während in der Vektor/Rasterkonvertierung auf hardwaremäßig implementierte Algorithmen zurückgegriffen werden kann wie z. B. der Bresenham-Algorithmus (W.M. Newman/R.F. Sproull, 1986) ist die Raster/Vektorkonvertierung noch Gegenstand der Forschung (W. Lichtner/A. Illert, 1989, D. Fritsch, 1989). Ein großes Problem innerhalb der Raster/Vektorkonvertierung ist die Objektdefinition und Objektbeschreibung, wenn von ungeordneten Bilddaten ausgegangen wird. Hier ist in nächster Zeit noch einiges an Entwicklungsarbeit zu leisten. Des weiteren sind Module für Koordinatentransformationen der Vektordaten (zwischen GK-Koordinaten, UTM-Koordinaten, lokale Koordinaten), Bildverarbeitungsmodule

für Kontrastausgleich, Filterungen und Entzerrungen zur Verfügung zu stellen. Auch bei den Sachdaten sind Datenumwandlungen wie die Änderungen von Klassen nichtgeometrischer Eigenschaften möglich. Als Beispiel hierzu kann die qualitative Beschreibung von Bodenwertzahlen in den Klassen "sehr gut", "gut", "mittel" und "schlecht" aufgeführt werden.

Zu c) Unter Datenkombination ist die Superimposition der Vektor- und Rasterdaten aufzufassen. Es sind also Module zur Vereinigungsmenge, Schnittmenge und Differenzmenge einzusetzen. Während im vektororientierten Informationssystem dies ausschließlich vektorseitig erfolgt, sind in der hybriden Verarbeitung Datenkombinationen am günstigsten auf der Ebene der Rasterdatenverarbeitung durchzuführen.

3.1.3 Anforderungen an raumbezogene Informationssysteme

Gemäß den Definitionen sollen raumbezogene Informationssysteme in erster Linie zur Sicherung, Erhaltung und Verbesserung des Lebens- und Wirtschaftsraumes sowie zum Schutz von Grund und Boden dienen (K. Barwinski, 1983).

Vor allem ist es der Planungs- und Entwicklungsbereich, der sehr viele unterschiedliche Daten und Methoden benötigt. Ohne einen Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben, soll diese Mannigfaltigkeit zumindest der Daten (G. Eichhorn, 1980, K. Barwinski, 1988 und eigenen Ergänzungen) nachfolgend wiedergegeben werden (vgl. auch Abb. 1.4)

1. Vermessungswesen

- Kataster (Liegenschaftskarte, Liegenschaftsbuch)
- Landesvermessung (Lage- und Höhenfestpunktfeld, topographische Landesaufnahme)
- Kommunale Vermessung (Stadtgrundkarten, lokale Vermessungsgrundlagen)

2. Grundbuch

- (Bestandsverzeichnis, Eigentum, Lasten und Beschränkungen, finanzielle Belastungen)

3. Natürliche Ressourcen

- Geologie und Bodenschätze
- Wassermengen in ihrer zeitlichen Verteilung
- Tier- und Pflanzengemeinschaften
- Klima
- Naturschutz

4. Technische Anlagen

- Wohngebiete
- Industrie- und Energieanlagen
- Verkehrsanlagen
- Anlagen und Leitungen für die Ver- und Entsorgung

5. Auswirkungen von Industrie und Technik auf die Umwelt

- Lärm
- Schadstoffemission
- Schadstoffkonzentration in der Umwelt (Luft, Wasser, Boden)
- Krankheitsanzeichen der Umwelt (Pflanzenschäden, aussterbende Arten)

6. Wirtschaftliche und sozialpolitische Angaben

- Bevölkerung
- Arbeitsmöglichkeiten

- Verkehrssituation
- Kulturstätten (Ausbildung, Freizeit)
- Gesundheitswesen

Diese Datenvielfalt und die damit verbundenen großen Datenmengen belegen einmal mehr die Notwendigkeit der Aufteilung von raumbezogenen Informationssystemen. Daher ist eine verteilte Einrichtung von RIS unabdingbar, wie auch die praktische Realisierung gezeigt hat (vgl. Abb. 1.4). Jedoch können diese verteilten Einrichtungen nochmals untergliedert werden, d. h. es sind raumbezogene Subinformationssysteme einzurichten, die den Zielvorstellungen einer jeweiligen Aufgabengruppe nachzukommen haben. Wenn auch die Datenstrukturen vielfach dieselben sind, so differieren doch häufig die Methoden untereinander. So lässt sich im Vermessungswesen ein Landinformationssystem beispielsweise in die Subsysteme Kataster, Grundbuch, Topographie und Landesvermessung unterteilen (siehe Abb. 3.8), um nur einige aufzuzählen.

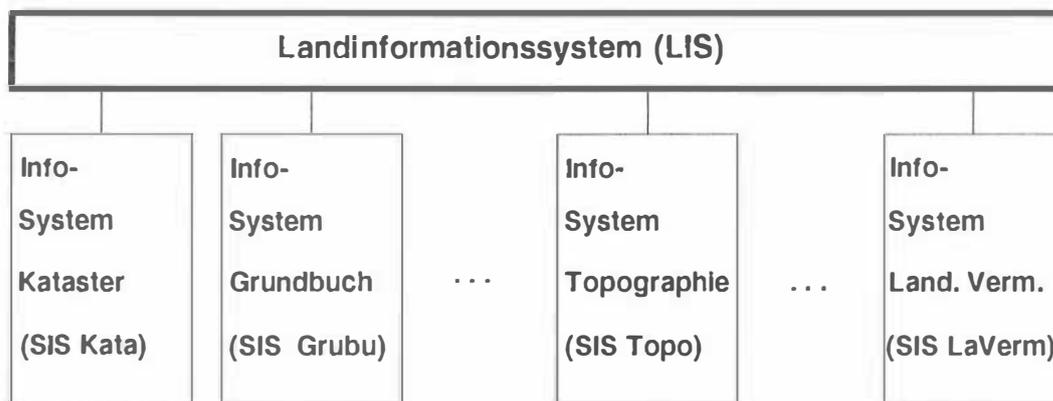


Abb. 3.8: Unterteilung eines Landinformationssystems

Auf diese Weise ergeben sich Baumstrukturen zumindest für LIS, UIS und RIS (GIS), worin jeder Astknoten ein Subinformationssystem repräsentiert (siehe Abb. 3.9).

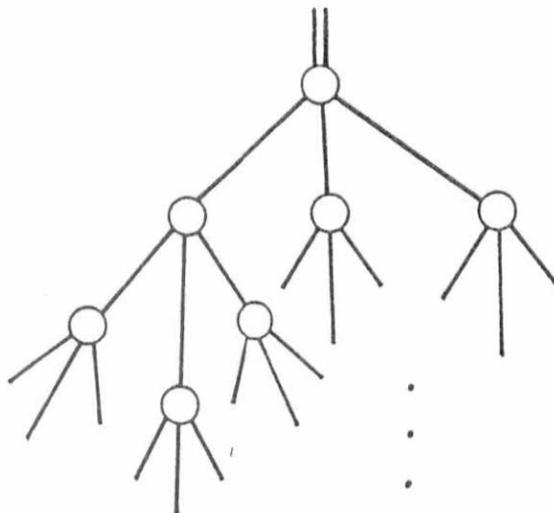


Abb. 3.9: Baumstruktur eines raumbezogenen Informationssystems

Somit ist das Hauptaugenmerk innerhalb der Fachbereiche auf eine Datenkonsistenz, d. h. einheitliche Datenintegrität wie Positionierung und Blattschnittfreiheit sowie auf den Datenaustausch zu richten. Während der Datenkonsistenz bereits bei der Einspielung der Daten in das jeweilige Informationssystem Rechnung zu tragen ist, müssen für den Austausch der Daten Schnittstellen definiert werden (G. Lothar, 1985, II. Sellge, 1987), die hardware- und softwareseitig zu realisieren sind. Damit ist eine fachspezifische raumbezogene Datenhaltung und Datenverarbeitung überschaubar und trotzdem flexibel.

3.1.4 Schnittstellen für raumbezogene Informationssysteme

Entsprechend den Softwarekomponenten eines raumbezogenen Informationssystems läßt sich dies schematisch in verschiedene Schichten unterteilen, die mehr oder weniger klar trennbar und von unterschiedlicher Mächtigkeit sein können. Für die Erweiterbarkeit und Integration eines RIS ist im wesentlichen die Struktur seiner Schichtränder in der Form von Schnittstellen relevant (siehe Abb. 3.10).

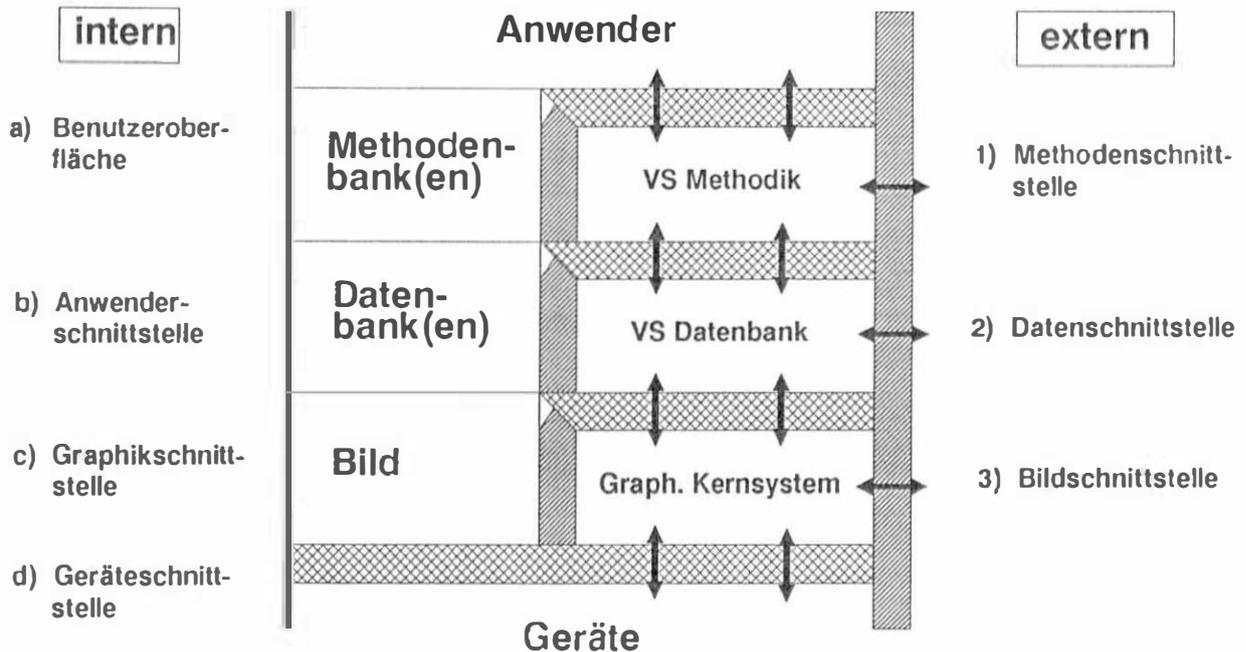


Abb. 3.10: Übersicht möglicher Schnittstellen

Die Schnittstellen können je nach Lage der Schichtränder in *interne* und *externe* Schnittstellen unterteilt werden. Während innerhalb des RIS interne Schnittstellen für eine reibungslose Kommunikation mit dem Anwender sorgen müssen, ist der Austausch von Methoden, Daten und Graphik nur über externe Schnittstellen möglich. Die externen Schnittstellen sind für die Integration eines Informationssystems in eine vorhandene DV-Umgebung wichtig. Im folgenden wird auf die internen und externen Schnittstellen näher eingegangen.

1. Interne Schnittstellen

- (a) **Benutzeroberfläche**
Diese Schnittstelle ist durch die Syntax und das Sprachvolumen der Kommandosprache sowie den Techniken für eine Menüdefinition und Makrobildung gegeben. Dadurch kann der Anwender die interaktive Kommunikation vorbereiten und sie hinsichtlich seiner Anforderungen optimieren.
- (b) **Anwenderschnittstelle**
Die Anwenderschnittstelle beinhaltet den Zugriff auf die raumbezogenen Daten. Damit ist die Verbindung von Methodik, die durch kodierte Algorithmen präsent ist, zur Datenhaltung gegeben.
- (c) **Graphikschnittstelle**
Die Graphikschnittstelle enthält die Abbildungsvorschriften zwischen Modell (Daten) und Bild (Zeichenroutinen) für die graphische Ein- und Ausgabe.
- (d) **Geräteschnittstelle**
Hier berühren sich die Hardware- und Softwarekomponenten.

2. Externe Schnittstellen

- (a) Die Methodenschnittstelle beinhaltet den Austausch oder auch Aufruf von kodierten Algorithmen, Informationen in definierter Form mit nachgeschalteten Programmsystemen. Dies impliziert jedoch eine "Offenheit" zwischen den kommunizierenden Informationssystemen.

- (b) Die Datenschnittstelle besteht aus der Definition eines Übertragungsmodells, welches mit entsprechenden Eingabe- und Ausgabefunktionen aus einer Datei gelesen bzw. in eine Datei geschrieben werden kann. Diese Schnittstelle ermöglicht den Austausch zwischen voneinander unabhängigen Systemen und setzt keine "Öffnung" des Informationssystems voraus.
- (c) Die Bildschnittstelle ist die Analogie zur Datenschnittstelle und dient der Visualisierung der Daten.

Somit läßt sich auf verschiedenen Ebenen eine Kommunikation Anwender/RIS und RIS (I)/RIS (J) durchführen.

3.1.5 Ebenen- oder Folienprinzip

Um den Daten- und Methodenaustausch über Schnittstellen zu unterstützen, kann auf das Ebenenprinzip – auch Folienprinzip genannt – zurückgegriffen werden. Darunter wird die separate Datenhaltung von Objekten bzw. Objektklassen verstanden, die sich durch Überlagerung (Superposition) zu einem "Superobjekt" ausbilden (siehe Abb. 3.11). Unter "Superobjekten" sind dabei komplexe Objekte aufzufassen, die durch die Überlagerung von Basisobjekten gewonnen werden. So kann z. B. eine 3D-Beschreibung eines Ortsteils – herbeigeführt durch die Überlagerung von Flurstücken mit Gebäuden, von Höhenlinien abgeleitet aus einem DGM und Bodenschätzungsergebnissen – innerhalb der Flurbereinigung ein Superobjekt darstellen.

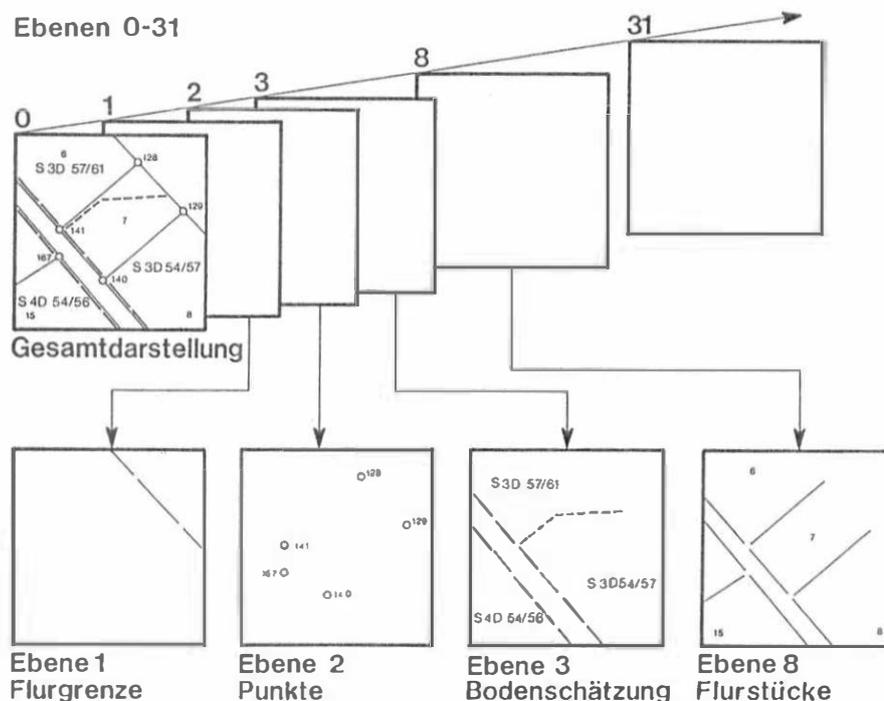


Abb. 3.11: Das Ebenenprinzip (entn. aus: F. Christoffers et al., 1985)

Vergleichen kann man das Ebenenprinzip mit den verschiedenen Darstellungsfolien analoger Karten, z. B. im Vermessungswesen, indem die Flurkarte mit den Bodenschätzungsergebnissen "vereinigt" wird, um die für die Flurbereinigung notwendigen Informationen zur Verfügung zu stellen.

Bezeichnet $E_i \forall i = 1, 2, \dots, n$ das Element (Objekt oder Objektklasse) oder eine Ebene i , so läßt sich das Ebenenprinzip darstellen als

$$E = E_1 \cup E_2 \dots \cup E_n \quad (3.1)$$

Die Verknüpfung der Ebenen miteinander erfolgt durch die Metrik, die durch ein Koordinatensystem gegeben ist, oder vermittels Identifikatoren.

3.2 Erläuterungen zu digitalen Geländemodellen

Der Begriff "digitales Geländemodell" war schon häufig Gegenstand von Diskussionen. Während in E. Dorner (1975) das digitale Geländemodell noch unterteilt wird in ein digitales Höhenmodell (DIHM), das die z -Koordinaten zu vorgegebenen Lagekoordinaten von Punkten an der Erdoberfläche liefert, und ein digitales Situationsmodell (DSM), welches Lageninformationen von Straßen, Gebäude, Bewuchs, Gewässer etc. bereithält, wird heute das DHM für sich schon als DGM bezeichnet.

Eine Definition des digitalen Geländemodells soll daher in Anlehnung an die Beschreibungen der AdV (1988) gegeben werden:

"Im digitalen Geländemodell (DGM) wird das Relief durch eine rasterförmig oder linienförmig angeordnete, nach Lagekoordinaten, Höhenwerten und geomorphologischen Informationen bestimmte Punktmenge nachgebildet, die die Geländeoberfläche in der gewünschten Genauigkeit und Annäherung beschreibt".

Das DGM ist somit durch Linienmodelle (Isolinien) und Flächenmodelle (Raster, Dreiecke, Hybrid) zu approximieren. Ferner sollten entsprechend den Vorgehensweisen im rechnerunterstützten Modellieren, Planen und Entwerfen noch unter dem DGM die Algorithmen subsummiert werden, die zu dem gewünschten Modell führen. Dadurch wird ebenso die *Reproduzierbarkeit* des jeweiligen digitalen Geländemodells gewährleistet. Eine beliebige Verteilung der Punkte ist jedoch dahingehend eingeschränkt, daß die Höhe in Abhängigkeit von der Lage darzustellen ist

$$z = z(x, y) \quad (3.2)$$

Multivariate Beschreibungen – mehrere z -Werte für eine beliebige x, y -Position – sind möglich, wenn mehrere Randbeschreibungen miteinander überlagert werden.

3.2.1 Generierung von digitalen Geländemodellen

Um digitale Geländemodelle von hoher Qualität zur Verfügung zu stellen, sind im wesentlichen drei Arbeitsschritte notwendig; die Datenerfassung, die Datenaufbereitung und die Datenapproximation und -interpolation.

3.2.1.1 Datenerfassung Im Hinblick auf die Integration von digitalen Geländemodellen in raumbezogene Informationssysteme kommt der Geländedatenerfassung bereits die entscheidende Bedeutung zur DGM-Generierung zu. Mit der Datenerfassung wird bereits die Qualität der Daten vorgegeben, die abhängig ist von der Methode und der Datendichte. Die Möglichkeiten der Datenerfassung lassen sich unterscheiden in:

1. die Erfassung aus topographischen Karten mittels der Digitalisierung von Isolinien
2. die Erfassung aus photogrammetrischen Stereomodellen
3. die direkte Erfassung durch tachymetrische Geländeaufnahme

In der hier vorgegebenen Reihenfolge nimmt die Genauigkeit der Datenerfassung zu, während die Wirtschaftlichkeit abnimmt. Während die dritte Methode vor Ort diskretisiert, können zu 1. und 2. verschiedene Diskretisierungsstufen unter Abschätzung ihrer entsprechenden Genauigkeitsverluste a priori simuliert werden. Isolinien können als Raumkurven im \mathbb{R}^2 aufgefaßt werden, so daß durch die zuvor gezeigte Parametrisierung Profile von hoher Dichte abzuleiten sind. Mit den in 2.2.2 gegebenen Darstellungen läßt sich dann eine optimale Diskretisierungseinheit berechnen.

Das photogrammetrische Stereomodell bietet ebenso die Möglichkeit, Profile in dichter Diskretisierungsanordnung zu messen, aus denen bei vorgegebener Genauigkeit die kleinste Digitalisierungseinheit geschätzt werden kann. Diese kann dann bei der Datenerfassung im Rastermodus ("progressive sampling") oder bei Profilierungen Berücksichtigung finden.

Während die tachymetrische Geländeaufnahme punktuell sehr genau ist, bleibt hier das Problem der optimalen Datendichte. Jedoch ist vielfach bei dieser Art der Datenerfassung die Dichte durch die Geomorphologie vorgegeben, da meistens lokale DGM aufgebaut werden, die zur Überwachung anthropogener Eingriffe dienen wie z. B. im Bergbau, Straßen- und Eisenbahnbau. Hier läßt sich auch direkt die Art des Flächenmodells angeben,

das meistens mittels einer Dreiecksvermaschung aufgebaut wird und vielfach keiner weiteren Aufbereitung bedarf.

Die Datenerfassung kann weiter in die Erfassung von ausgewählten Höhenpunkten differenziert werden. Dies können sein:

- Zu 1)
 - Höhenlinienpunkte
 - Punkte auf Geländekanten und Gerippllinien
 - Kuppen-, Mulden- und Sattelpunkte
 - Punkte von Aussparungsflächen
 - Einzelpunkte
- Zu 2)
 - Höhenlinienpunkte
 - Punkte auf Geländekanten und Gerippllinien
 - Kuppen-, Mulden- und Sattelpunkte
 - Punkte von Aussparungsflächen
 - Profilpunkte
 - Gitterpunkte
- Zu 3)
 - Punkte auf Geländekanten und Gerippllinien
 - Kuppen-, Mulden- und Sattelpunkte
 - Punkte von Aussparungsflächen
 - beliebig verteilte Massenpunkte

Eine Geländedarstellung von hoher Qualität erfordert zum einen eine homogene Erfassung (Massenpunkte) und zum anderen selektiv ausgewählte Punkte, um die Geomorphologie adequat modellieren zu können. Dies hat in der Photogrammetrie zu Datenerfassungen geführt, die innerhalb eines der Geländeundulation angepaßten x, y -Gitters die z -Werte der Gitterpunkte rechnergestützt ermitteln und diese durch selektive Linien- und Punktinformation ergänzen ("progressive sampling", B. Makarovic, 1977b, II. Ebner/W. Reinhardt, 1984, W. Reinhardt, 1988).

3.2.1.2 Datenaufbereitung Die Datenaufbereitung dient in erster Linie der Beseitigung von fehlerhaften Daten, die nur durch eine Qualitätskontrolle der Digitalisierung zu beseitigen ist. Während die Erfassung von Isolinien im off-line Modus kontrolliert werden kann, d. h. durch Überlagerung der analogen Information mit der in derselben Darstellung gegebenen digitalen, ist die Datenerfassung im Stereomodell on-line zu überprüfen (R. Beerenwinkel et al., 1986, W. Reinhardt, 1988). Dabei kann das erfaßte Datenmaterial als Linien- oder Flächenmodell mit dem Stereomodell durch optische Einspiegelung überlagert werden, so daß die geomorphologische und geometrische Qualität sichtbar ist. Eine weitere Verdichtung des Datenbestands kann dann Lücken auffüllen und somit weitere Erfassungsmängel ausgleichen.

Die Datenaufbereitung kann darüberhinaus noch weitere Schritte enthalten wie Koordinatentransformationen, um dem konsistenten geometrischen Bezug in der raumbezogenen Datenhaltung Rechnung zu tragen.

Nach der Datenaufbereitung liegt eine erste digitale Beschreibung des Geländes in der Form eines Linien- oder Flächenmodells vor. Diese Daten sollten archiviert werden, da in ihnen alle ursprünglichen Informationen enthalten sind, auf die auch in K. Kraus (1983) hingewiesen wird. Neben der geometrischen Information sollten noch Attribute wie Datenerfassungsmethode, Speichermodus, Speichermedium etc. aufgebaut werden, um den Zugang zwecks einer späteren Fortführung zu erleichtern.

3.2.1.3 Approximation Während das Flächenmodell "Dreiecke" ohne Approximationen und Interpolationen auskommen kann, wenn keine Datenglättung erwünscht ist, sind in der Regel für die Flächenmodelle "Raster" und "Hybrid" weitere Arbeitsgänge notwendig. Zum einen ist eine Beseitigung von zufälligen Meßfehlern durch *Approximation* (Glättung) und zum anderen der Bereitstellung von Rastermodellen durch *Interpolation*

(Verdichtung) Rechnung zu tragen. Dabei ist die Interpolation als der Approximation nachgeschalteter Verarbeitungsschritt zu sehen und kann dadurch in den Gesamtvorgang der Approximation mit einbezogen werden.

Entsprechend den Überlegungen zu den Flächenmodellen sind derzeit in der Bereitstellung von digitalen Geländemodellen die folgenden Anordnungen im Einsatz

1. DGM mit gleichmäßigen Punktlagen in quadratischen Gittern, die um selektive Linien- und Punktinformationen ergänzt sind (eine evtl. Variation der Maschenweite entsprechend der Geländeundulation ist hier zu subsummieren)
2. DGM mit unregelmäßig verteilten Punkten, die durch Dreiecksvermaschungen verknüpft sind. Dabei müssen die selektiven geomorphologischen Informationen Eckpunkte der Dreiecke sowie Dreieckskanten repräsentieren
3. DGM mit hybrider Anordnung, d. h. eine gleichmäßige Anordnung im Rastermodus mit der Berücksichtigung der selektiven geomorphologischen Informationen durch Dreiecksvermaschungen. Die Maschenweiten können ebenso wie bei 1. variabel sein.

Alle drei Anordnungen liefern ein DGM von hoher Qualität, wenn typische Geländemerkmale Berücksichtigung finden und die Daten hinreichend kontrolliert sind. Während Methoden der Dreiecksvermaschung aus topologischen und datentechnischen Gründen in dieser Arbeit enthalten sind, soll auf die Approximation und Interpolation von Rastermodellen nicht weiter eingegangen werden. Verwiesen sei dabei auf die in II. Ebner/D. Fritsch (1986) zitierte Literatur. Generell ist dabei jedoch zu unterscheiden in funktionale Geländebeschreibungen durch

- globale Polynome höheren Grades (L. Rapior/D. Bopp, 1975)
- lokale Polynome (gleitende Flächen), die durch eine Aufspaltung der Rest-Abweichungen in einen Signal- und Rauschanteil ergänzt werden können (Verfahren der linearen Prädikation, K. Kraus, 1972, K.R. Koch, 1973)
- bilineare oder bikubische elastische Gitter, bei denen sich die Elastizität aus einer gewichteten Minimierung von Krümmungsmaßen wie 2. Differenzen mit den Verbesserungen der Stützpunkte ergibt (Verfahren der finiten Elemente, II. Ebner, 1983, P. Reiß, 1986).

3.2.2 Folgeprodukte von digitalen Geländemodellen

Mit der Bereitstellung von digitalen Geländemodellen können weitere Informationen über die Geländeoberfläche abgeleitet werden. Die im Hinblick auf eine raumbezogene Datenhaltung notwendigen Folgeprodukte sind

- die Höhen von Einzelpunkten, um eine raumbezogene Datenhaltung im \mathbb{R}^2 auf den \mathbb{R}^3 zu erweitern
- die Ableitung von Linienmodellen in Form von Isolinen, um die Informationen des \mathbb{R}^3 im \mathbb{R}^2 zu visualisieren
- die Bereitstellung von Profilen zur Orthoprojektion oder für Anwendungen im Ingenieurbau
- die Berechnung von Neigungsmodellen, mit denen weitere Produkte wie Neigungsklassen, Neigungslinien etc. zur Verfügung gestellt werden können
- die Ableitung von Krümmungsmodellen
- Voluminaberechnung und Höhendifferenzen

Eine weitere Gruppe von Folgeprodukten dient der synthetischen Geländedarstellung. Insbesondere bei Planungsmaßnahmen und Umweltverträglichkeitsprüfungen sind synthetische Abbildungen gewünscht, aus denen weitere Planungen und Analysen abgeleitet werden können. Hinsichtlich der Abbildung ist dabei zu unterscheiden in 1) *Orthoprojektionen* und 2) *Zentralperspektiven* (Perspektivansichten).

Zu 1) Orthoprojektionen: Dabei wird das digitale Geländemodell bzw. ein Folgeprodukt orthogonal auf die x, y -Ebene projiziert. Als Produkte lassen sich hier einreihen

- Isoschichtenmodelle, bei denen einzelnen Klassen Grauwerte bzw. Farben zugewiesen werden (Klassen: Höhen, Neigungen, Krümmungen)
- die Erzeugung von Reliefbildern (Schummerungen) im Grundriß

Ebenso lassen sich Isoliniendarstellungen in die Gruppe der Orthoprojektionen einreihen.

Zu 2) Zentralprojektion: Dabei wird das digitale Geländemodell bzw. sein Folgeprodukt mittels der perspektiven Abbildungsgleichungen in eine Darstellung im \mathcal{R}^2 transformiert. Es ergeben sich die folgenden Produkte

- Isoschichtenmodelle in Perspektive
- die Darstellung von in der x, y -Ebene regelmäßig verteilten Gitterprofilen (Drahtgittermodelle), die noch um die selektive Linien- und Punktinformation ergänzt werden kann
- die Erzeugung von Reliefbildern (Schummerungen) in Perspektive

Der Darstellung (Visualisierung) der Folgeprodukte Rechnung tragend, ist dabei generell noch zu klassifizieren in a) *Vektorprodukte* und b) *Rasterprodukte*

Zu a) Höhenlinien, Neigungslinien, Differenzlinien, Neigungsrichtungen, Längs- und Querprofile

Zu b) Isoschichtenmodelle, Differenzschichtenmodelle, Neigungsrichtungsklassen, Schummerungen und Reliefbilder

Während anfänglich leistungsfähige DGM-Programmsysteme meist nur Vektorprodukte zur Verfügung stellten (H. Ebner et al., 1980, K. Kraus, 1983, F. Steidler, 1986) sind mittlerweile auch anspruchsvolle Rasterprodukte im Leistungsspektrum enthalten (H. Ebner et al., 1988)

3.2.3 Vom digitalen Geländemodell zum Geländeinformationssystem

Die Verallgemeinerung von DGM-Programmsystemen in Geländeinformationssysteme ist gegenwärtig der Stand der Entwicklung von Anbietern umfangreicher Systeme zur DGM-Generierung, -Verwaltung und der Ableitung von Folgeprodukten. Bereits in 1983 wurde durch K. Kraus ein "Topographisches Informationssystem" eingeführt, das Aufschluß geben kann über die

- aufbereiteten Originaldaten als ursprüngliche Informationsquelle
- zusätzliche Attribute (Sachdaten) über die Entstehung und Verwaltung der Daten (z. B. Erfassungstag, eingesetzte Instrumente, Abbildungsmaßstab der photogrammetrischen Auswertung, Archivierungsmedium)
- ein DGM als Flächenmodell "Raster" für die Ableitung von Folgeprodukten

Gemäß den Ausführungen in H. Ebner/D. Fritsch (1986) wurde der Begriff des "Höheninformationssystems" geprägt. Unter Abwägung der vorangegangenen Überlegungen soll für die Bereitstellung der fünf wesentlichen Softwaremodule zur Eingabe, Abfrage, Antworten/Ausgabe, Datenverwaltung und Datenbestand sowie der Methodenbank das *Geländeinformationssystem* (GelIS) eingeführt werden. Ein typisches GelIS ist in der Abb. 3.12 wiedergegeben.

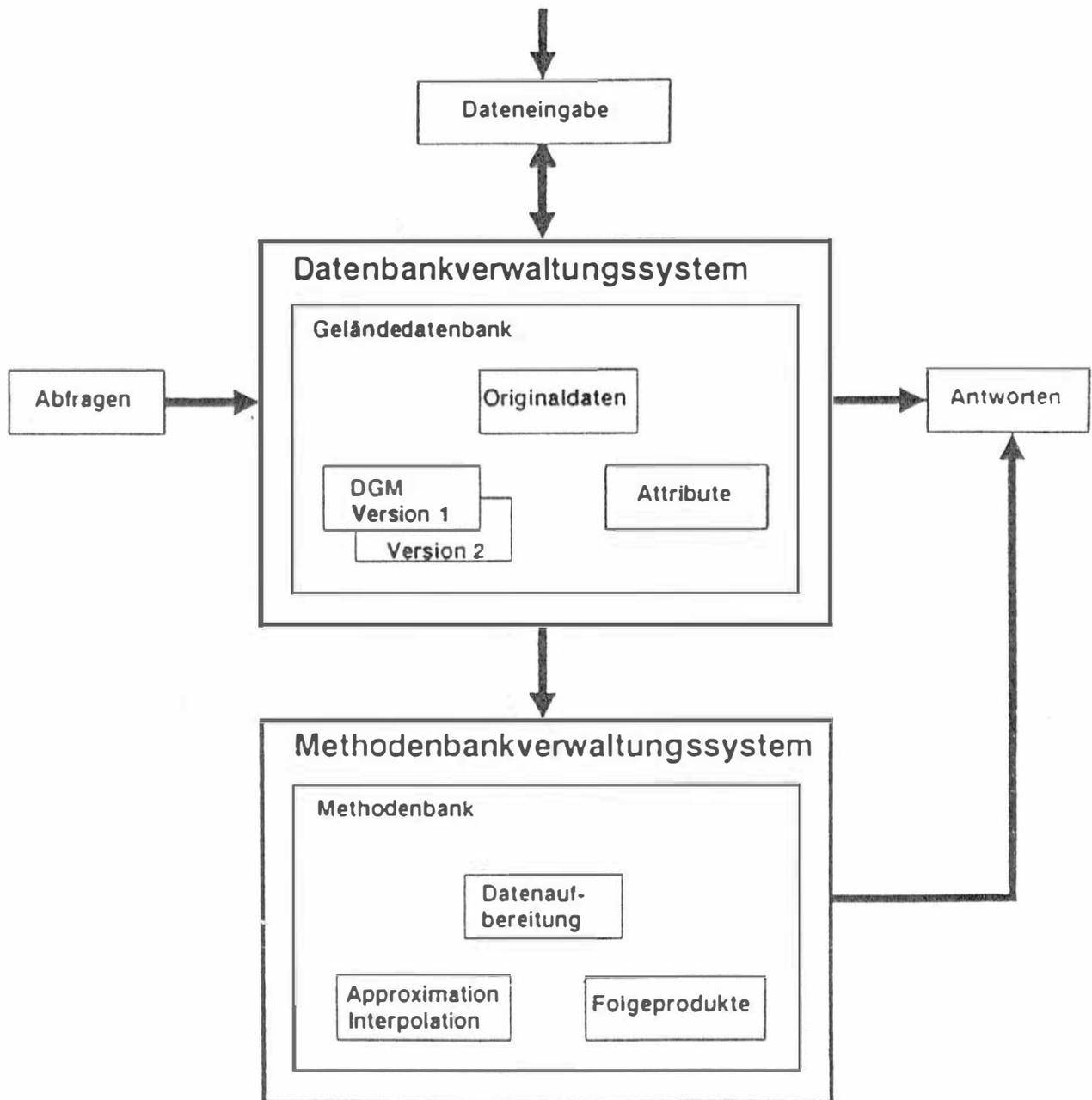


Abb. 3.12: Aufbau eines Geländeinformationssystems

Ein Geländeinformationssystem sollte in der Lage sein, auf eine Grundgesamtheit von Abfragen bezüglich der Geländeoberfläche zu reagieren. Dies bedingt spezielle Anforderungen an die Datenhaltung und -verwaltung sowie zur Methodenbereitstellung. Ferner müssen Schnittstellen zur Kommunikation mit anderen Informationssystemen vorhanden sein.

Innerhalb der Datenhaltung sind die Originaldaten, verschiedene DGM-Versionen und Attribute vorzuhalten. Da regionale Anwendungen sehr große Datenmengen erfordern, ist dem Entwurf einer DGM-Datenbank (Datenbasis) große Sorgfalt beizumessen. Entsprechend der DB-Architektur sind dabei die interne, externe und konzeptionelle Ebene zu berücksichtigen. Analog zu den vorangegangenen Ausführungen können Höhendaten z. B. im Rastermodus sehr effizient verwaltet werden, indem nach dem Quadtree-Prinzip die Gesamtregion in Teilgebiete unterteilt und dann auf die niederste Ebene des Quadtrees im direkten Zugriff zugegriffen werden kann. Diese Ebene kann durchaus auch lokale Dreiecksvermaschungen enthalten. Ebenso müssen Konsistenzbedingungen wie der Satz von Euler etc. abfragbar sein. Dies bedingt einen modularen Aufbau des Datenbankverwaltungssystem, d. h. es sind Module zum Lesen und Schreiben der DGM-Daten, Editieren der Daten (interaktiv und im Batch-Modus), zur Überprüfung der Konsistenzbedingungen u.a.m. zur Verfügung zu stellen (H. Ebner et al., 1988).

Die Sicherung der Originaldaten kann durchaus auf Magnetband erfolgen. Die Bereitstellung von einmal beschreibbaren und immer wieder lesbaren optischen Platten (WORM = Write Once Read Multiple) kann das Magnetband als Archivierungsmedium ablösen. Ein vollständiger Durchbruch wird hier durch die löschbaren optischen Platten erzielt (WORM = Write Multiple Read Multiple), die gerade angekündigt sind. Die Originaldaten werden nur bei Änderungen wieder zur Ableitung von neuen DGM benutzt und brauchen daher nicht ständig vorgehalten zu werden. Bei vollständig triangulierten DGM, die keinen Approximationen unterworfen sind, bilden die auf Magnetband ausgelagerten Originaldaten wie zuvor die Datensicherung. Die Attribute (Sachdaten) können außerdem weitere Geländeinformationen aufnehmen, wie z. B. Höhe des Grundwasserspiegels, Aussagen über geologische Schichten, Höhen/Tiefenlage von Ver- und Entsorgungsanlagen etc., so daß ein Geländepunkt durch Attributierung beliebig tief mit Sachinformationen hinterlegt werden kann. Die Verwaltung der Daten kann dann in den zuvor genannten Datenbankmodellen erfolgen.

Innerhalb der Methodenbereitstellung sind im wesentlichen drei Gruppen von Modulen bereitzustellen

- Module für die Datenaufbereitung (Transformieren und Verifikation der Daten)
- die Approximation
- die Ableitung von Folgeprodukten

Während interne Schnittstellen für den reibungslosen Betrieb innerhalb des GELIS sorgen, ist sich ebenso mit externen Schnittstellen zur Anbindung und zum Austausch mit anderen raumbezogenen Informationssystemen auseinanderzusetzen. Hierzu kommen in Frage

- die Methodenschnittstelle, um kodierte Algorithmen auszutauschen
- die Datenschnittstelle zur Kommunikation über Datenfiles

3.3 Untersuchungen zur Methodenbank eines Geländeinformationssystems

Die Integration von digitalen Geländemodellen bedingt nicht nur konzeptionelle Betrachtungen, sondern auch Erweiterungen bzw. Ergänzungen zur Methodik. Im folgenden sollen anhand von praktischen Untersuchungen zur Glättung von Profilen, Isolinien sowie Raumkurven, zur Ableitung von Neigungsmodellen und zum Einsatz von digitalen Filtern neue Erkenntnisse wiedergegeben werden. Diese möchten die Prinzipien der im theoretischen Teil dargestellten Konzepte demonstrieren. Wenn auch noch etliche detaillierte Untersuchungen notwendig sind, um diese Verfahren in die der Praxis bisher verfügbare DGM-Methodik zu integrieren, so lassen sich dennoch erste Vergleiche ziehen, sowie bisherige Vermutungen bestätigen.

3.3.1 Glättung von Raumkurven vermittels approximierender Splines

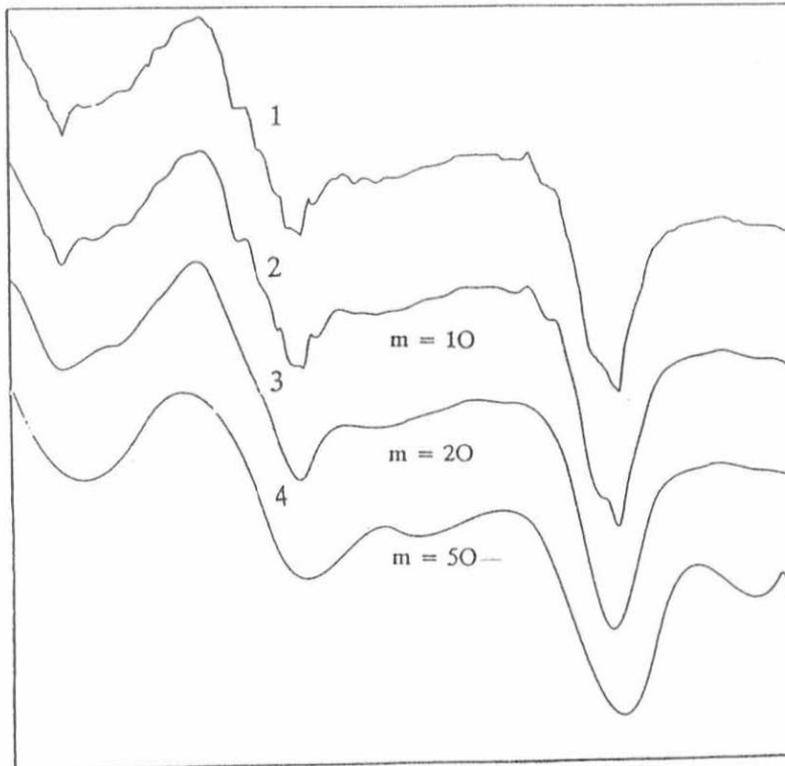
Für die in Kap. 2.1.2 eingeführten kubischen Splines sollen anhand der nachfolgenden Beispiele die Auswirkungen von Stetigkeitsforderungen bzw. die Wirkungsweise der Verfahren demonstriert werden. Dabei ist entsprechend der Parametrisierung unterschieden in die Glättung von Profilen, von Isolinien und Raumkurven im \mathbb{R}^3 .

3.3.1.1 Profilglättung Die Glättung von Geländeprofilen ist eine Aufgabe, die häufig schon innerhalb einer raumbezogenen Datenerfassung gelöst werden muß. Wie in D. Fritsch (1988a) demonstriert, können geglättete Profile zuverlässigere Werte für die optimale Diskretisierungseinheit liefern als die Originalbeobachtungen. Ebenso kann eine Profilglättung erforderlich sein, wenn Längs- und Querprofile aus ungefilterten Dreiecksvermaschungen abgeleitet worden sind.

Mit der Abb. 3.13 ist die Anwendung der C_1 -kontinuierlichen und der C_2 -kontinuierlichen Splines sowie des kubischen Splines mit Nebenbedingung vorgestellt. Hier ist ein gegebenes Geländeprofil – repräsentiert durch die äquidistanten Wertepaare $\{t_i, x_i\} \forall i = 0, 1, 2, \dots, 299$ – verschiedenen Approximationsstufen (Glättungsgraden) unterworfen, wobei in die drei Stufen: schwache, optimale und starke Glättung unterschieden ist. Als Maß für

eine optimale Glättung wurde beispielsweise $\sigma_x = 0.4[m]$ vorgegeben. Die Glättungsgrade sind in Abhängigkeit von der Anzahl m der Stützpunkte zwischen zwei Knotenlagen bzw. als Funktion des Rauschens σ_x a priori dargestellt. Es zeigt sich jeweils eine optimale Glättung für $m = 20$ durch den C_1 -kontinuierlichen Spline für $m = 10$ durch den C_2 -kontinuierlichen Spline und für $\sigma_x = 0.4[m]$ durch den kubischen Spline mit Nebenbedingung. Während für den C_1 - und C_2 -kontinuierlichen Spline die Glättungsgüte durch Soll - Ist - Vergleich berechnet wurde, konnte in der Nebenbedingung des letzteren Splines die Forderung für $\sigma_x = 0.4[m]$ direkt berücksichtigt werden.

a) C_1 -kontinuierlicher kubischer Spline



b) C_2 -kontinuierlicher kubischer Spline

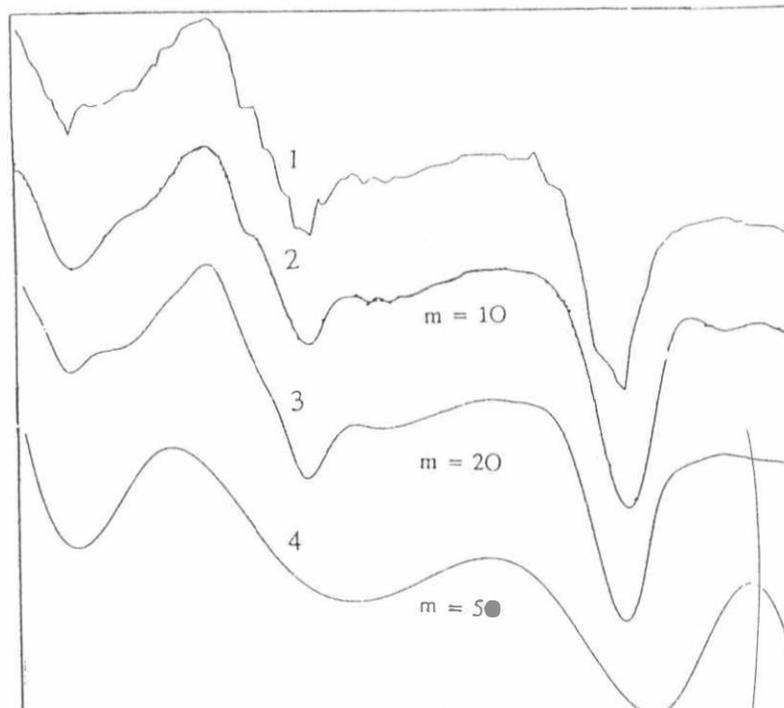
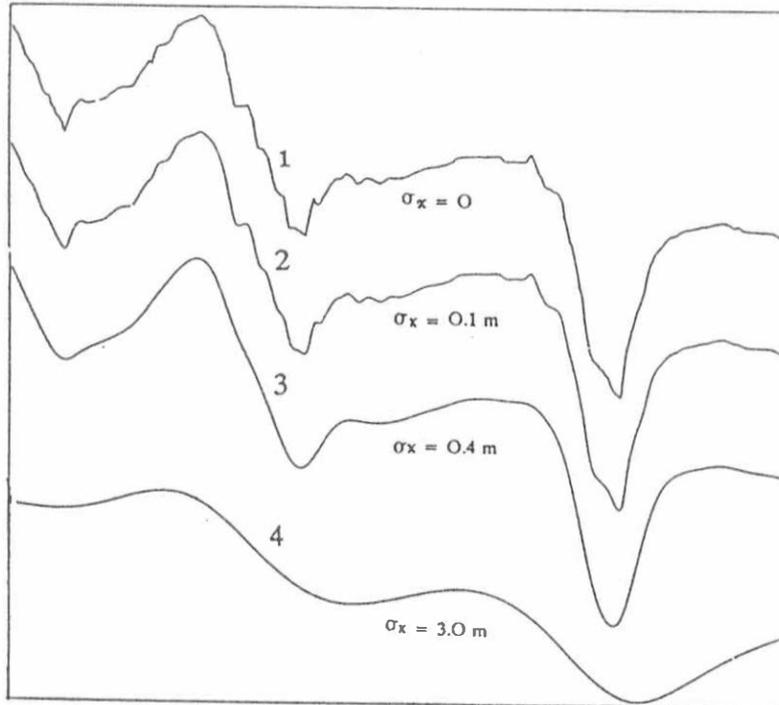


Abb. 3.13: Approximation mittels kubischer Spline-Funktionen

1) Originaldaten 2) schwache Glättung 3) optimale Glättung 4) starke Glättung

c) kubischer Spline mit Nebenbedingung



Fortsetzung Abb. 3.13: Approximation vermittels kubischer Spline-Funktionen
 1) Originaldaten 2) schwache Glättung 3) optimale Glättung 4) starke Glättung

3.3.1.2 Glättung von Isolinien

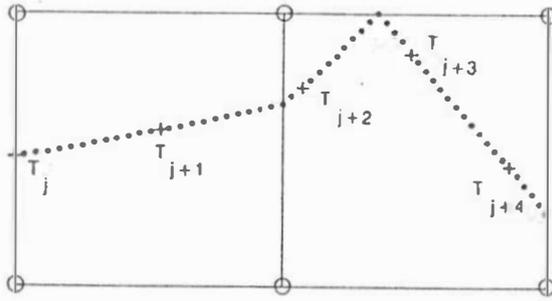
Isolinien vermittels einfacher kubischer Splines. Mit den Ausführungen von 2.1.1.3 läßt sich eine Raumkurve $z = z(x, y) = \text{const.}$ in die beiden eindimensionalen Kurven $x = x(t)$ und $y = y(t)$ zerlegen. Vermittels der Approximation mit Splinefunktionen lassen sich dann C_1 - bzw. C_2 -Kontinuität einhalten.

Den Ausgangspunkt für eine Glättung durch kubische Splines bildet ein Stützpunktpolygon, das durch Verschneidung der Horizontalfläche $z = z(x, y) = \text{const.}$ mit dem jeweiligen Flächenmodell entsteht (G. Düsedau et al., 1987)

$$F_{\text{const}} \cap F_A \quad A = \text{Raster, Dreiecke, Hybrid} \quad (3.3)$$

Dieses Stützpolygon muß hinreichend dicht sein, d. h. genügend Stützpunkte innerhalb der Flächenelemente zur Verfügung stellen; gem. (2.33) sollte die Anzahl der Stützpunkte zwischen zwei Knoten T_i und $T_{i+1} \geq 2$ sein. Zur Ableitung der Datendichte des Stützpolygons können wiederum die in 3.2.1.1 angestellten Überlegungen dienen. Die Auswahl der Knotenlage kann dabei dem jeweiligen Flächenmodell angepaßt werden (vgl. Abb. 3.14). Während eine festvorgegebene Anzahl von Punkten des Stützpolygons zwischen zwei Knoten zu einer festen Knotenlage führt, ergibt die Variation der Knotenlage entsprechend der Durchstoßpunkte des Stützpolygons mit dem Flächenmodell einen zusätzlichen Freiheitsgrad. Dabei ist jedoch wieder die unbedingt notwendige Anzahl von Stützpunkten zu berücksichtigen, so daß nicht unbedingt jeder Durchstoßpunkt als Knoten berücksichtigt werden kann (siehe Abb. 3.14b).

a) feste Knotenlage



b) variable Knotenlage

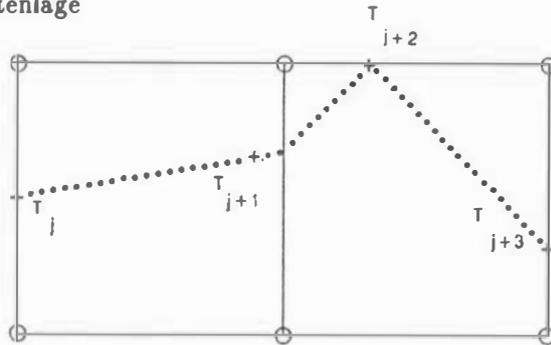
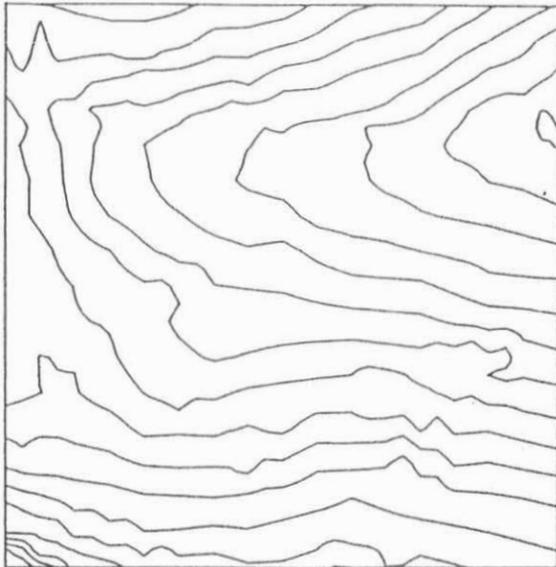


Abb. 3.14: Auswahl der Knotenlage

In der Abb. 3.15a sind die Stützpolygone für verschiedene Isolinien wiedergegeben. Die Glättung durch einen C_1 – kontinuierlichen Spline ist in der Abb. 3.15b ersichtlich, wobei pro Intervall 15 Stützpunkte (feste Knotenlage) zugelassen worden sind. Die Abb. 3.15c und Abb. 3.15d geben C_2 – Kontinuität wieder mit 10 bzw. 15 Stützpunkten pro Intervall.

a)



b)

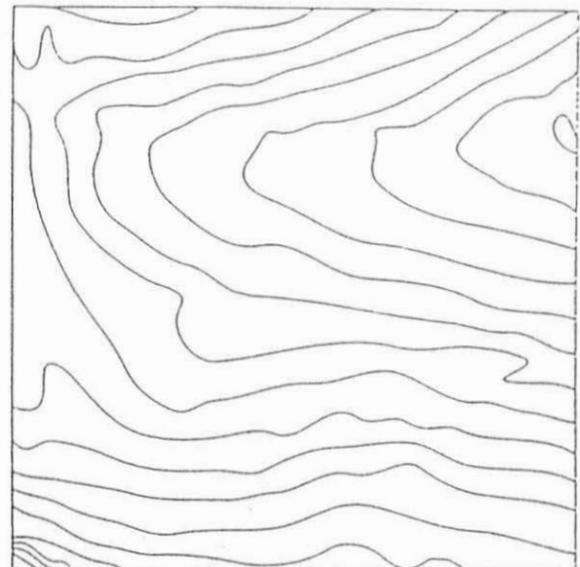
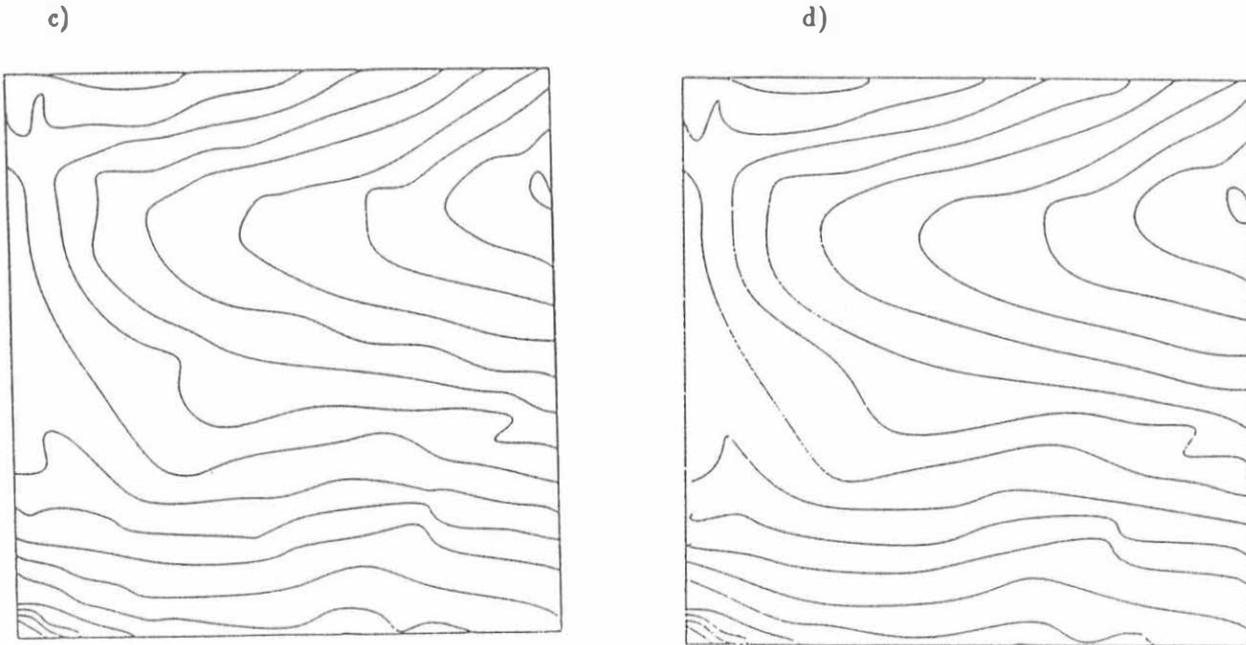


Abb. 3.15: Isolinien vermittle Splineapproximationen bei fester Knotenlage

a) Originaldaten b) C_1 – kontinuierlicher Spline

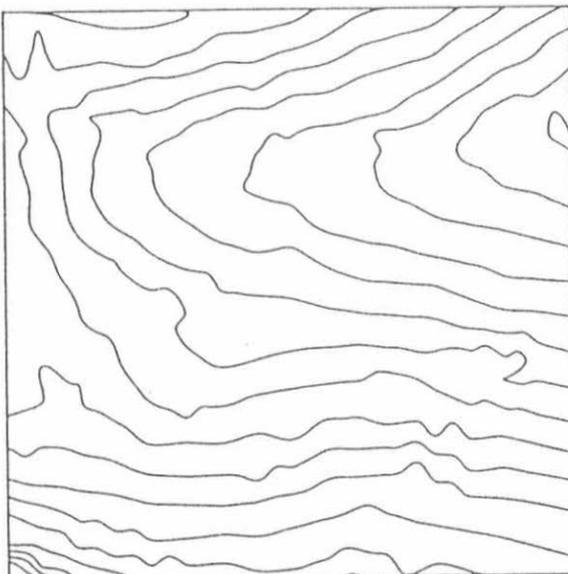


Fortsetzung Abb. 3.15: Isolinien mittels Splineapproximationen bei fester Knotenlage
 c) C_2 -kont. Spline (10 Stützpkt.) d) C_2 -kont. Spline (15 Stützpkt.)

Es zeigt sich, daß die C_2 -Kontinuität den Lösungsraum für den Spline weiterhin einengt und dadurch zu glatten Ergebnissen führt. Wenn auch manchmal die Glattheit von Isoliniendarstellungen gewünscht ist, so stellt die C_2 -Kontinuität dennoch eine sehr einschränkende Bedingung dar. Häufig genügt eine erweiterte C_1 -Kontinuität (z. B. $C_{1,\delta}$), um für die Praxis akzeptable Ergebnisse abzuleiten. Die Forderung nach C_2 -Kontinuität muß ebenfalls abgelehnt werden bei Diskontinuitäten, bei denen sogar C_1 -Kontinuität noch einschränkend wirkt. So ist z. B. bei den Übergängen an Geländekanten lediglich C_0 -Kontinuität wünschenswert.

Die Flexibilität der Methode soll weiter durch die Abb. 3.16 nachgewiesen werden. Zum einen können – wie vorher ausgeführt – Knoten an den Übergängen zwischen den Zellen des jeweiligen Flächenmodells zu liegen kommen, und zum anderen ist gem. (2.62) der Glättungsparameter g zu variieren. Der letztere Freiheitsgrad gestattet einen stetigen Übergang von C_1 -Kontinuität nach C_2 -Kontinuität, da wie bereits ausgeführt C_2 -Kontinuität eine sehr starke Glättung bewirkt.

a) $g = 0$ ($\hat{=}$ C_1 -Kontinuität)



b) $g = 100$

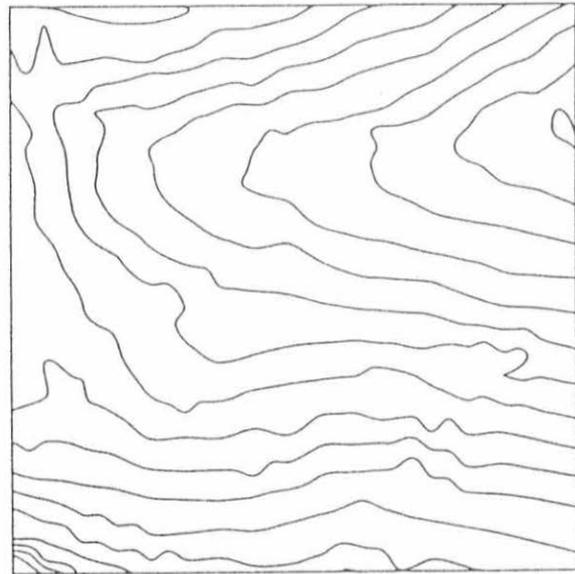
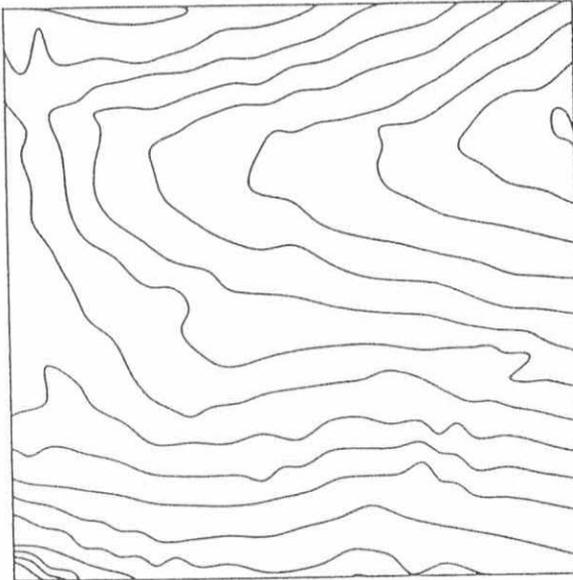
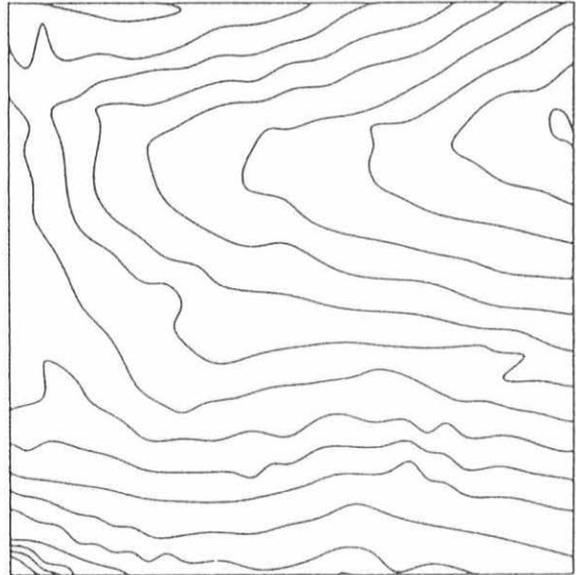


Abb. 3.16: Übergänge von C_1 – nach C_2 – Kontinuität bei variabler Knotenlage

c) $g = 10000$ d) $g = 1000000$ ($\hat{=}$ C_2 -Kontinuität)

Fortsetzung Abb. 3.16: Übergänge von C_1 - nach C_2 -Kontinuität bei variabler Knotenlage

Ebenso können zusätzliche Stützpunkte entlang der Tangentenrichtungen an Kuppen- und Wannennlinien eingeführt werden, um geomorphologische Details besser herausarbeiten zu können. Die Abb. 3.17 zeigt den Ausschnitt eines Höhenlinienplanes des Vernagtferners, eines Gletschers in den Öztaler Alpen. Insbesondere sind dabei die Geländekanten zu beachten, für die lediglich C_0 -Kontinuität zu gewährleisten ist.

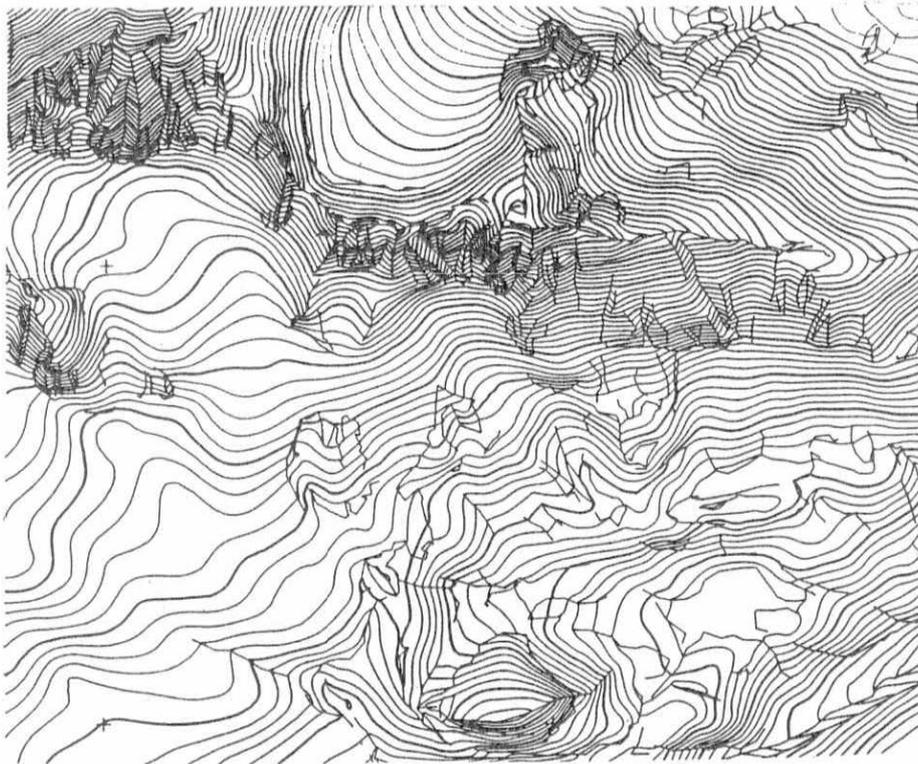
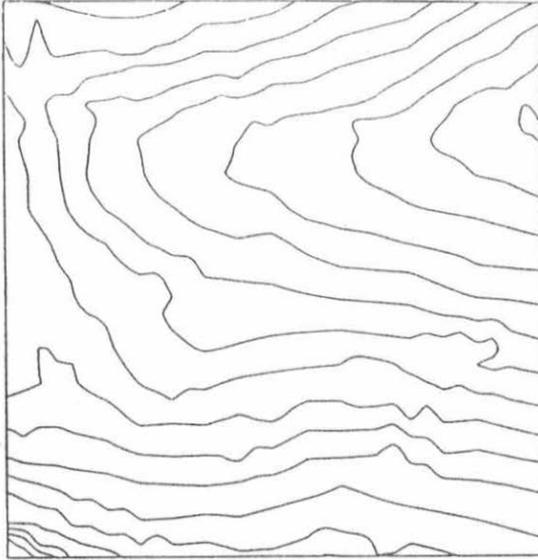


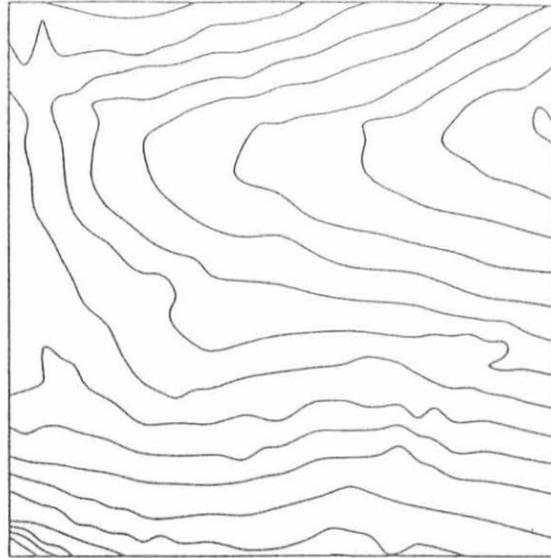
Abb. 3.17: Höhenlinienplan des Vernagtferners (abgeleitet mit dem DGM-Programmpaket "IIF1-88")

Isolinien vermittelt kubischer Splines mit Nebenbedingungen. Mit dem in 2.1.2.3 vorgestellten kubischen Spline mit Nebenbedingung ist eine globale Vorgabe zu erfüllen. Der Glättungsgrad des Splines richtet sich dabei nach der Vorgabe des Fehlersaumes S . Die Abb. 3.18a - d geben die Glättung der in der Abb. 3.15 dargestellten Stützpolygone wieder, wobei für jeden Stützpunkt und jede eindimensionale Raumkurve ein Fehlersaum von 0.1 [m], 0.5 [m], 1.0 [m] und 2.0 [m] vorgegeben wurde.

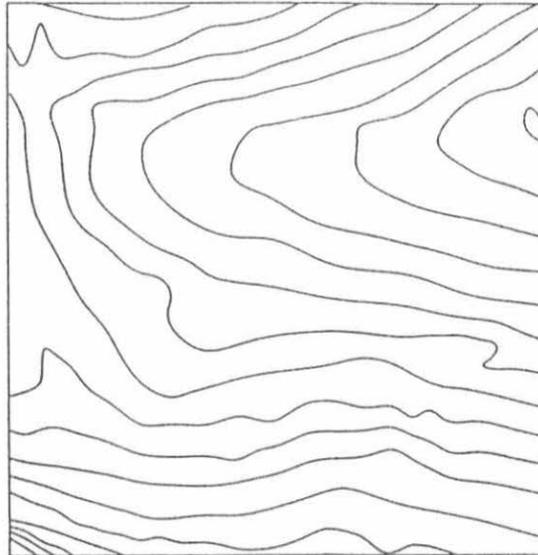
a) 0.1 [m]



b) 0.5 [m]



c) 1.0 [m]



d) 2.0 [m]

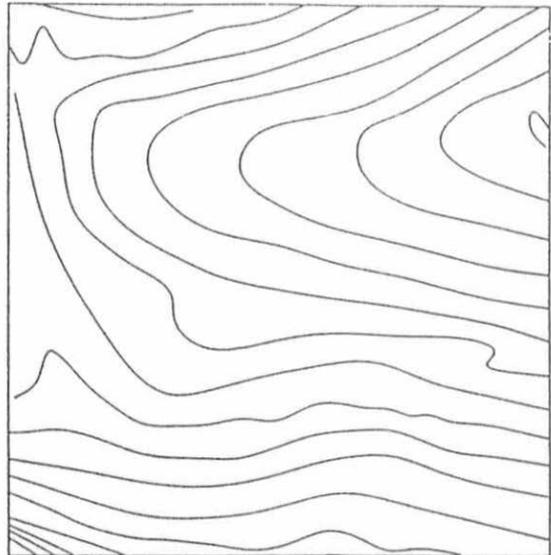


Abb. 3.18: Einfluß von Nebenbedingungen

Der Vergleich von Abb. 3.18 mit der Abb. 3.16 zeigt, daß der Forderung nach C_1 - und C_2 -Kontinuität dieser Spline nur mit größeren Fehlersäumen nachkommen kann. Je größer der Glättungsgrad g wird, desto größer müssen die Fehlersäume S sein. Von daher läßt sich eine Korrespondenz zwischen g und S angeben, die jedoch in den meisten Fällen von der praktischen Anwendung abhängig sein wird.

Abschließend sei bemerkt, daß sich bei den bisherigen Untersuchungen der einfache kontinuierliche Spline mit eingeschränkter C_2 -Bedingung sehr gut bewährt hat. Ebenso konnten mit dem kubischen Spline mit Nebenbedingung gute Erfahrungen gesammelt werden. Obgleich die Handhabung dieses Splines sehr einfach ist, stellt er nicht so viele Freiheitsgrade zur Verfügung, die jedoch hinsichtlich einer besten Approximation benötigt werden.

3.3.1.3 Glättung von Raumkurven Die Glättung von Raumkurven kann erforderlich werden, wenn Kanteninformation – selektiv erfaßt (z. B. photogrammetrisch) – Beobachtungsfehler oder Rauscheinflüsse enthalten. In der Vorbereitung der Glättung kann dann die in Abschn. 2.1.2.3 eingeführte Parametrisierung genutzt werden, so daß das Approximationsproblem $\bar{u} = \bar{u}(x, y, z)$ zerfällt in $x = x(t)$, $y = y(t)$ und $z = z(t)$.

Zur Demonstration der Glättung von Raumkurven wurde ein synthetischer Körper bestehend aus einer Kugel, einem Rotationsellipsoid, einem Rotationskegel und einem Rotationszylinder generiert (Abb. 3.19a).

Den aus diesem Körper ausgeschnittenen Raumkurven wurde in der Abb. 3.19b ein normalverteiltes Rauschen mit $E(\mathbf{r}) = 0$ und $V(\mathbf{r}) = 0.25^1$ überlagert. Die Abb. 3.19c zeigt die Elimination des Rauschens vermittels des kubischen Splines mit Nebenbedingung, indem in der Nebenbedingung gerade $V(\mathbf{r}) = 0.25$ berücksichtigt werden konnte. Eine starke Glättung ist mit der Abb. 3.19d wiedergegeben.

Abschließend sei noch auf weitere Untersuchungen zum Einsatz von kubischen Basis - Splines hingewiesen (O. Reschberger, 1988), die sich jedoch zur Glättung von Raumkurven als weniger geeignet erwiesen haben. Der Grund dafür lag in der äquidistanten Anordnung der Knoten. Mit verallgemeinerten, nicht - uniformen Basis - Splines - wie in E. Cohen et al. (1980) aufgezeigt - konnten bisher noch keine Erfahrungen gesammelt werden.

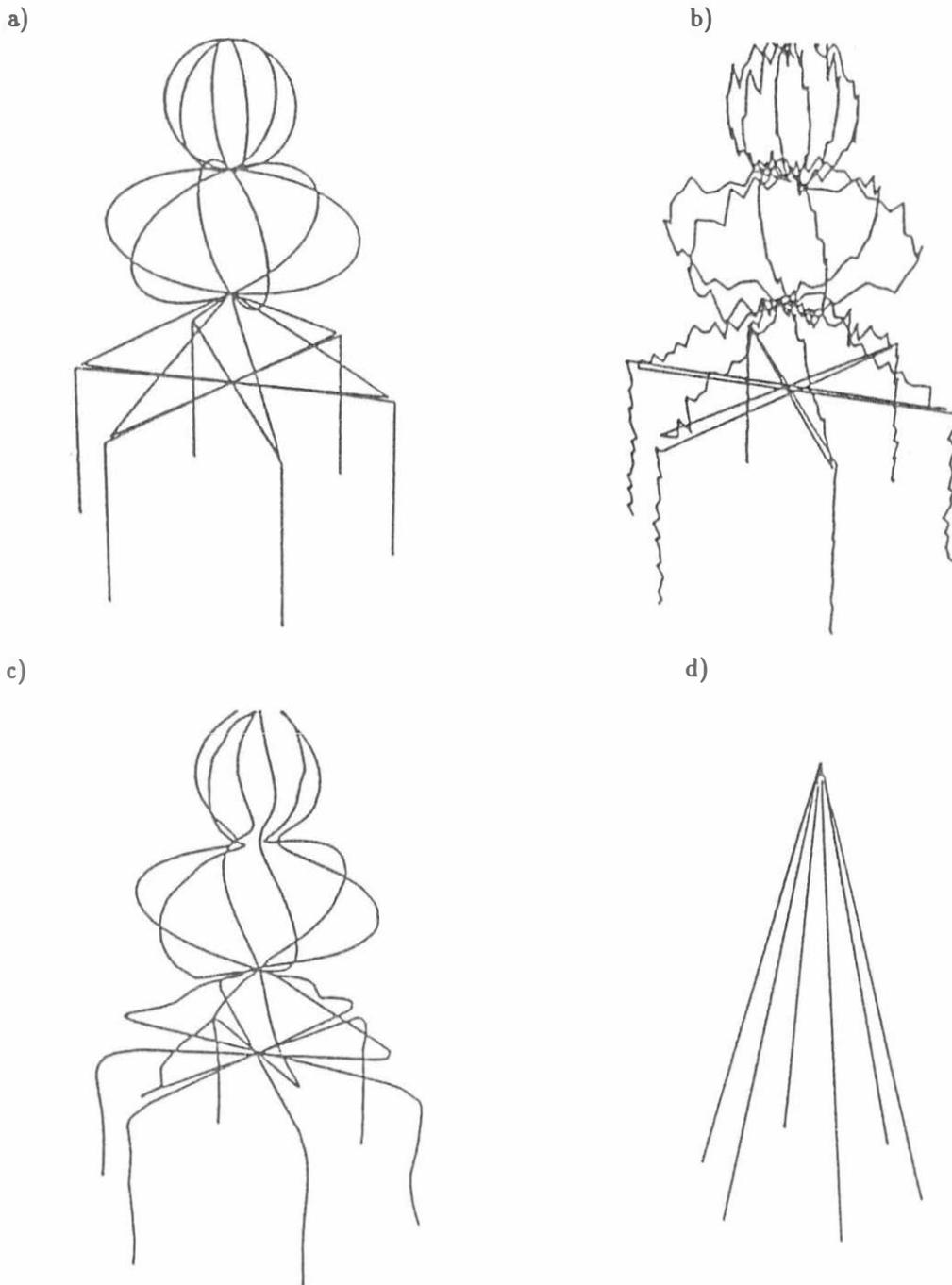


Abb. 3.19: Glättung von Raumkurven vermittels des kubischen Splines mit Nebenbedingung
 a) synthetisches Modell b) verrauschtes Modell
 c) optimal geglättetes Modell d) stark geglättetes Modell

¹Mit E ist dabei der Erwartungswert und mit V die Varianz bezeichnet.

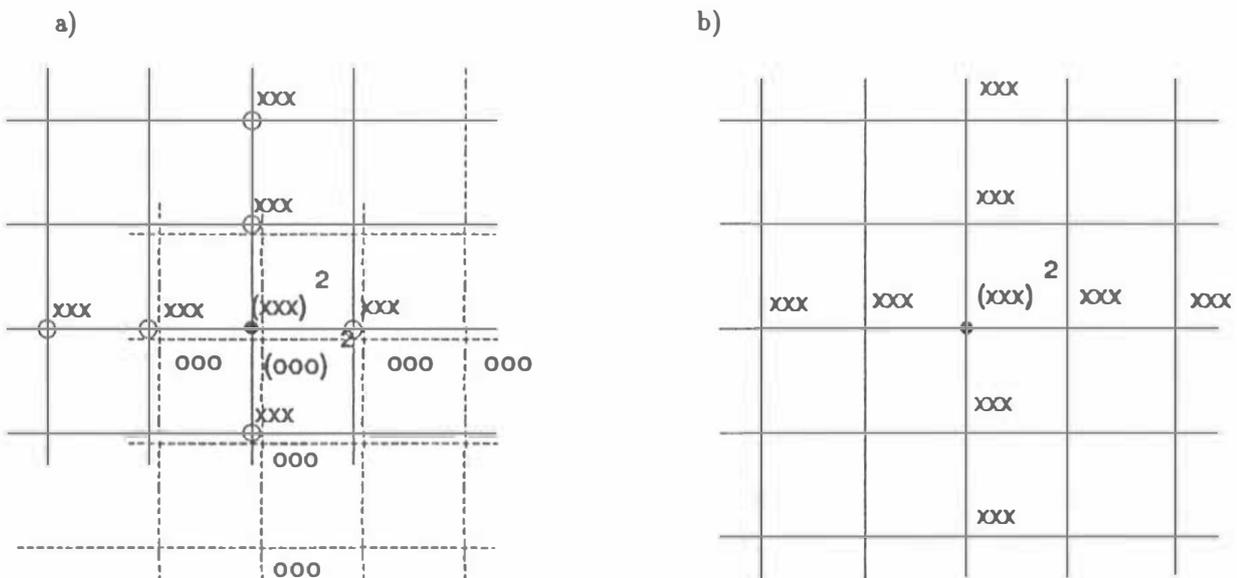
3.3.2 Ableitung von Neigungsmodellen

Innerhalb der Ableitung von Neigungsmodellen wurde insbesondere die lokale Ausdehnung von Differentiatoren untersucht. Dabei kamen heuristische Differentiatoren der Länge 2, 3 sowie selektive Systeme der Länge 4 und 5 zum Einsatz. Während die kürzeren Operatoren durch analytische Überlegungen direkt anzugeben sind – eine Differenzenbildung entspricht bei einem Differentiator von der Länge 3 den folgenden Gewichtskoeffizienten (Impulsantwort): $h(0) = 0, h(1) = 1/2, h(-1) = -1/2$ – können längere Operatoren durch die Vorgabe im Frequenzbereich entworfen werden. Vermittels des Programmpakets von T.W. Parks/J.H. McClellan (1972) wurden folgende Impulsantworten der Länge 4 und 5 berechnet zu

$$\begin{aligned} \text{a) } h_m(m, n) &= [-0.02085944, 0.2083646, -0.2083646, 0.02085944] \\ h_n(m, n) &= h_m^T(m, n) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{b) } h_m(m, n) &= [-0.1042030, 0.2212293, 0.0 - 0.2212293, 0.1042030] \\ h_n(m, n) &= h_m^T(m, n) \end{aligned}$$

Während die Durchführung der Faltung mit der Impulsantwort b) nach (2.84) auszuführen ist, muß für Impulsantworten mit einer geraden Länge das Mittel aus den benachbarten Elementen berechnet werden (siehe Abb. 3.20)



• Zentralpunkt

xxx Gewichtskoeffizient Faltung 1

ooo Gewichtskoeffizient Faltung 2

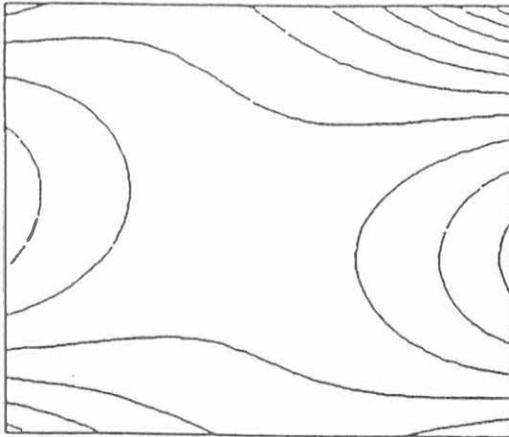
Abb. 3.20: Implementierung der Faltung a) Impulsantwort gerade b) Impulsantwort ungerade

Anhand einer vorgegebenen analytischen Fläche

$$z = a_1 + a_2x + a_3y + a_4xy + a_5x^2 + a_6y^2 + a_7x^2y + a_8xy^2 + a_9x^2y^2 \quad (3.4)$$

die für vorgegebene Koeffizienten $a_i \forall i = 1, 2, \dots, 9$ als Rastermodell aufgebaut wurde, konnten Neigungsinformationen analytisch abgeleitet und den Ergebnissen mittels Differentiatoren gegenübergestellt werden. In der Abb. 3.21 sind die analytische Fläche und ihr Neigungsmodell wiedergegeben. Dabei wurde das Neigungsmodell Abb. 3.21b durch analytische Differentiation von (3.4) erhalten.

a) analytische Fläche



b) Neigungsmodell

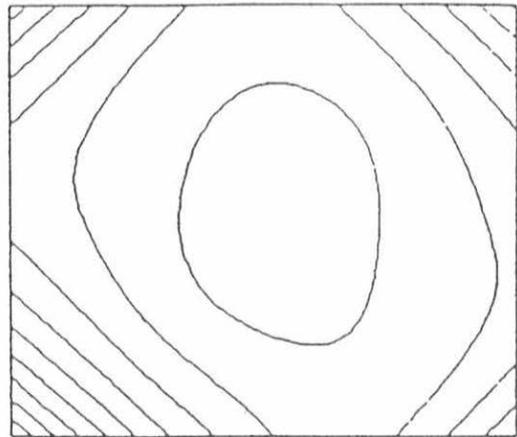
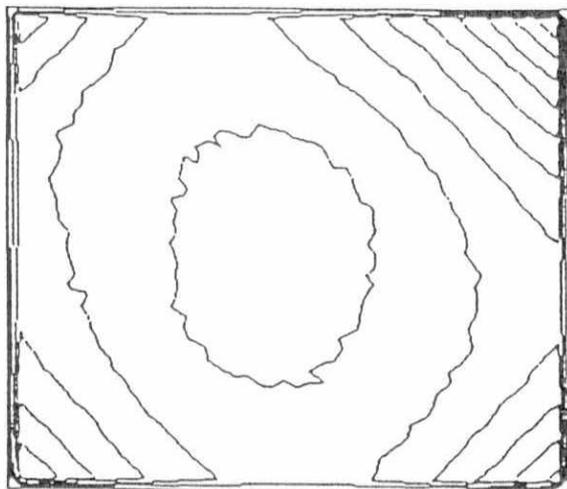


Abb. 3.21: Isolinien der analytischen Fläche und Neigungsisolines

Des weiteren wurde die analytische Fläche mit normalverteiltem Rauschen für Signal-/Rauschverhältnisse von 0.5 ‰, 1 ‰ und 2 ‰ überlagert, um die Robustheit der Operatoren sowie ihre lokale Wirkung zu überprüfen. Dies wurde insbesondere deshalb ausgeführt, da aufgrund der Inhomogenität von Neigungsinformationen diese in der Praxis meistens von stark geglätteten DGM's abgeleitet werden. Dabei sollte die "Homogenisierung von Neigungsinformation" untersucht werden, die evtl. durch längere Impulsantworten zu erreichen ist.

Die Ergebnisse der empirischen Untersuchungen sollen exemplarisch durch die Abb. 3.22 belegt werden. Während Differentiatoren bis zur Länge 3 die Neigungsinformation aus der mit 2 ‰ Rauschen überlagerten analytischen Fläche ableiten können, tritt in diesem Beispiel zwischen der Länge 4 und 5 ein "Bruch" ein. Somit ist es hier nicht möglich, mit längeren Differentiatoren ($K \geq 5$) überhaupt noch Gradienten aus verrauschtem Datenmaterial abzuleiten. Ferner hat sich dabei herausgestellt, daß der Sobel-Operator in allen Fällen die besten Ergebnisse geliefert hat. Dies ist auf die Anzahl der Koeffizienten dieses Operators zurückzuführen, da die Ecken ebenso mit Koeffizienten besetzt sind.

a)



b)

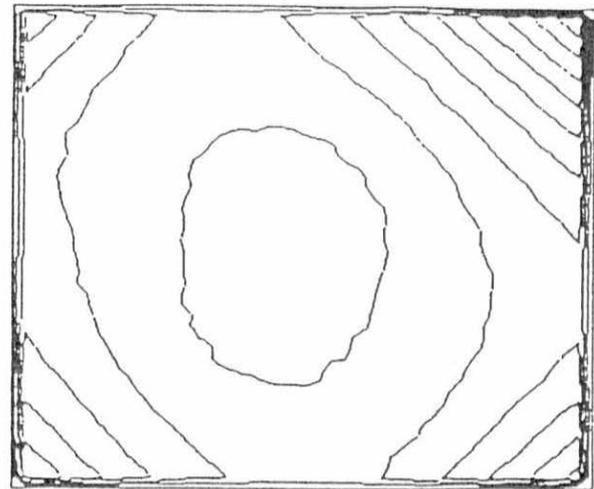


Abb. 3.22: Isolinien der Neigungsmodelle für den 2 ‰ verrauschten Fall

a) einfacher Differentiator b) Sobel-Operator

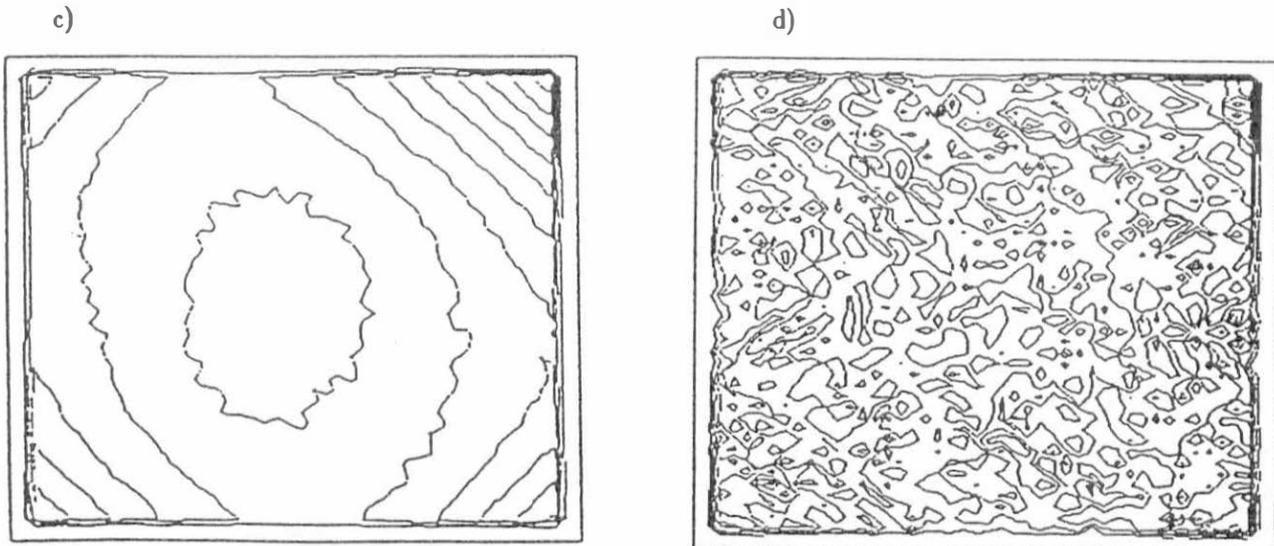


Abb. 3.22: Isolinien der Neigungsmodelle für den 2°/∞0 verrauschten Fall

c) Differentiator Länge 4 d) Differentiator Länge 5

Zur Erhärtung dieser Untersuchungen wurde ein realer Datensatz der Ableitung von Neigungsmodellen unterzogen. Es handelt sich dabei um ein DGM in der Nähe von Donauwörth, wo eine 1,22 km (Ostausdehnung) * 2,24 km (Nordausdehnung) mit einer Maschenweite von 20 m zur Verfügung steht. Im Hinblick auf die DGM-Entstehungsgeschichte sei auf P. Reiß (1985) verwiesen. Das DGM ist abgeleitet worden vermittels der Methode der finiten Elemente (H. Ebner et al., 1980), wobei die folgende Zielfunktion minimiert wird

$$\|v_k\|^2 P_{ref} + \|v_{xx}\|^2 + \|v_{yy}\|^2 = \min \quad (3.5)$$

v_{ki} ist dabei die Verbesserung eines Stützpunktes P_{ki} – gewichtet mit einem globalen Gewichtungsfaktor P_{ref} –, wohingegen $v_{xx,i,j}$ sowie $v_{yy,i,j}$ die Verbesserungen der fiktiven zweiten Differenzgleichungen mit Beobachtungen 0 darstellen. Dabei wurde für $P_{ref} = 1$ gesetzt.

Für dieses Modell sind dieselben Operatoren wie bei dem analytischen Modell zuvor eingesetzt worden (siehe Abb. 3.23). Aus Darstellungsgründen wurde in dieser Abbildung das Gebiet um 90 Grad gedreht.

a) einfacher Differentiator



Abb. 3.23: Isolinien des Neigungsmodells „Donauwörth“

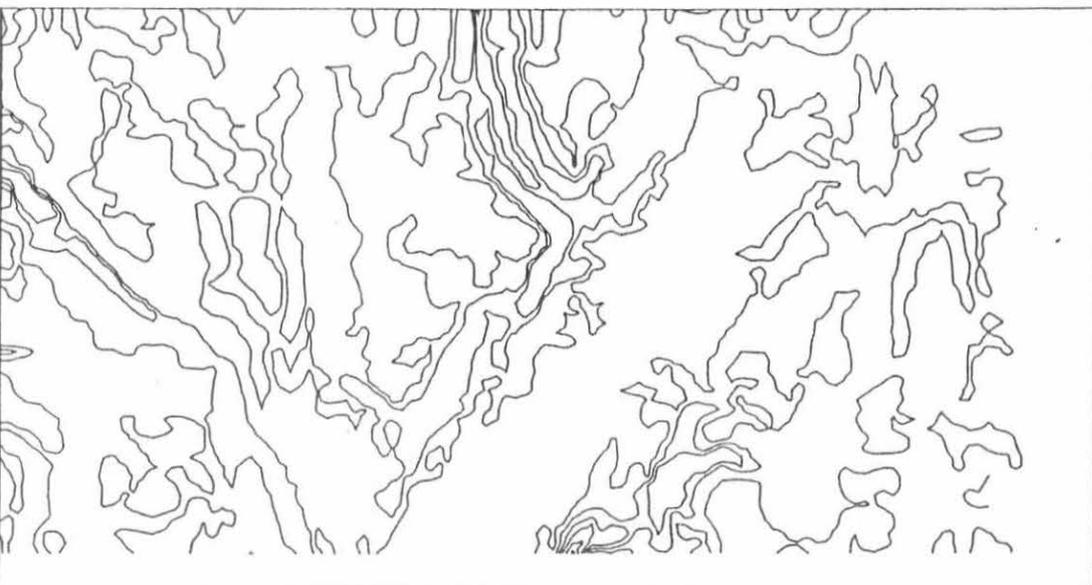
b) Sobel-Operator



c) Differentiator Länge 4



d) Differentiator Länge 5



Fortsetzung Abb. 3.23: Isolinien des Neigungsmodells „Donauwörth“

Ebenso wurde für dieses Gebiet das Neigungsmodell analytisch aus dem DGM berechnet (Abb. 3.24). Ein Vergleich von Abb. 3.24 mit Abb. 3.23 zeigt weitgehende Übereinstimmung mit dem einfachen Differentiator und dem Sobel-Operator, wengleich die beiden letztgenannten Operatoren einen Generalisierungseffekt ausüben. Somit läßt sich feststellen, daß homogenisierte Neigungsinformationen zum einen aus stark geglätteten DGM's durch analytische Differentiation und zum anderen von weniger geglätteten Ausgangsdaten durch numerische Differentiation abzuleiten sind.

Die Berücksichtigung von Geländekanten in weiteren realen Anwendungen kann auf verschiedenen Wegen besprochen werden, von denen zwei aufzuzeigen sind. Zum einen ist die Vektorinformation in einem Flächenmodell "Raster" durch flächenhafte Rasterkonvertierung in Rasterinformation zu transformieren (vgl. W.M. Newman/R.F. Sproull, 1986), so daß ausschließlich Rasterdaten zur Verfügung stehen. Die andere Möglichkeit besteht in der Anpassung des Operators durch Interpolation der Koeffizienten. Dies ist auch erforderlich, wenn mit variablen Maschenweiten gearbeitet wird. In der Abb. 3.25 sind Interpolationen ausgewiesen, wenn z. B. mit dem Sobel-Operator Differenzen in m -Richtung durch Faltung ermittelt werden. Die Koeffizienten sind gem. (2.104) mit dem Faktor von $1/8$ zu normieren.

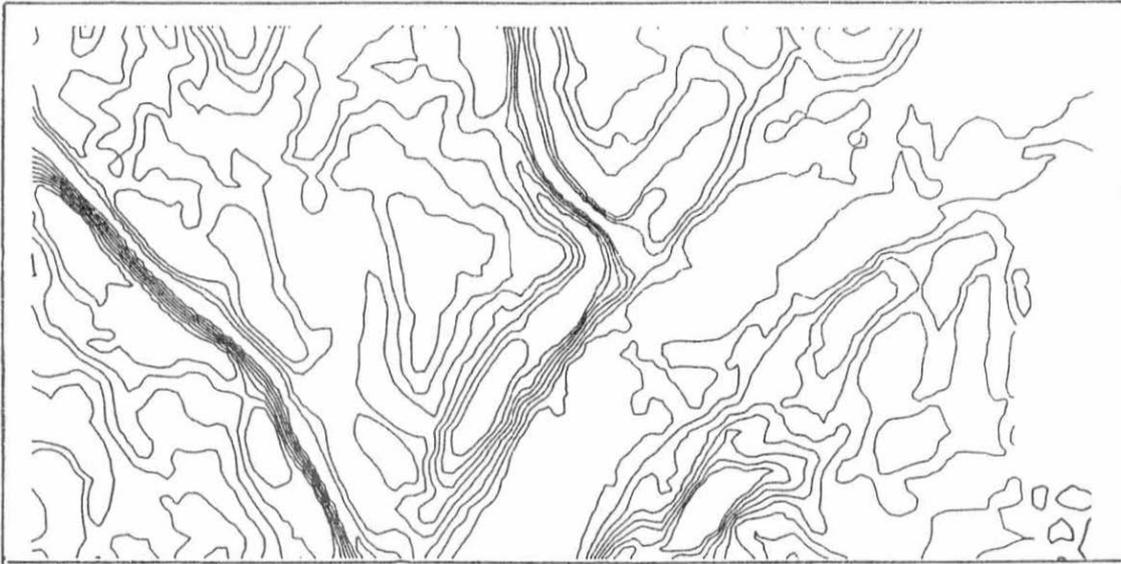


Abb. 3.24: Direkt berechnetes Neigungsmodell

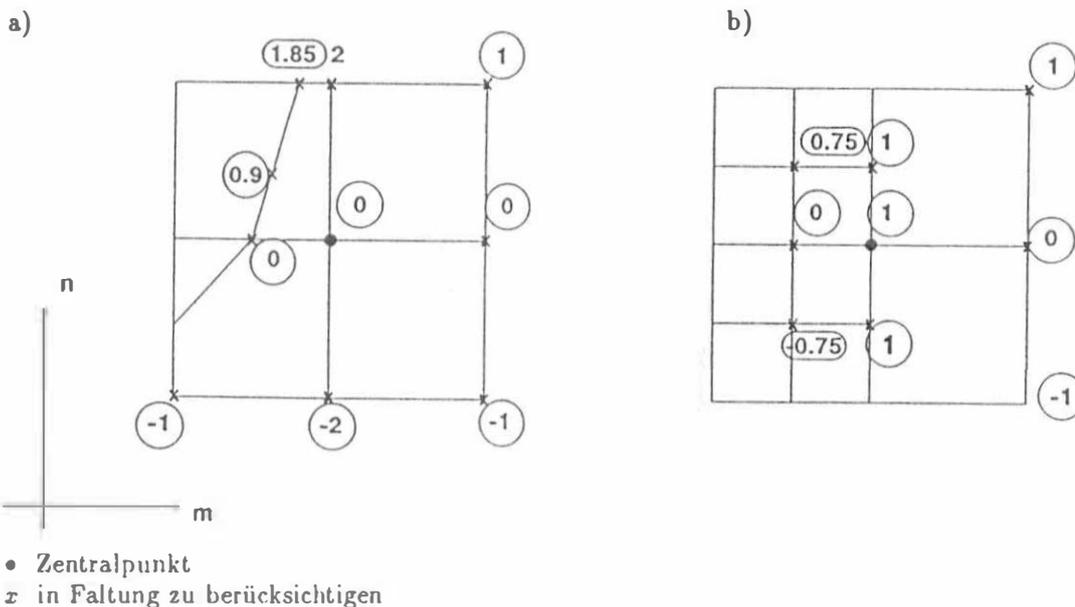


Abb. 3.25: Interpolation der Gewichtungskoeffizienten des Sobel-Operators

a) infolge Kanten b) infolge variablem Raster

3.3.3 Einsatz von digitalen Filtern

Die Verwendung von digitalen Filtern kann innerhalb von Linien- und Rasteranwendungen zur Generalisierung vorteilhaft sein. Zur Demonstration der Leistungsfähigkeit sollen nachfolgend Isolinien eines ungefilterten und eines gefilterten äquidistanten Flächenmodells "Raster" aufgezeigt werden, bei dem die Äquidistanz von 20 [m] auf 40 [m] erhöht wird (siehe Abb. 3.26).

Bezeichnet δ die Grundäquidistanz (Maschenweite) des Rasters, Δ die gewünschte (vergrößerte) Äquidistanz und k den Ausdünnungsfaktor, so ergibt sich nach dem Abtasttheorem (2.2.2) die maximal darstellbare Frequenz zu

$$f_{max} = \frac{1}{2\Delta} = \frac{1}{2 \cdot k\delta} \quad (3.6)$$

Mit $\omega = 2\pi f$ wird schließlich die Schließfrequenz eines selektiven Systems erhalten

$$\omega_s = 2\pi f_{max} = \frac{2\pi}{2k\delta} = \frac{\pi}{k\delta} \quad (3.7)$$

Zum Systementwurf sind die Frequenzen $\omega \in [0, 2\pi/\delta]$ noch zu normieren in $\tilde{\omega} \in [0, 1]$, so daß (3.7) transformiert werden kann in

$$\tilde{\omega}_s = \frac{1}{2k} \quad (3.8)$$

Das zu entwerfende System stellt einen Tiefpaßfilter dar; somit läßt sich der Ausdünnungsprozeß als "Tiefpaßfilterung" interpretieren, indem das ausgedünnte DGM $y(m, n)$ durch Faltung des gegebenen DGM $x(m, n)$ mit den Gewichtskoeffizienten eines Tiefpaßfilters zu berechnen ist.

Wenn auch einem reinen Rastermodell in der Praxis aus geomorphologischen Gründen weniger an Bedeutung zukommt, so ist es dennoch rechentechnisch und aus Gründen seiner Visualisierung an Rasterbildschirmen ein häufig eingesetztes "Zwischenmedium".

Die Generalisierung eines Rastermodells wird nachfolgend wiedergegeben. Der Entwurf eines Tiefpaßfilters von der Länge $K = L = 11$ unter der Vorgabe von $\tilde{\omega}_s$ und der Berücksichtigung der Zielfunktion (2.6) führte zu den gesuchten Gewichtskoeffizienten. In der Abb. 3.27 sind die Isolinien des ungefilterten DGM, eines heuristisch ausgedünnten DGM, indem einfach dazwischenliegende Punkte nicht in Betracht gezogen wurden, und die Isolinien des exakt gefilterten DGM wiedergegeben. Das Ergebnis der Tiefpaßfilterung ist in sich mehr konsistent und wird einer manuellen Generalisierung in vielen Fällen entsprechen.

a) Original

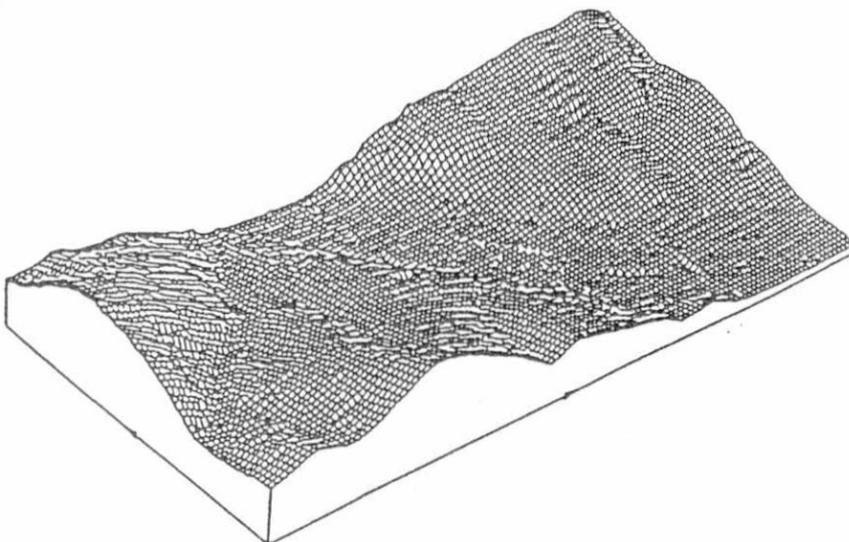
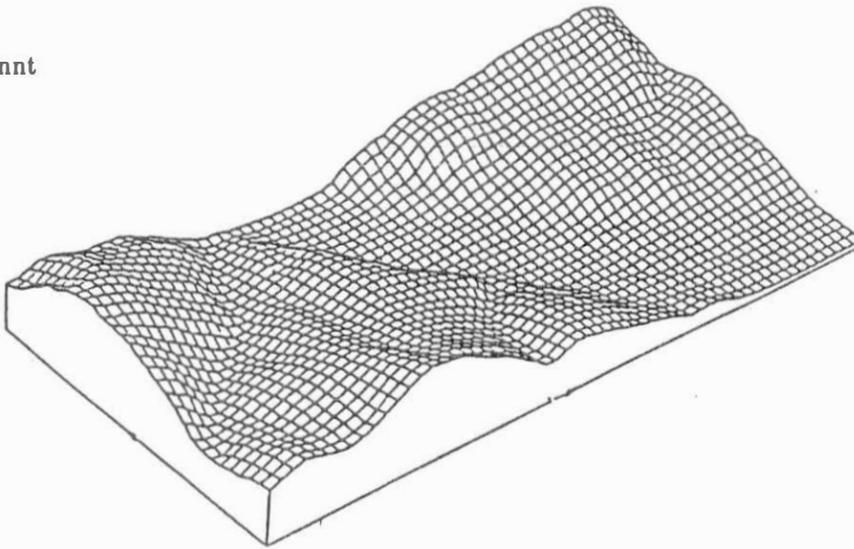


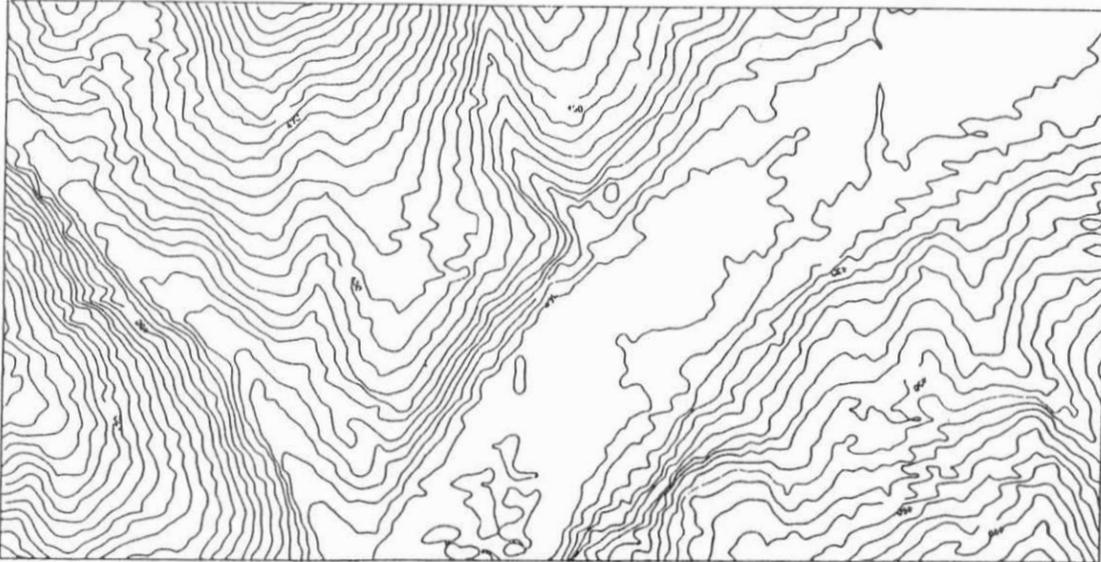
Abb. 3.26: Flächenmodell „Raster“

b) ausgedünnt



Fortsetzung Abb. 3.26: Flächenmodell „Raster“

a) ungefiltert



b) ungefiltert ausgedünnt

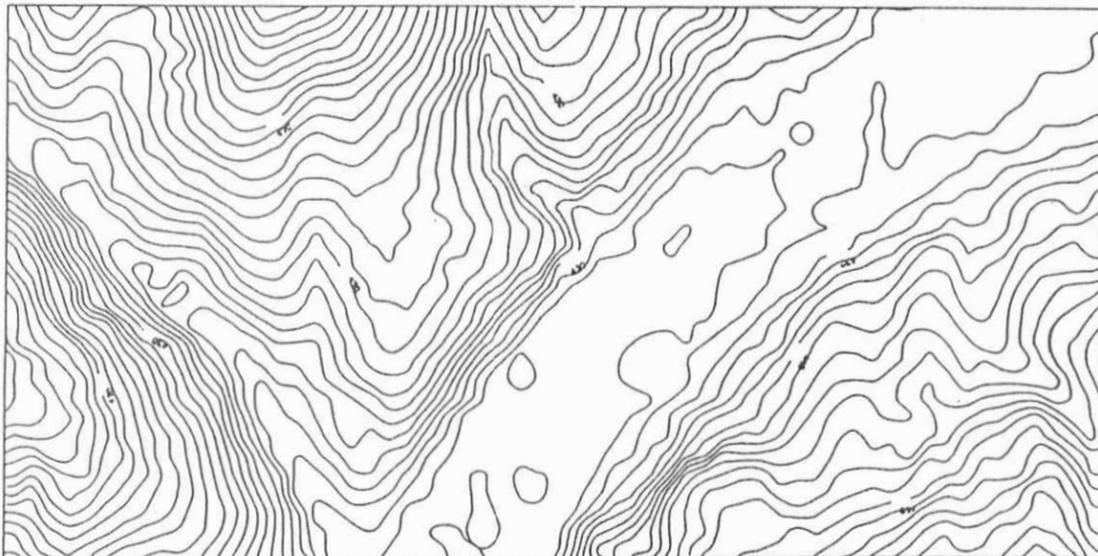
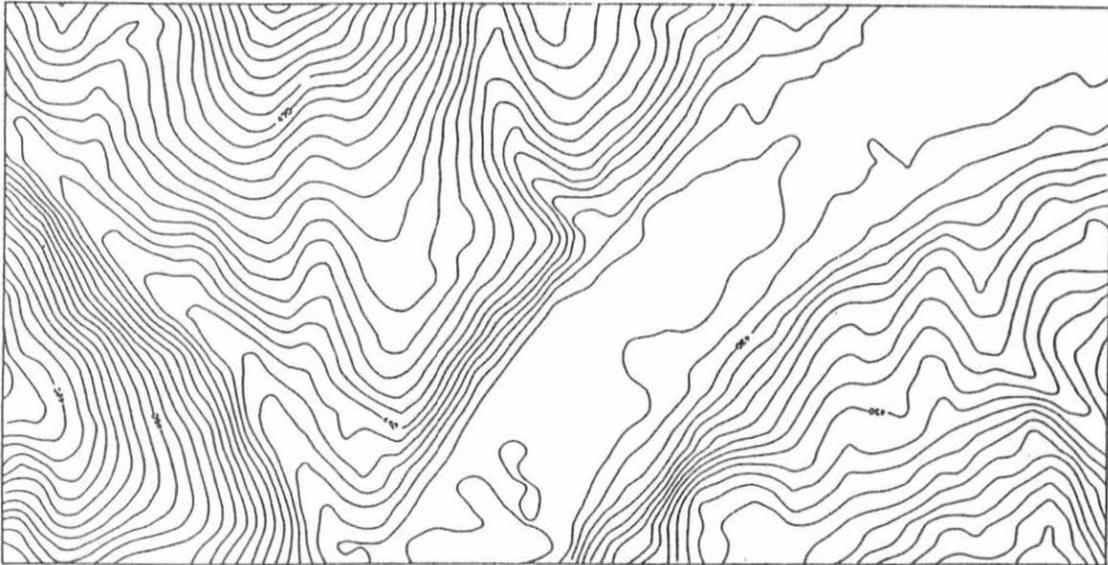


Abb. 3.27: Isolines des ungefilterten und heuristisch gefilterten digitalen Geländemodells „Donauwörth“

c) gefiltert ausgedünnt



Fortsetzung Abb. 3.27: Isolinien des tiefpaßgefilterten digitalen Geländemodells „Donauwörth“

Ein Vergleich dieser Filterung mit analytischen Filterungen ist mit der Abb. 3.28 gegeben. Die Isolinien dieser Filterungen wurden aus DGM's abgeleitet, die nach dem Verfahren der finiten Elemente geglättet worden sind.

Dabei sind 3 Glättungsfaktoren (P_{ref}) – siehe Zielfunktion (3.5) – untersucht worden. Es zeigt sich, daß der Fall $P_{ref} = 1$ annähernd an die exakte Filterung mittels der Vorgabe im Frequenzbereich herankommt. Dies deutet auf die Notwendigkeit hin, Betrachtungen im Frequenzbereich in die Datenanalyse mit einzubeziehen, um die Anzahl der Freiheitsgrade soweit wie möglich einzuschränken. Diese Aussage bezieht sich jedoch lediglich auf einen Wechsel der Äquidistanz. Andererseits belegt das Ergebnis auch die generelle Verwendbarkeit der Methode der finiten Elemente, die in der Lage ist, Forderungen des Frequenzbereichs zu erfüllen.

a) $P_{ref} = 1$

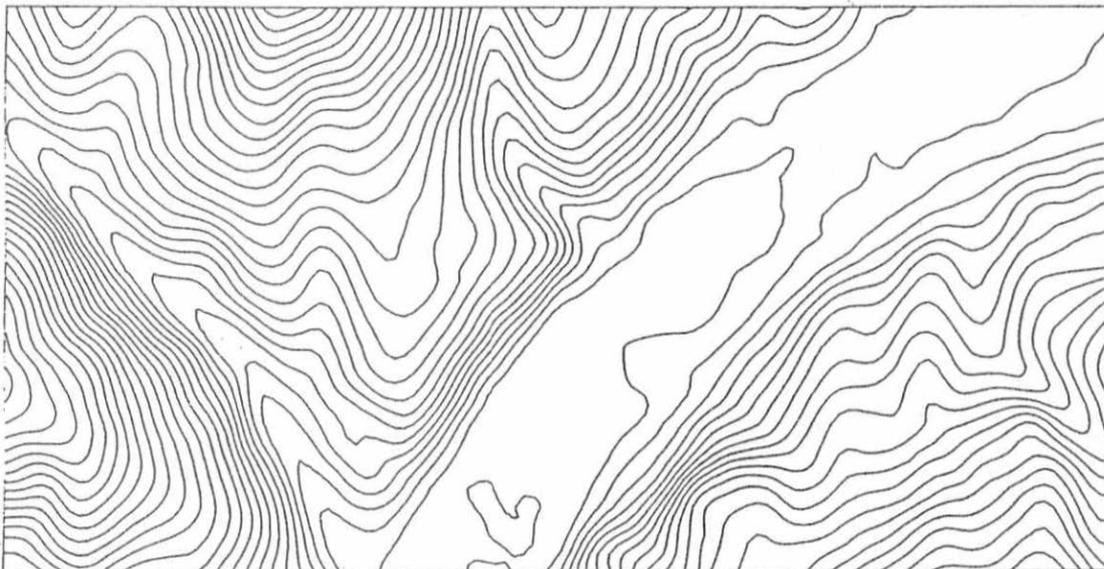
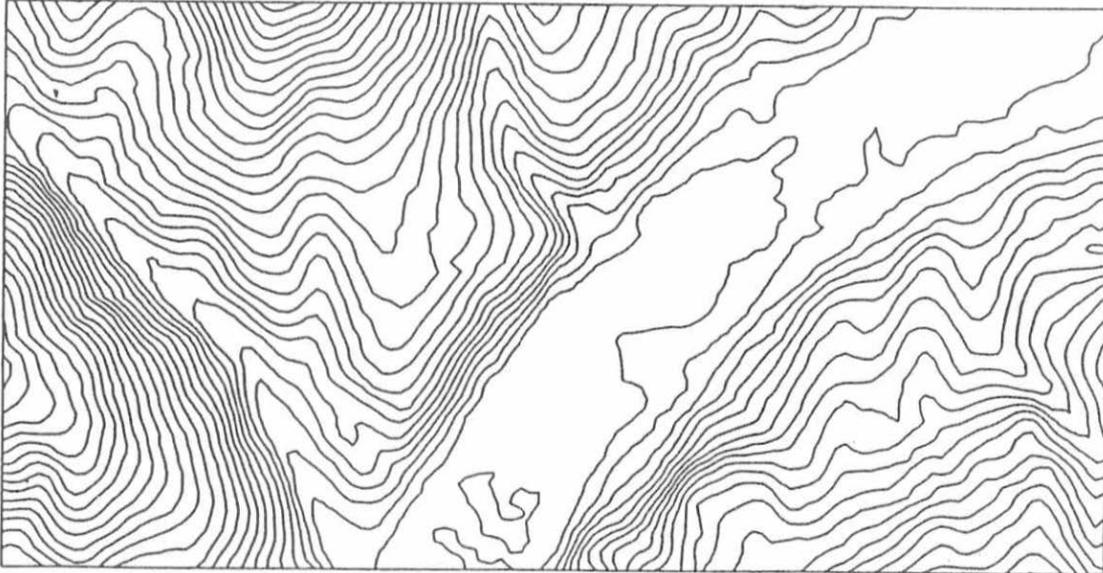
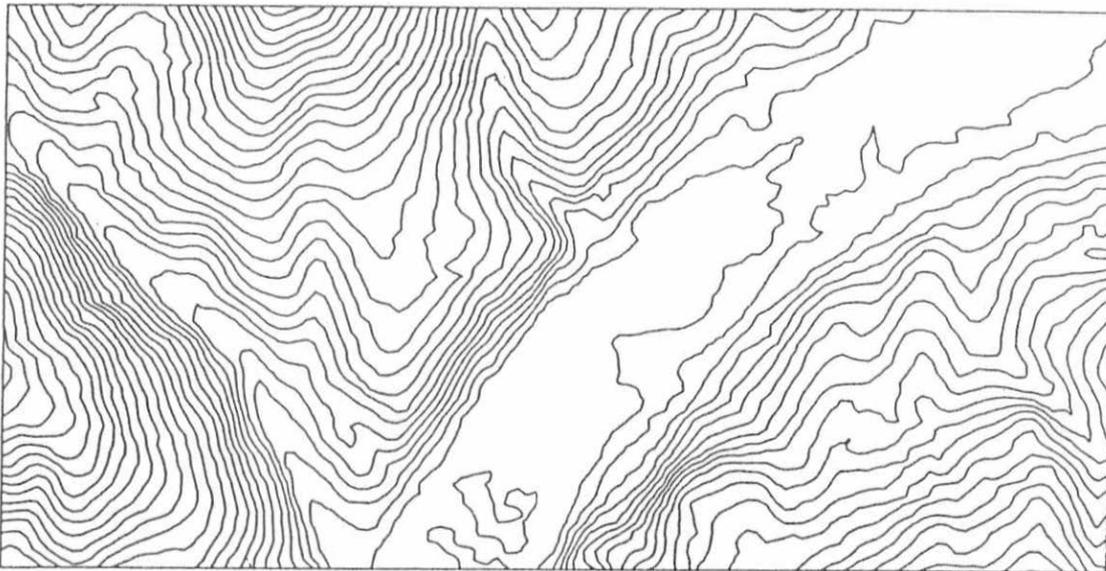


Abb. 3.28: Isolinien von analytisch gefilterten DGM

b) $P_{ref} = 5$



c) $P_{ref} = 10$



Fortsetzung Abb. 3.28: Isolines von analytisch gefilterten DGM

Ferner können Geländeschummerungen den Einsatz von digitalen Filtern bedingen, wenn weiche Übergänge innerhalb des geschummerten Objekts zu gewährleisten sind (Gouraud-Schattierung oder Phong-Schattierung, W.M. Newman/R.F. Sproull, 1986).

Die Berücksichtigung von selektiven Vektorinformationen (Geländekanten etc.) erfolgt bei der Anwendung von digitalen Filtern am besten in reinen Rastermodellen, so daß die Vektoren in Rasterinformationen zu überführen sind.

3.4 Abfrageräume für Geländeinformationssysteme

Da bisher die raumbezogene Datenhaltung überwiegend im \mathbb{R}^2 durchgeführt wird, und die Höhe in den meisten Anwendungen lediglich als Attribut zur Verfügung steht, ist zu vermuten, daß die Praxis bisher mit dieser Art der Höhenintegration ausgekommen ist. Um jedoch der Vielfalt der sich in der Realisierung und Planung

befindlichen Informationssysteme nachzukommen, sollen im folgenden Abfrageräume aufgezeigt werden. Diese Abfrageräume sind allgemein gefaßt und auch als Abfragebereiche zu verstehen; sie sind nicht von der Struktur der Daten abhängig. Dabei ist unterschieden in

- A) den großmaßstäblichen Bereich 1 : 100 – 1 : 10 000 , in dem überwiegend Netz- und Landinformationssysteme aufgebaut werden
- B) den mittleren und kleinen Maßstabsbereich 1 : 10 000 – 1 : 100 000 000, dem auch Landinformationssysteme sowie Raum- und Umweltinformationssysteme zuzuordnen sind.

Der nachfolgend aufgeführte Aufgabenkatalog ist durch Gespräche mit Fachleuten und Literaturstudium entstanden und erhebt keinesfalls den Anspruch auf Vollständigkeit. Damit sollen lediglich bisherige Vorgehensweisen überprüft und die evtl. Notwendigkeit einer besseren Höhenintegration abgeleitet werden.

3.4.1 Abfragen innerhalb großer Maßstäbe

Zu den Fragestellungen großer Maßstäbe führen die Anwendungen im Vermessungswesen – insbesondere die Flurbereinigung und Kartographie – dem Ingenieur- und Anlagenbau, sowie der Energieversorgungsunternehmen (EVU).

I. Flurbereinigung

- a) Darstellung von Neigungsinformationen (Isolinien, vektorielle oder Raster-Darstellungen von Neigungsklassen und Neigungsrichtungsklassen) in Kombination mit der Grundrißinformation (z. B. Flurstücksgrenzen, Bodenzahlen)
- b) Automatische Ermittlung und graphische Darstellung von Abschlagsflächen
- c) Ermittlung und Darstellung erosionsgefährdeter Lagen vermittelt Neigungsinformationen
- d) Darstellung von Flurbereinigungsmaßnahmen mittels synthetischer Geländebilder zur Verträglichkeitsprüfung des Wegebbaus, Landschaftsgestaltung und Neueinteilung

II. Amtliche Kartographie

- a) Darstellung von Höhenpunkten mit ausgezeichneter Lage in der Karte
- b) Ableitung und Darstellung von Höhenlinien
- c) Interaktive Veränderung von Höhenlinien infolge kartographischer Generalisierung, Berücksichtigung von Aussparungsflächen, Zwischenhöhenlinien und Höhenlinienbezifferung
- d) Automatische Darstellung sowie interaktive Konstruktion von Böschungen mittels Karteninformationen
- e) Erstellung von Luftbildkarten (Basis: Orthophotos)

III. Verkehrswegebau (K. Wehner et al., 1979)

- a) Berechnung der Höhenlage (Gradiente) und der Neigung der Verkehrsachse
- b) Ableitung von Höhen der Fahrbahnränder aus den Gradientenhöhen, der Fahrbahnneigung und der Fahrbahnbreite
- c) Berechnung von Längs- und Querprofilen für unterschiedliche Trassenvarianten
- d) Ableitung von Querschnitten und Erdmassenberechnungen für unterschiedliche Trassenvarianten (auch während der Bauarbeiten zur Ermittlung der Arbeitsleistung)
- e) Berechnung von Linien größeren Gefälles für die Projektierung der Entwässerung
- f) Ermittlung von Sichtfeldbegrenzungen und Sichtweiten
- g) Umweltverträglichkeitsprüfung des geplanten Projekts mit der Landschaft durch Projektion in ein (synthetisches) Geländebild

IV. Städtische Planungen

- a) Sammlung von Höhenfestpunkten als Grundlage für allgemeine Bauvorhaben
- b) Sichtlinienprüfung für Bauvorhaben innerhalb historischer Straßenzüge
- c) Dreidimensionale Darstellung von Häuserblöcken als Hilfe für Planungen zur Erweiterung oder Änderung der Bebauung
- d) Gemeinsame Darstellung geplanter und vorhandener Architektur zur Beurteilung der Verträglichkeit neuer Bauwerke mit dem vorhandenen Stadtbild
- e) Darstellung von Isolinienplänen des Grundwasserverlaufs sowie des Verlaufs geologischer Schichten für Planungen von Tiefbaumaßnahmen (U-Bahn, Kanalbau)
- f) Ermittlung der zu bewegenden Erdmassen für Tiefbaumaßnahmen
- g) Ermittlung der Auswirkungen von Tiefbauten auf den Grundwasserverlauf

V. Leitungs- und Kanalwesen

- a) Darstellung von Leitungsprofilen
- b) Ermittlung der Neigung von Leitungen
- c) Berechnung von Oberflächenabständen von Leitungen (sowohl ober- als auch unterirdisch)
- d) Berechnung von Höhenlagen für Kanalanschlüsse aus vorgegebenen Mindestneigungen
- e) Überprüfung von Abstandsbedingungen an bestehende oder zu projektierende Leitungen (Mindestabstände zur Oberfläche, zu Gebäuden oder zu anderen Leitungen)

VI. Wasserwirtschaft

- a) Messung von Pegeln (Grundwasser, stehende und fließende Gewässer) sowie Darstellung ihres zeitlichen Verlaufs
- b) Messung und Darstellung von Flußprofilen zur Feststellung der Auswirkungen von Flußbaumaßnahmen (Flußsperrren, Dämme) und zur Kontrolle der Schiffbarkeit
- c) Ableitung von Isolinien und Wasservolumina für stehende Gewässer aus der Vermessung von Seeböden und Pegelständen
- d) Ermittlung von überfluteten Landflächen für festgelegte Pegel (Hochwassersimulation, Staumauersimulation) und Einteilung nach der Nutzung (Bebauung, landwirtschaftliche Nutzflächen)
- e) Darstellung von Flurabständen (Abstand zwischen Oberfläche und Grundwasser) in Flurabstandskarten
- f) Ermittlung von Einzugsbereichen des Oberflächenwasserabflusses
- g) Untersuchungen für die Lawinenvorhersage (Geländeform, Geländeneigung, Zusammensetzung der Schneedecke, Temperatur etc.)

VII. Kohlebergbau (II. Fuchs, 1975)

- a) Ermittlung der Flözvolumina und Abraumvolumina im Braunkohletagebau
- b) Darstellung von Höhenlinien zusammen mit der Situation (z. B. Förderbandanlagen, Beleuchtungseinrichtungen, Leitungen etc.)
- c) Ableitung beliebiger Geländeprofile im Tagebau
- d) Darstellung von Isolinien gleicher Grundwasserabsenkung

3.4.2 Abfragen innerhalb mittlerer und kleinerer Maßstäbe

Während durch die Ingenieurwendungen der Abfrageraum im großen Maßstabsbereich sehr vielfältig ist, sind im mittleren und kleineren Maßstabsbereich viele amtliche Informationssysteme auf die Höhenintegration angewiesen. Mit der Einleitung des *Amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystem (ATKIS)*,

(AdV 1988) ist landesweit ein digitales Geländemodell zur Verfügung zu stellen, da es eine Komponente des *digitalen Landschaftsmodells* (DLM) ist (siehe Abb. 3.29).

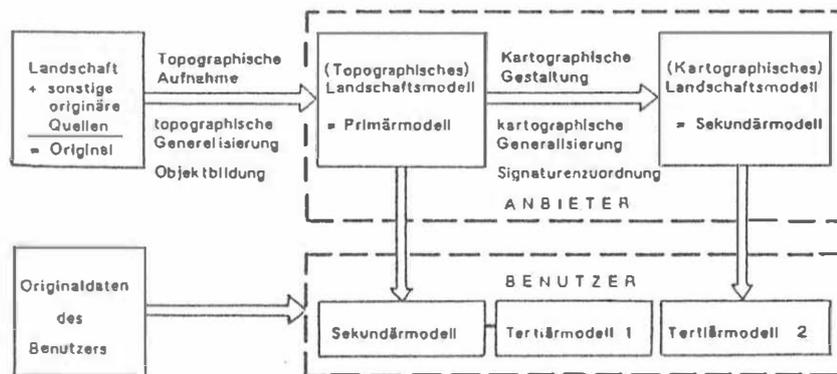


Abb. 3.29: Verschiedene Landschaftsmodelle im Informationssystem ATKIS

ATKIS durchläuft den mittleren und den kleinen Maßstab, indem digitale Landschaftsmodelle im Maßstab 1 : 25 000 (DLM 25), 1 : 200 000 (DLM 200) und 1 : 1 000 000 (DLM 1000) einzurichten sind. Adäquate Informationssysteme zu ATKIS sind das in Bayern einzurichtende *Geographische Grundinformationssystem (GEO-GIS)* und das *Topographische Informationssystem (TOPIS)* der Bundeswehr. Innerhalb dieser Maßstabsskala ergeben sich weitere Abfragen

I. Amtliche Kartographie

a – e) aus 3.4.1

f) synthetische Geländedarstellungen in orthogonalen und perspektiven Projektionen

II. Physikalische Geodäsie

- Reduktion von Schwerewerten
- Ableitung und Überprüfung von Dichtemodellen (Isotasie)
- Potentialberechnungen
- Überprüfung von Modellen in der Gezeitenforschung (Meeres- und Erdzeiten)

III. Nachrichtentechnik

- Ableitung der Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen im Erdfunk
- Projektion von Empfangsanlagen im Satellitenfunk

IV. Raumordnung und Umwelt

- Lärmbelästigung
- Ableitung von erosionsgefährdeten Gebieten mittels Neigungsmodelle
- ökologische Bewertungen von Verkehrsverbindungen (Lärmschutz, Emission)
- Überprüfung der Schadstoffausbreitung von Industriebetrieben, indem mittels des DGM Strömungsmodelle aufgebaut werden (Beispiel: Ferntransport von Schadstoffen ist in der Ebene gering, tritt jedoch in Gebirgstälern stark konzentriert auf)
- Entzerrung von Satellitenszenen sowie Elimination von Schatten
- Einrichtung von Fahrzeugnavigationssystemen

Mit den hier aufgezeigten Abfragen ist die Vielfalt von Fragestellungen bezüglich der Höheninformationen aufgezeigt. Eine Charakterisierung dieses Katalogs entsprechend den Ausführungen von M. Molenaar (1989) ergibt die Zuordnung zu einem "nicht eingeschränkten" Abfrageraum (unrestricted query space). Im Gegensatz dazu ergibt sich durch die Vorgabe von Datenstrukturen ein "eingeschränkter" Abfrageraum, da nur das abgefragt werden kann, was durch die Datenstruktur zur Verfügung gestellt wird.

3.5 Integration von Geländemodellen in raumbezogene Informationssysteme

Mit den vorliegenden Ausführungen bieten sich zur Erweiterung einer raumbezogenen Datenhaltung im \mathbb{R}^2 die folgenden drei Modelle an

1. die Attributierung oder Sachdatenabsorption
2. die Anbindung eines Geländeinformationssystems an ein raumbezogenes Informationssystem
3. die totale Integration eines Geländeinformationssystems in ein raumbezogenes Informationssystem

Während Modell 1 lediglich die Kombination von geometrischer und nichtgeometrischer Information ausnutzt, werden mit den Modellen 2 und 3 erweiterte geometrische und nichtgeometrische Möglichkeiten zur Verfügung gestellt.

3.5.1 Sachdatenabsorption

Innerhalb der Sachdatenabsorption werden jedem geometrischen Element Attribute zugeordnet, wobei ein Attribut

- A. die Höhe des Elements sein kann
- B. einen Bezug zu einer Fachdatei mit Höheninformation herstellt

Zu A.)

Die geometrischen Elemente Punkte, Linien und Flächen können verschiedene Attribute besitzen, die Höheninformationen beinhalten. Punkthinformationen wären die Höhe in einem Punkt, die Maximalneigung sowie die Neigungsrichtung in einem Punkt, wohingegen als Linieninformationen Höhen- und Neigungsdifferenzen aufzufassen sind. Als flächenbezogene Höheninformationen werden z. B. die mittlere Höhe und oder Neigung eines Flurstücks sowie Gebäudehöhen vorgehalten.

Zu B.)

Bei einer Attributhinterlegung von großer Tiefe wird das Ebenenprinzip empfohlen. Hier kann jede einzelne Ebene die spezielle Höheninformation aufnehmen. Als Beispiele seien aufgeführt

E_1	:=	Punkthöhen
E_2	:=	Neigungen
E_3	:=	Grundwasserspiegel
\vdots	:=	
E_n	:=	Höhen von Überlandleitungen

die jeweils in eigenen Fachdateien verwaltet werden können. Das einzelne Attribut ist dabei lediglich als *Zeiger* auf die entsprechende Fachdatei aufzufassen. Auf diese Weise läßt sich die Geometrie mit beliebigen Höheninformationen hinterlegen. Während bisher stillschweigend die Vektorgraphik vorausgesetzt wurde, läßt sich die Rastergraphik ebenso unter B.) einreihen. Das in Abschnitt (3.1.2.1) eingeführte Griding ist ein thematischer Raster, der mit dem Ebenenprinzip beliebig aufgeweitet werden kann. Somit können auch für jedes Rasterelement viele Höheninformationen zur Verfügung stehen.

Die Sachdatenabsorption eignet sich besonders gut für Ereignisse, in denen punktuell vorgegangen wird. Mögliche Abfragen sind die Ableitung von Höhenunterschieden, die Berechnung von Neigungen und Profilen entlang der Geometrie. Liegt die punktuelle Information sehr dicht vor, die z. B. in dichtbesiedelten Ballungsgebieten wie Städten und Gemeinden, so kann die Sachdatenabsorption, d. h. die Zuweisung der z -Koordinate als Attribut zu den x, y -Koordinaten auch als digitales Geländemodell bezeichnet werden. Dies ist die Ursache dafür, daß das Kanal- und Leitungswesen mit diesem Modell der Höhenintegration auskommt, da die vorhandenen graphischen Elemente in ausreichender Dichte zur Verfügung stehen.

In der Abb. 3.20 ist ein Beispiel für die Sachdatenabsorption aus dem EVU-Bereich wiedergegeben. Abschließend sei bemerkt, daß gerade eine beliebige Sachdatenhaltung ein RIS als "leistungsfähig" auszeichnet.

PUNKTNUMMER	1000051E	2000051E	3000051E	4000051E	5000051E	6000051E
HALTUNG	1	2	3	4	5	
LAENGE	37.67	43.83	63.77	50.86	49.59	
PROFIL	RR 600/600	RR 600/600	RR 600/600	E1 600/900	E1 600/900	
SOHLHOEHE	56.33 52.89	55.23 52.15	54.78 51.92	54.08 51.43	53.37 51.13	52.12 50.59
GELAENDEHOEHE						

Abb. 3.30: Sachdatenabsorption im RIS SICAD

3.5.2 Anbindung eines Geländeinformationssystems an ein raumbezogenes Informationssystem

Die Anbindung von digitalen Geländemodellen an ein raumbezogenes Informationssystem muß dann geschehen, wenn die Sachdatenabsorption zur Beantwortung der Ereignisse nicht ausreicht. Mit dem Ausbau zum Geländeinformationssystem ist ein Subinformationssystem gegeben, daß sich in die vorhandene DV-Umgebung ohne Effizienzverlust integrieren lassen sollte. Mit den in 3.1.4 gegebenen Ausführungen läßt sich ein Geländeinformationssystem über die externen Schnittstellen "Methode" und "Daten" an ein übergeordnetes raumbezogenes Informationssystem anbinden. Innerhalb der Datenschnittstelle kann jedoch nochmals in die Schnittstellen "Datenfile" und "Datenbank" unterteilt werden. Somit stehen die drei Wege der Datenübertragung

- A.) Methodenschnittstelle (MS)
- B.) Datenfileschnittstelle (DFS)
- C.) Datenbankschnittstelle (DBS)

zur Verfügung, auf die im folgenden näher einzugehen ist.

Zu A.) Methodenschnittstelle:

Die Methodenschnittstelle erlaubt den miteinander kommunizierenden Informationssystemen eine *offene* Kommunikation. Somit kann die Datenübertragung zum steuernden System direkt durch Aufruf von Unterprogrammen des gesteuerten Systems erfolgen. Ist das steuernde System ein RIS und das gesteuerte System ein GelIS, so ist durch die Offenlegung des Zugriffs (Variablen, Datenfelder) der Informationsaustausch innerhalb des Hauptspeichers möglich. Die aufgerufenen Unterprogramme greifen bei Bedarf auf die Geländedatenbank zu, ebenso wie das im RIS ausführende Programm auf die raumbezogene Datenbank.

Zu B.) Datenfileschnittstelle:

Die Datenfileschnittstelle liegt zwischen der Ebene der Methodenschnittstelle und Datenbankschnittstelle. Sie gewährleistet den Informationsaustausch zwischen den Anwendungsprogrammen der beiden Systeme oder von den Anwendungsprogrammen des GelIS in die raumbezogene Datenbank des RIS. Das Anwendungsprogramm des RIS erzeugt einen Auftragsfile, den das Anwendungsprogramm des GelIS entschlüsseln muß. Dazu ist ein

Wechsel vom Programmsystem des RIS auf das DGM-Programm notwendig. Dieses bearbeitet den Auftrag und erzeugt einen Ergebnisfile. Nach dem Wechsel des Programmsystems werden die Resultate entweder in die raumbezogene Datenbank eingetragen oder vom ausführenden Programm übernommen und weiterverarbeitet.

Zu C.) Datenbankschnittstelle:

Die Datenbankschnittstelle überträgt direkt die Daten von der einen Datenbank in die andere. Dabei sind fest-vorgegebene Formate zu beachten (Beispiel: EDBS = Einheitliche Daten-Bank-Schnittstelle, H. Sellge, 1987). Somit sind in beiden Datenbankverwaltungssystemen Programme für die Verschlüsselung und die Entschlüsselung erforderlich. Erst nach der Datenübertragung stehen diese den Anwendungsprogrammen zur Verfügung.

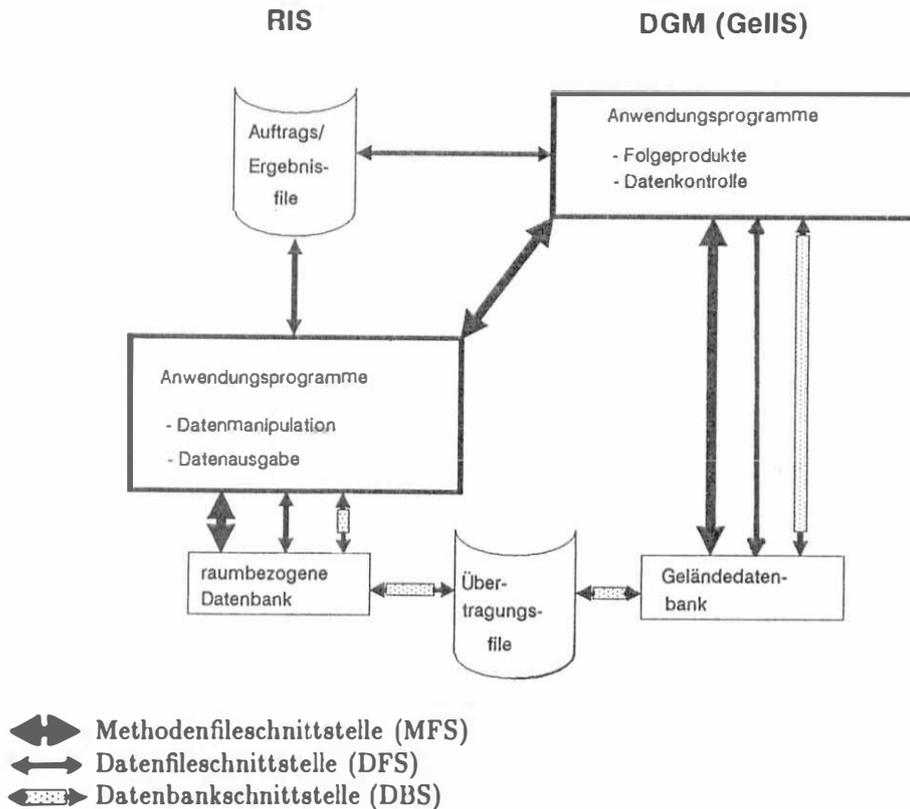


Abb. 3.31: Datenübertragung vermittelt Schnittstellen

Mit der Abb. 3.31 sind die Wege der Datenübertragung verdeutlicht, für die in R. Würländer (1988) Erfahrungen wiedergegeben werden. Es zeigt sich, daß die MS und die DFS der DBS vorzuziehen sind, weil damit Datenredundanzen vermieden und der Zugriff beschleunigt wird (siehe Tabelle 3.1). Darüberhinaus ist die MS der DFS vorzuziehen. Alle drei Schnittstellen sollten "bidirektional" sein, d. h. daß der Austausch sowohl zwischen dem RIS (steuernd) und GeIS (gesteuert) als auch umgekehrt sein kann.

Tabelle 3.1: Vor- und Nachteile der drei Schnittstellen

Kriterium	Schnittstelle		
	MS	DFS	DBS
Programmieraufwand	mittel	mittel	mittel
Datenredundanz	wenig	wenig	hoch
Zugriffszeit	schnell	langsam	langsam
techn. Realisierung	schwierig	einfach	einfach

Die Realisierung von MFS bedingt jedoch eine verträgliche Umgebung der miteinander kommunizierenden Systeme (z. B. Betriebssystem UNIX, konsistente Programmiersprachen C und FORTRAN 77). Der Programmieraufwand ist erst dann als gering anzugeben, wenn die beiden Systeme aufeinander abgestimmt sind.

Die Vorteile der Anbindung von GellS an RIS sind zwiefältig: Zum einen kann das RIS auf alle Möglichkeiten des GellS zurückgreifen und umgekehrt sowie zum anderen kann das GellS die interaktiven graphischen Editiermöglichkeiten des RIS nutzen.

3.5.3 Totale Integration

3.5.3.1 Problemstellung Die totale Integration setzt die Verschmelzung eines Geländeinformationssystems mit einem raumbezogenen Informationssystem voraus. Hierzu gibt es zwei unterschiedliche Vorgehensweisen, die auch sinnvoll miteinander kombiniert werden können. Diese sind

- Dreidimensionale Koordinaten für alle Elemente
- Digitale Geländemodelle als Komponenten der raumbezogenen Datenbank.

Während die erste Methode sehr aufwendig ist, da neben den Lageelementen noch zuzügliche Höhenelemente wie z. B. Gebäudefirste, herausragende Gebäudeteile etc. gespeichert werden müssen, die dann durch räumliche Operationen miteinander zu verknüpfen sind, ist die zweite Vorgehensweise die einfachere Methode. Da Grundrißelemente nur in Ballungsgebieten hinreichend dicht vorliegen, in ländlichen Gebieten jedoch "tote Räume" zu überbrücken sind, ist die zweite Möglichkeit auch der pragmatischere Weg.

Dabei ist jedoch folgendes zu berücksichtigen: Zum einen sollte die Datenspeicherung möglichst redundanzarm sein, um die Datenmenge auf ein Minimum zu reduzieren, und andererseits sind jedoch bezüglich einer schnellen Reaktion des Systems bestimmte Erwartungen zu erfüllen. Ausgehend von der Abb. 3.32 kann ein Objekt an der Erdoberfläche durch seine Geometrie und Thematik dargestellt werden, wobei die Geometrie wiederum zu unterteilen ist in Geländewiedergabe, Grundrißdarstellung sowie die Kombination von beiden. Letztere führt dann zu einem dreidimensionalen Datenmodell.

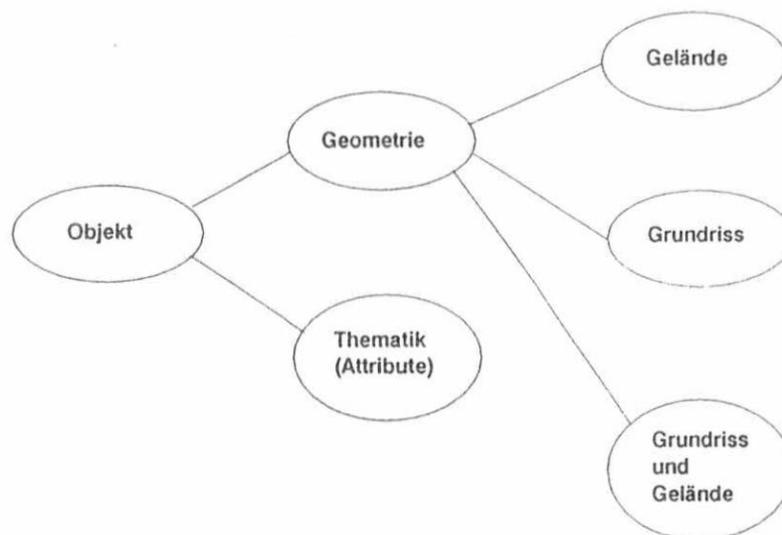


Abb. 3.32: Objektdefinition

Die Notwendigkeit der Verknüpfung von Geländeinformation mit der Grundrißdarstellung soll an den folgenden drei Beispielen demonstriert werden

1. Eine Geländekante kann eine Straßengrenze der Grundrißdarstellung sein
2. Eine Aussparungsfläche des DGM repräsentiert den Umring eines stehenden Gewässers (See, Talsperre etc.)
3. Ein Gebäude des Grundrisses wird zur Aussparungsfläche des DGM.

Aus diesem Grund müssen den Geometrielementen weitere thematische Identifikatoren zugeordnet werden, um separierte Fragestellungen hinsichtlich Grundriß und Gebäude zuzulassen.

Wird ein DGM in Korrespondenz zur Grundrißdarstellung als eine Menge von Punkten, Linien und Flächen aufgefaßt, so müssen diese Grundrißidentifikatoren enthalten. Bereits bei der DGM-Datenerfassung sind diese Identifikatoren mitzuteilen, um die anschließende Integration zu erleichtern. Dies führt zu verschiedenen "Integrationsattributen", auf die auch in F. Steidler et al. (1986b) hingewiesen wird. Dabei kann i.d.R. mit jeweils vier Identifikatoren per geometrisches Element ausgekommen werden (siehe Abb. 3.33).

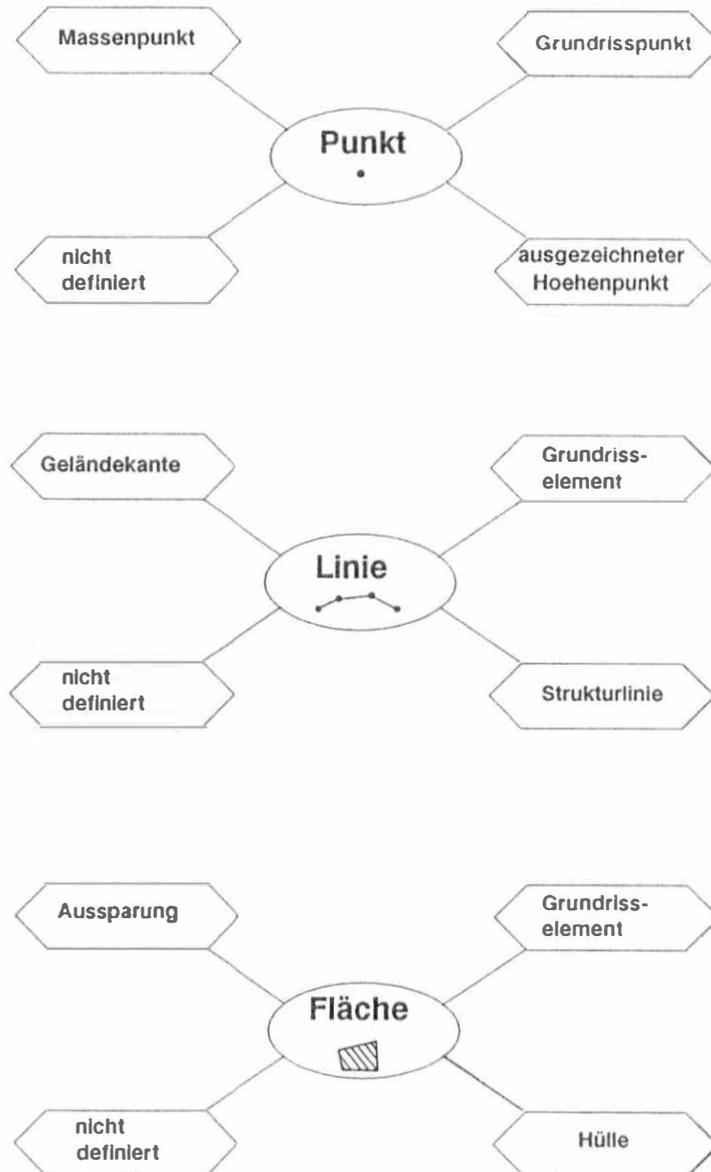
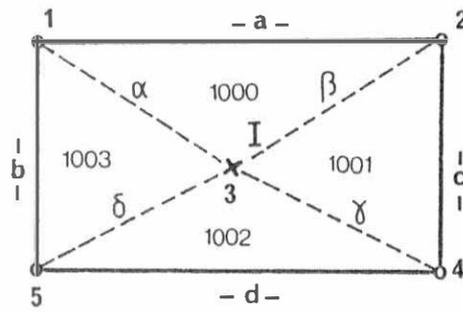


Abb. 3.33: Identifizierung von DGM-Elementen

Das Fehlen dieser Identifikation kann nur durch interaktive "Einpassung" des DGM in die Grundrißdarstellung behoben werden, was dennoch Fehlinterpretationen nicht ausschließt.

3.5.3.2 Vollständig dreidimensionale Datenhaltung In einer vollständig dreidimensionalen Datenhaltung gibt es nur eine Datenbank für die Geometriedaten. Diese Datenbank kann in der Form eines Netzwerks oder total relational organisiert sein. Am Beispiel Abb. 3.34 soll diese Form der Datenhaltung in einem relationalen Modell demonstriert werden.

a) Dreidimensionales Objekt "Flurstück"



I Flurst. Nr. I
1002 Dreieck-Nr. 1002

b) Datenhaltung

Punkt - Nr.	Koordinaten	Kanten Grundriß	Kanten Gelände
1	x_1, y_1, z_1	a, b	a, α , b
2	x_2, y_2, z_2	a, c	a, β , c
3	x_3, y_3, z_3		α , β , γ , δ
4	x_4, y_4, z_4	c, d	c, γ , d
5	x_5, y_5, z_5	b, d	b, δ , d

"0-Tabelle" (Punkte)

Kante	Anf. Pkt.	End - Pkt.	Fläche links Grundriß	Fl. rechts	Fläche links Gelände	Fl. rechts
a	1	2	0	I	0	1000
b	1	5	I	0	1003	0
c	2	4	0	I	0	1001
d	4	5	0	I	0	1002
α	1	3	-	-	1000	1003
β	2	3	-	-	1001	1000
δ	3	5	-	-	1002	1003

"1-Tabelle" (Linien)

Fläche (Grundriß)	Flächen-Nr. (ID)	Kanten
1	I	a, b, c, d

"2-Tabelle" (Flächen Grundriß)

Fläche (Gelände)	Kanten	Hülleninformation Außenpkt.-Nr.
1000	a, α , β	1
1001	c, β , γ	2
1002	d, γ , δ	4
1003	b, α , δ	5

"2-Tabelle" (Flächen Gelände)

Objekt	Objektnamen
1	Flurstück I

"Objekt-Tabelle"

Flächen - Nr.	Größe	Eigentümer
I	350m ²	Hans Müller, x Stadt

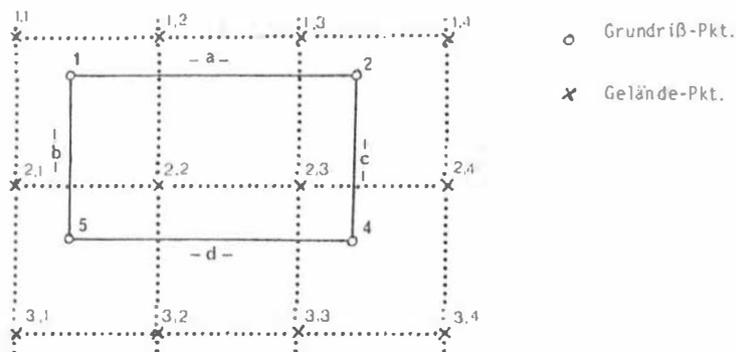
"Eigentümer-Tabelle"

Abb. 3.34: Dreidimensionale Datenspeicherung von Flurstück I mittels Triangulation

Ein Vergleich dieser Datenspeicherung mit der Organisationsform für Dreiecke zeigt, daß hier eine vollständige Organisation nach Flächen, Kanten und Punkten vorliegt. Dieses kleine Beispiel soll verdeutlichen, daß eine totale Integration von 3D-Information generell möglich ist. Jedoch steigt der Aufwand in der Datenhaltung durch die simultane Flächenverwaltung der Geländeinformation immens an.

Ist nun die Geländeformation im Flächenmodell "Raster" definiert, so zerfällt die metrische Information in zwei Listen, da die Rasterpunkte durch ihre Topologie nur in der z -ordinate vorliegen müssen (siehe Abb. 3.35).

a) Dreidimensionales Objekt "Flurstück I"



b) Datenhaltung

Punkt-Nr.	Koordinaten	Kanten
1	x_1, y_1	a, b
2	x_2, y_2	a, c
4	x_4, y_4	c, d
5	x_5, y_5	b, d

"0-Tabelle" (Grundriß)

i \ j	1	2	3	4
1	z_{11}	z_{12}	z_{13}	z_{14}
2	z_{21}	z_{22}	z_{23}	z_{24}
3	z_{31}	z_{32}	z_{33}	z_{34}
4	z_{41}	z_{42}	z_{43}	z_{44}

"0-Tabelle" (Gelände)

Kante	Anf. Pkt.	End-Pkt.	Fläche links	Fläche rechts
a	1	2	0	I
b	1	5	I	0
c	2	4	0	I
d	4	5	0	I

Flächen	Flächen-Nr. (ID)	Kanten
1	I	a, b, c, d

In Analogie zur Abb. 3.35 folgen noch die Objekt- und Eigentümer-Tabelle

Abb. 3.35: Dreidimensionale Datenspeicherung von Flurstück I mittels Rastermodell

Die Geländeinformation für die Grundrißelemente fällt i. d. R. nicht direkt an, sondern ist durch einfache Interpolation (z. B. bilinear) zu ermitteln. Jedoch schrumpft die Datenhaltung dabei auf ein Minimum. Deshalb

werden Systeme mit aufwendiger topologischer Verwaltung für den dreidimensionalen Zugriff stets langsamer reagieren können, als dies bei der Integration von Rastermodellen der Fall ist.

In der Tabelle 3.2 sind Merkmale einer dreidimensionalen Datenbank wiedergegeben. Dabei wird unterschieden hinsichtlich des Datenzugriffes, des Datenumfanges und der umfassenden 3D-Beschreibung (Leistung).

Tabelle 3.2: Datenbankmerkmale bei Geländeintegration

Flächenmodell	Datenzugriff	Datenumfang	Leistung
Raster	sehr schnell	wenig	zufriedenstellend
Triangulation	langsam	umfangreich	sehr gut
Hybrid	schnell	mittel	sehr gut

Jedoch kommt man mit einfachen Datenstrukturen in der vollständigen 3D-Beschreibung nicht aus. Dies führt zur Weiterentwicklung von formalen Datenstrukturen, die gerade erst für 2D-Objekte entwickelt worden sind (M. Molenaar, 1989). Die Erweiterung besteht in der Zuordnung der Klassen von Abb. 3.35 zur Geländedarstellung (G+), Grundrißwiedergabe (G++) sowie der Kombination (G+++)

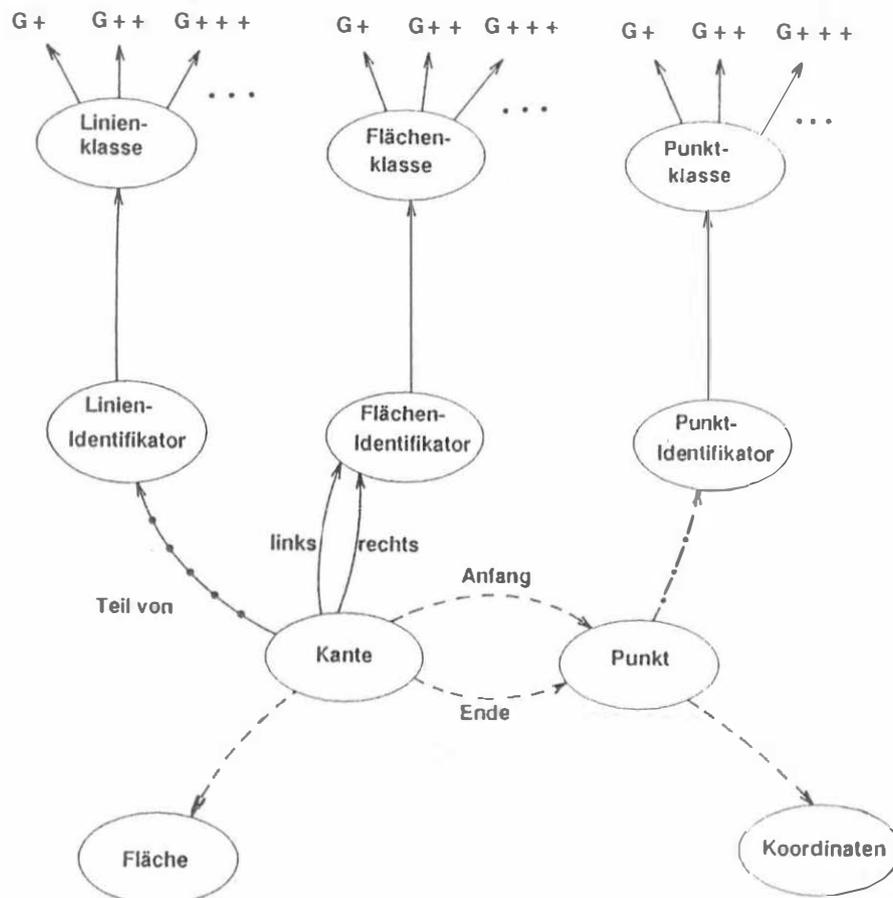


Abb. 3.36: Datenstruktur für Vektorinformationen

Es lassen sich beispielsweise die folgenden Zuordnungen angeben

Punkt-klasse: Grenzpunkt (G++), Geländemassenpunkt (G+ und G+++), top. Einzelpunkt (G+, G++), Kanaldeckel (G+++), trig. Punkt (G+++), Polygonpunkt (G++), Hausecke (G++)

Linienklasse: Straße (G++, G+++), Uferlinie (G++, G+++), Strukturlinie (G+, G+++), Geländekante (G+, G+++), Flußsystem

Flächenklasse: Haus-Grundriß (G++), See (G++), Flurstück (G+++), öffentliche Wege (G++), Dreieck (G+, G+++), Rastermasche (G+, G+++)

Damit kann sogleich sichergestellt werden, daß z. B. ein Hausgrundriß oder ein See als Aussparungsfläche innerhalb einer Geländeanalyse zu sehen ist.

Bei der vollständigen Integration müssen in der Methodenbank des RIS ebenso alle Module zur Ableitung von DGM-Folgeprodukten vorhanden sein.

3.6 Bestandsaufnahme verfügbarer Systeme mit Höhenintegration

Auf das Problem der Integration von digitalen Geländemodellen in raumbezogene Informationssysteme wurde bereits mit B. Makarovic (1977a) hingewiesen. Da kommerzielle Systeme erst mit Beginn dieses Jahrzehnts angeboten werden, und die bisherige Nachfrage nach einer raumbezogenen Datenhaltung sich überwiegend auf den \mathbb{R}^2 beschränkt hat, können Höhenprobleme derzeit in allen angebotenen Systemen zumindest über die Sachdatenabsorption gelöst werden. Zur Beurteilung von weiteren Möglichkeiten einer dreidimensionalen raumbezogenen Datenhaltung werden stellvertretend für kommerziell verfügbare Systeme die folgenden RIS analysiert: ALK-GIAP (Industrieanlagenberatungsgesellschaft, Ottobrunn), ARC/INFO (ESRI), INFOCAM (Kern), RIS-Intergraph (Intergraph), PRIME WILD S9 (Prime-WILD) und SICAD (Siemens). Dabei ist Bezug zu nehmen auf die Datenstrukturen, Datenbankmodelle und Schnittstellen, um eine Klassifikation zu erleichtern. Die Zusammenstellung bezieht sich auf den Stichtag 31.12.1989.

3.6.1 ALK-GIAP

Das Informationssystem "Graphisch-Interaktiver Arbeitsplatz (GIAP)" der Automatisierten Liegenschaftskarte dient der Erfassung, Fortführung und Benutzung kartenbezogener Daten. Es ist wesentlicher Bestandteil des ALK-Verarbeitungsteils (G. Mittelstraß, 1987), der mit dem ALK-Datenbankteil über die Einheitliche-Daten-Bank-Schnittstelle (EDBS) kommunizieren kann.

Für die Datenverwaltung gibt es eine Datenbank, die das Modell der ALK benutzt (G. Rossol, 1987). Dabei werden die Grundrißdaten in zwei Dateien gespeichert: der Objektdatei und der Objektteildatei. Dies entspricht in seiner Form dem objektorientierten Datenmanagement. In der Objektdatei ist die fachliche Einheit das Objekt, in der Objektteildatei ein Punkt, eine Linie oder ein Text. Die Struktur der GIAP-Datenbank läßt sich in das Netzwerkmodell einreihen.

Eine Höhenintegration ist bisher im ALK-GIAP nur durch die Sachdatenabsorption möglich. Dabei kann auf ein spezielles Attribut "Höhe" zurückgegriffen werden, so daß für jeden Punkt der Geometrie ein Höhenwert verfügbar sein kann. Ebenso kann der Bezug zu einer Sachdatei mit Höheninformationen hergestellt werden. Sinnvoll sind hierfür jedoch im wesentlichen nur punktförmige Objekte. Des weiteren ist es auch möglich, über das Attribut für die Sachbedeutung Objekte mit Geländeinformation zu hinterlegen. Bei den Objekten, den Objektteilen und den graphischen Elementen ist jeweils ein Attribut für den Objektschlüssel vorhanden. Der Objektschlüsselkatalog für die Anwendungen des ALK-GIAP enthält bereits Objekte für die Darstellung der Geländeform, die nach dem Ebenenprinzip in zwei Ebenen "Natürliche Topographie" und "Künstliche Topographie" zusammengefaßt sind.

Über eine Anbindung des DGM-Programmsystems HIFI-88 an den ALK-GIAP, die bereits realisiert ist, wird in R. Höbner/R. Würmländer (1989) berichtet - vgl. hierzu auch IABG (1989). Dabei ist der Weg über die Methodenschnittstelle eingeschlagen worden.

Zentraler Bestandteil von HIFI-88 ist eine Datenbasis, die zum einen überregionale Gebiete verwalten kann, und zum anderen einen schnellen Zugriff auf die Teilregionen zuläßt. Dabei ist das DGM in hierarchisch verwaltete Teilgebiete gegliedert, die auf der untersten Stufe sowohl ein Flächenmodell "Raster" mit variabler Maschenweite als auch ein hybrides Flächenmodell enthalten können. Die Triangulierung erfolgt nach dem Prinzip von Delauney, wobei jedoch die geomorphologische Zusatzinformation wie z.B. Geländekanten Dreieckskanten darstellen. Aus dem DGM werden unter strenger Berücksichtigung dieser Datenstrukturen die in 3.2.2 angegebenen Vektor- und Rasterprodukte abgeleitet.

Die Integration beinhaltet die Verfügbarkeit des DGM im Hauptspeicher des ALK-GIAP. Bei jedem Editiervorgang wird das DGM im Hauptspeicher fortgeführt, so daß für die DGM-Datenbasis sowie für die DGM-Folgeprodukte der jeweils aktuelle Stand vorliegt (H. Ebner et al., 1990).

3.6.2 ARC/INFO

ARC/INFO ist ein raumbezogenes Informationssystem, das neben den Modulen für die Erfassung und das Management von graphischen Daten diverse Analysefunktionen und Verfahren für die Erzeugung von thematischen Karten bereithält. Die Namensgebung resultiert aus den beiden Säulen ARC, in der die topologische Datenstruktur und die Metrik abgespeichert sind, und INFO, einer relationalen Datenbank, welche die Sachdaten verwaltet. Die Dateien der Punkte, Linien und Flächen sind in einem Netzwerk organisiert, das sich nur auf Lageinformationen (x, y -Koordinaten) abstützt.

Lineare Objekte, wie z. B. Straßen und Begrenzungsflächen aller Art werden mit Linienzügen (ARCS) abgebildet, an dessen Anfang und Ende sich jeweils die Punkte (Knoten) befinden. Die von den Linienzügen eingeschlossenen Flächen werden dabei als *Polygone* bezeichnet. Für die Verknüpfung der Punkte, Linien und Flächen dienen Zeigertabellen, d. h. die Flächen werden auf die Linienzüge abgebildet, die Linienzüge wiederum auf die Punkte (vgl. Abb. 2.26). Theoretisch kann für jedes der geometrischen Objekte eine Attributstabelle angelegt werden, wobei aus praktischen Gesichtspunkten Attributstabellen meistens nur für Linien und Flächen angelegt sind (H. Junius, 1988, M. Sittard, 1988).

Dadurch wird zur Mitführung der Höhe durch Sachdatenabsorption wenig Gebrauch gemacht. Hierzu steht ein eigenes Programmsystem TIN (Triangular Irregular Network) zur Verfügung. Die Dreiecksvermaschung beruht auf der Triangulation nach Delauney, wobei bisher noch keine Zwangsbedingungen in der Form von Geländekanten explizit vorgegeben werden können. Eine Veränderung der Dreiecksstruktur kann nur durch interaktiven Eingriff erfolgen. Die Organisation der Dreiecke ist mit der Abb. 2.18 gegeben.

In TIN sind neben dem DGM-Aufbau durch Dreiecksvermaschung weitere Methoden zur Ableitung von Vektorprodukten sowie Volumina-Berechnungen angeboten. Die 3D-Beschreibung erfolgt durch das Ebenenprinzip, indem die Geometrie der Lage und die Triangulierung überlagert werden. Bisher ist die Lage von der Höhe noch streng getrennt, d. h. die Triangulierung kennt keine Aussparungsflächen, die durch die Lagegeometrie vorgegeben sind (z. B. Gebäude). Da TIN in die ARC/INFO-Umgebung vollständig integriert ist, erfolgt der Zugriff auf die einzelnen Programmodule durch Methodenschnittstellen.

Zur Ableitung von Rasterprodukten kann auf das Bildverarbeitungspaket ERDAS der Fa. CIS zurückgegriffen werden.

3.6.3 INFOCAM

Das raumbezogene Informationssystem INFOCAM wurde aus den Bedürfnissen des Vermessungswesens heraus entwickelt. Zur Datenanalyse und Datenmanipulation stehen insgesamt sieben Module zur Verfügung, von denen zwei einen direkten Bezug zur 3D-Beschreibung haben: TASCAL als System zur Auswertung von tachymetrischen Daten, sowie ATOS bzw. SCOP als DGM-Programmsystem. Bisher sind ATOS und SCOP noch nicht in INFOCAM integriert; es existiert lediglich eine off-line Verbindung mittels Datenfiles für ATOS. Es ist jedoch beabsichtigt, das Programmsystem SCOP über die Methodenschnittstelle in INFOCAM zu integrieren, während ATOS weiterhin off-line zu nutzen ist.

In ATOS wird die Delauney-Triangulation eingesetzt, bei der jedoch auch Zwangsbedingungen berücksichtigt werden können. Die Steuerung bei der Vermaschung erfolgt über Prioritäten der verschiedenen Linien- und Punkttypen. Diese sind sogleich die einzigen topologischen Grundprimitiven, so daß die Dreiecksvermaschung nach dem in Abb. 2.19 gegebenen Schema in einer eigenen Datenbank verwaltet wird.

Mit ATOS sind neben dem DGM-Aufbau weitere Folgeprodukte in Vektorform zu erstellen: hierzu gehören die Interpolation von Höhenlinien, die Ausgabe von Neigungsklassen, Berechnung von Einzelhöhen, Profilen und Volumina, Ableitung von Sichtbarkeitsgebieten, die Interpolation eines regelmäßigen Rasters sowie axonometrische und perspektivische Ansichten.

Das DGM-System SCOP nutzt ein Flächenmodell "Raster" als Datenstruktur, in das jedoch noch selektive geomorphologische Informationen wie Geländekanten, Strukturlinien und Einzelpunkte integriert sind. Die Rastergröße ist variabel und kann daher der Geländeundulation angepaßt werden. Als Folgeprodukte stehen die unter 3.2.2 aufgezählten Vektorprodukte zur Verfügung.

Die Verknüpfung mit der Lage ist bisher noch nicht vollständig realisiert; jedoch können Folgeprodukte von

ATOS und SCOP zur Herstellung der Datenkonsistenz mit dem Modul IMAGE editiert werden. Die Lage wird entsprechend der in Kap. 2 gegebenen Trennung in Metrik, Topologie und dem objektorientierten Management verwaltet. Für einen schnellen Zugriff ist das Prinzip der dynamischen Zellteilung eingesetzt, wobei jedoch für eine längerfristige Datenhaltung die relationale DB ORACLE eingesetzt wird.

Der Sachdatenabsorption ist bei der Entwicklung und Bereitstellung von Methodik bisher keine Bedeutung zugemessen worden.

3.6.4 INTERGRAPH-RIS

Die Fa. INTERGRAPH bietet mit ihrem raumbezogenen Informationssystem die Möglichkeiten der Sachdatenabsorption sowie der totalen Höhenintegration. Während für Anwendungen im Leitungskataster die Sachdatenabsorption empfohlen wird (H. Güntsch, 1988b) ist für eine großräumige 3D-Beschreibung ein DGM-Modul vorhanden. Abhängig von den Ausgangsdaten können Dreiecksvermaschungen oder regelmäßige Raster zur DGM-Generierung eingesetzt werden. Auch hier ist die Lage von der Höhe getrennt und wird über Identifikatoren miteinander verknüpft. Während die Graphik – sowohl Lage als auch Höhe – durch index-sequentielle Files in der Datenbank vorgehalten ist, sind die Attributtabelle in der relationalen DB INFORMIX abgelegt. Dies hat den Vorteil, daß die Graphik sehr schnell auf dem Bildschirm aufgebaut werden kann, wozu darüberhinaus noch ein eigener Graphikprozessor zur Verfügung steht. Andererseits ist für Attributabfragen die SQL der RDB einzusetzen.

Als Folgeprodukte werden sowohl Vektor- als auch Rastergraphiken angeboten. Vektorseitig sind dies Höhen-, Neigungs- und Sichtbarkeitslinien, Profile, Perspektiven u.a.m., wohingegen als Rasterprodukte Höhenschichten, Neigungsklassen, Neigungsrichtungsklassen, Reliefs, Anaglyphenbilder, und auch Projektionen von Fernerkundungsdaten auf ein DGM angeboten werden. Darüberhinaus kann sogar interaktiv im DGM trassiert werden, welches durch 3D-Animation noch zu überprüfen ist.

Die Einbindung der DGM-Module innerhalb der RIS-Umgebung ist hier ebenfalls über Methodenschnittstelle gelöst.

Eine neue Komponente der DGM-Verwaltung und Analyseverfahren ist mit dem Produkt TIGRIS (Topologically Integrated Geographic Resources Information System) schon seit längerer Zeit angekündigt. In die TIGRIS-Umgebung ist der TIGRIS-Modeler eingebunden, der speziell zur 3D-Beschreibung entwickelt wird. Während der TIGRIS-Analyst und der TIGRIS-Imager gerade fertiggestellt und ausgeliefert sind, ist mit der Verfügbarkeit des Modelers mit Mitte des Jahres 1990 zu rechnen.

3.6.5 PRIME-WILD S9

Das raumbezogene Informationssystem S9 der Fa. PRIME-WILD ist vollständig relational aufgebaut. Als RDB wurde dabei das kommerziell verfügbare System EMPRESS eingebunden. Auch hier ist die Höhe von der Lage getrennt und wird über Identifikatoren verbunden (vgl. Abb. 2.28).

Das DGM liegt als Flächenmodell "Dreiecke" vor, wobei als Dreiecksvermaschung das Verfahren nach Delauney eingesetzt wird. Während des DGM-Aufbaus sind Zwangsbedingungen zu berücksichtigen; jedoch kann ebenso nachträglich eine optimale Dreiecksstruktur durch Editieren der Graphik erzeugt werden.

Innerhalb der Höhendatenbank sind die Originaldaten, die DGM-Struktur in der Form der Dreiecksvermaschung (auch regelmäßige Raster können an die Stelle der Dreiecksvermaschung treten) und, falls als notwendig erachtet, abgeleitete Höhenlinien vorhanden. Entsprechend den Ausführungen in Abschnitt 2.4.2.4 bildet jeder dieser Datensätze eine Objektklasse, die dann topologisch geordnet in der Datenbank zur Verfügung stehen.

Durch die Identifikatoren ist eine konsistente Datenhaltung gewährleistet, indem nach zusätzlichen Ausparungsflächen wie Gebäude usw. abgefragt wird.

Auch hier steht eine breite Palette von DGM-Folgeprodukten in Vektor- und Rasterform zur Verfügung (F. Steidler et al. 1986). Infolge der integrierten Lösung von Höhendaten ist bei diesem System einer Sachdatenabsorption keine große Bedeutung beigemessen worden. Bleibt abschließend noch zu vermerken, daß aus der UNIX-Umgebung heraus auf Kodierungen in C zurückgegriffen wird und keine Schnittstellenprobleme anfallen.

3.6.6 SICAD

Wie bereits mit der Abb. 3.30 angedeutet, ist eine Möglichkeit der Höhenintegration im RIS SICAD der Fa. Siemens die Sachdatenabsorption. Diese wird besonders im Energieversorgungsbereich genutzt – Unterstützung findet dieses Modell durch eigene Analysemodule (Beispiel: SICAD – KANAL).

Die Datenstruktur der Graphik ist topologisch entsprechend den Elementen Punkt, Linie und Fläche aufgebaut, wobei als Datenbankmodell das Netzwerk (vgl. Abb. 2.26) eingesetzt wird. Für die Attribute steht eine RDB zur Verfügung; auch hier erfolgt die Verknüpfung von Graphik und Sachdatensätzen durch Identifikatoren (K. Fischer, 1983).

Um eine flächenhafte Versorgung mit Höheninformationen sicherzustellen, wurde das DGM-Programmpaket SCOP über eine Datenfileschnittstelle angebunden. Aus diesem Anschluß heraus ist der Modul SICAD-SCOP entstanden, der folgende Funktionen gewährleistet

- Lesen und Schreiben von SCOP-Eingabedaten
- Darstellung von SCOP-Folgeprodukten (Vektorgraphik)
- Einzelhöhenberechnung
- Schreiben und Lesen von Profildaten

Untersuchungen zur Integration des DGM-Programmsystems HIFI-88 in SICAD über die Methodenschnittstelle sind gerade angelaufen.

Abschließend wird eine Zusammenstellung der zuvor erwähnten RIS gegeben, in der nach den drei vorgestellten Modellen zur Höhenintegration klassifiziert wird.

Tabelle 3.3: Höhenintegration in raumbezogene Informationssysteme

Anbieter	RIS	Attribut	GeIs			totale Integration
			MS	DFS	DBS	
Fa. IABG, Ottobrunn	ALK-GIAP	x	HIFI-88	–	–	–
Fa. ESRI, Kranzberg	ARC/INFO	x	TIN	–	–	–
Fa. Kern, Aarau	INFOCAM	x	– SCOP	ATOS	–	–
Fa. INTERGRAPH, München	INTERGRAPH – RIS	x	–	–	–	x
Fa. Prime-Wild, Zürich	S9	x	–	–	–	x
Fa. Siemens, München	SICAD	x	–	SCOP	–	–

4 Zusammenfassende Empfehlungen zur Integration von Geländedaten

Nachfolgend sollen die vorangegangenen Ausführungen genutzt werden, um Definitionen und Empfehlungen zur Lösung des Problems der Höhenintegration aufzuzeigen. Dabei wird unterschieden in die Attributierung (Sachdatenabsorption), Geländeinformationssysteme und geschlossene Darstellungen im \mathfrak{R}^3 .

4.1 Sachdatenabsorption

Die Sachdatenabsorption ist die einfachste, doch wenig leistungsfähige Art der Höhenintegration. Wenn auch im Kataster und Energieversorgungsbereich vielfach mit dieser Beschreibung auszukommen ist, so soll diese Methode nicht unter eine 3D-Datenhaltung eingeordnet werden. Vielmehr ist dabei die Lage punktuell um die Höhe ergänzt, so daß hierfür die 2.5-Beschreibung oder $\mathfrak{R}^{2.5}$ -Datenhaltung eingeführt wird.

Eine Begründung zu dieser Definition ist folgendermaßen gegeben: da die Güte der 3D-Wiedergabe von der Datendichte der Lagepunkte abhängt, ist eine hinreichende, zusammenhängende Beschreibung des \mathfrak{R}^3 nur in Ballungsgebieten möglich (und vielleicht hier noch mit Einschränkungen). Dagegen versagt diese Art der Höhenverwaltung außerhalb von Besiedlungsflächen vollständig. Als Beispiele seien große zusammenhängende Flächenstücke im \mathfrak{R}^2 oder aber alpine Regionen genannt.

4.2 Geländeinformationssysteme

Ein Informationssystem, daß sich den Aufgaben stellt

- DGM-Daten effizient zu verwalten
- Methoden zur Ableitung von Vektor- und Rasterprodukten anzubieten
- Konsistenzprüfungen durchzuführen
- Abfragen jeder Art hinsichtlich der Geomorphologie zu beantworten
- Schnittstellen zum Anschluß an RIS zu bedienen

darf als Geländeinformationssystem (GELIS) bezeichnet werden.

4.2.1 Datenverwaltung

Innerhalb der Datenverwaltung sind entsprechend den Flächenmodellen "Raster", "Dreiecke" und "Hybrid" verschiedene Empfehlungen anzusprechen.

Rastermodelle können durch Objektbildung mit nachfolgender Quadtree-Struktur sehr effizient verwaltet werden. Unter Objektbildung ist dabei die Unterteilung in verschiedene Teilgebiete zu verstehen, die wiederum in Subteilgebiete (vgl. Abb. 2.29) zu unterteilen sind. Eine Quadtree-Struktur kann dann auf das Flächenmodell eines Subteilgebietes angewendet werden. Realisierungen dieser Art der Datenverwaltung für DGM-Daten finden sich in K. Kraus (1983).

Für Dreiecksvermaschungen wird die vollständige Beschreibung mittels Dreiecksflächen empfohlen. Wenn auch die Fortführung dabei etwas erschwert ist, so ist diese Art der Verwaltung vorteilhaft bei der Ableitung von Folgeprodukten wie Isolinien, Schummerungen etc., da das gesamte Flächenmodell gezielt durch seine Flächenelemente (Dreiecke) repräsentiert wird (F. Steidler et al., 1986).

Das hybride Modell ist entsprechend vorangegangener Ausführungen ebenfalls effizient mit dem Vorschlag für Rastermodelle zu verwalten, wobei für die Dreiecke wiederum die Dreiecksflächen mit einbezogen werden sollten (H. Ebner et al., 1988).

Die Originaldaten sollten nur im einfachsten Fall als Listen zur Verfügung stehen. Auch hier sind Überlegungen zu einer effizienten Verwaltung anzustellen und – wenn möglich – zu realisieren. So sind für im Rastermodus erfaßte Massendaten dieselben Voraussetzungen gegeben wie für die Flächenmodelle "Raster" und "Hybrid". Über eine Realisierung dieser Empfehlung wird in H. Ebner/R. IIößler (1988) berichtet.

Für anfallende Attribute kann das relationale Datenmodell herangezogen werden. Die Verknüpfung der Attributstabellen untereinander als auch mit den Datenfiles der Metrik und Topologie geschieht vermittels der Identifikatoren.

4.2.2 Vektor- und Rasterprodukte

Die Leistungsfähigkeit eines GellIS ist neben seiner Möglichkeit einer effizienten DGM-Datenverwaltung durch die Kapazität zur Ableitung von Vektor- und Rasterprodukten gegeben. Hierbei wird auf die Aufzählung in 3.2.2 verwiesen. Während damit Basisprodukte angegeben sind, können Spezialanwendungen durchaus weitere Vektor- und Rasterprodukte ergeben (Beispiele: Sichtbarkeitsanalysen, Abstrahldiagramme, Umweltverträglichkeit von CAD-Modellen etc.).

4.2.3 Konsistenzprüfungen

Konsistenzprüfungen sind immer dann notwendig, wenn der Datenbestand innerhalb einer DGM-Datenbank verändert wird. Zu unterscheiden ist dabei in die Überprüfung der Topologie und der Metrik.

Eine notwendige Bedingung zur Konsistenz der Topologie stellt der Satz von Euler dar. Ebenso können hinreichende Bedingungen – wie in 2.3.2 mit weiteren topologischen Beziehungen angegeben – abgefragt werden.

Die Überprüfung der Metrik kann dagegen – wenn überhaupt – nur in den Anwendungen erfolgen.

4.2.4 Abfrageraum eines GellIS

Der Abfrageraum eines GellIS ist – wie in 3.4 aufgezeigt – ein komplexes Gebilde und setzt sich zusammen aus den Anforderungen einzelner Fachbereiche. Während mit den Vektor- und Rasterprodukten schon ein großer Teil des Abfrageraums abgedeckt wird, können zusätzliche Abfragen bzgl. der Attribute gewünscht sein. Dies bedingt jedoch als Voraussetzung die Erfassung und Bereitstellung von Attributen in beliebiger Tiefe.

4.2.5 Schnittstellen eines GellIS

Innerhalb der drei möglichen Schnittstellen zur Anbindung von GellIS an RIS wird die Methodenschnittstelle empfohlen. Diese gewährleistet eine schnelle Verarbeitung der Geländedaten im steuernden Informationssystem. Ferner ist dabei das GellIS vollständig in die Benutzeroberfläche des RIS zu integrieren. Eine Realisierung dieser Empfehlung findet sich in IABG (1989).

Da die Anpassung eines GellIS an ein RIS die "Offenlegung" beider Systeme erfordert, d. h. das Aufzeigen der Modularität (Unterprogramme) als auch weitere Parameter (Variablenamen, -felder) können bidirektionale Schnittstellen die Offenlegung und den Anpassungsaufwand auf ein Minimum einschränken. Innerhalb dieser Schnittstellen sind dann verschiedene Unterprogramme zur Verfügung zu stellen, die Daten aus der DGM - bzw. RIS - Datenbank lesen, schreiben, editieren, und evtl. sogar Projektlösungen zulassen.

Im Falle einer FORTRAN-Kodierung lauten diese Aufrufe

```
CALL WRITE [( ... )]
CALL READ [( ... )]
CALL EDIT [( ... )]
CALL PROJECT [( ... )]
```

4.3 Vollständige 3D-Beschreibungen

Vollständige 3D-Beschreibungen verlangen nach einer flächendeckenden Aussage über Lage und Höhe der Erdoberfläche. Während innerhalb der Datenerfassung von Lageelementen wie Grenzpunkte, Gebäudeecken etc. durchaus Höheninformation miterfaßt werden kann, ist eine gesonderte Erfassung der Geomorphologie in den meisten Fällen unbedingte Notwendigkeit. Daraus resultiert zwangsläufig auch eine Separation der Flächenbeschreibung, die jedoch innerhalb des objektorientierten Managements zu einer geschlossenen 3D-Darstellung führt. Demonstriert werden soll dies an dem folgenden Beispiel, wo zwei Grundstücke (Nr. I: klein, bebaut, Nr. II: groß, unbebaut) im \mathbb{R}^3 zu beschreiben sind (siehe Abb. 4.1).

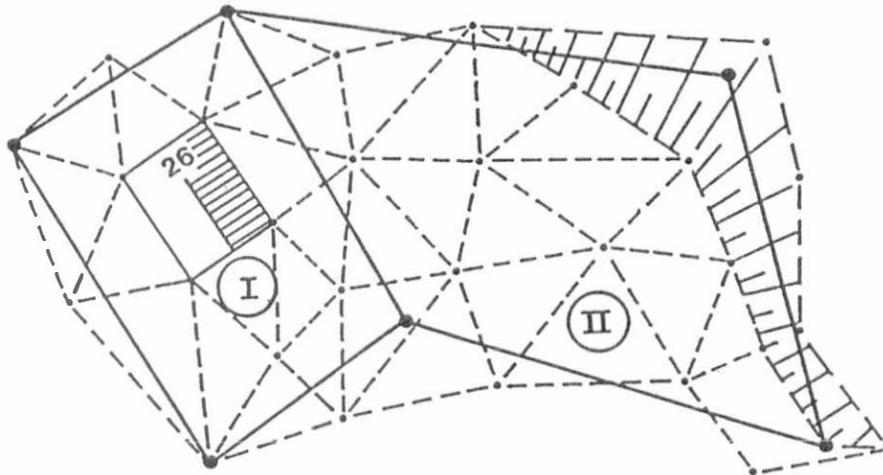


Abb. 4.1.: Geometrie einer 3D-Beschreibung

Die Aufteilung entsprechend dem objektorientierten Management liefert die folgende Objektbeschreibung:

Objektklasse: Grundstücke
 Objekt 1: Flurstück 1
 Objekt 2: Flurstück 2
 Objekt 3: Geomorphologie

Objektteil 1a: Flurstück
 Objektteil 1b: Gebäude

Objektteil 2a: Flurstück

Objektteil 3a: Massenpunkte mit Kanteninformation und Aussparungsflächen

Flächenmodell 1a:	Randbeschreibung vermittelt Pkt., Linien Flächen, Identifikator 1
Flächenmodell 1b:	Randbeschreibung wie 1a, Identifikator 26
Flächenmodell 2a:	Randbeschreibung wie 1a, Identifikator 2
Flächenmodell 3a:	Bedingte Delauney-Triangulation, Randbeschreibung vermittelt Dreiecksflächen, Identifikator B
Attribute ID 1:	Nutzungsart, Eigentümer
Attribute ID 26:	GRZ, GFZ, Höhe Dachfirst, Dachneigung
Attribute ID 2:	Nutzungsart, Eigentümer
Attribute B:	Böschungspkt., weitere Identifikatoren nach Böschung oben, Böschung unten.

Eine Verwaltung innerhalb dieses Schemas erlaubt Abfragen wie

- 3D-Darstellung der Gebäude
- geomorphologische Details in Form von Böschungen
- Interpolation von Einzelhöhen

um nur eine kleine Auswahl aufzuführen.

Die Trennung von lagemäßiger und geomorphologischer Randdarstellung ist nicht nur eine pragmatisch vorteilhafte Vorgehensweise, sondern auch in der Datenhaltung redundanzarm zu führen. Dies bedingt jedoch bei Datenerfassungen Abfragen an beide Randdarstellungen, um Redundanzen abzubauen (Beispiel: Lagepunkte können gleichzeitig Massenpunkte der geomorphologischen Erfassung sein).

Des weiteren bedingt die 3D-Beschreibung dieselben Vektor- und Rasterprodukte, wie sie ein GIS beinhalten soll, Konsistenzprüfungen der Topologie und die Berücksichtigung des in dieser Arbeit vorgestellten Abfrageraumes.

5 Schluß und Ausblick

In dieser Arbeit werden Methoden zur Datenverwaltung in raumbezogenen Informationssystemen und algorithmische Aspekte zur Ableitung von DGM-Produkten behandelt. Dabei wird speziell auf das Problem der Höhenintegration in raumbezogene Informationssysteme eingegangen; hier sind verschiedene Modelle aufgezeigt worden. Die gesamten Ausführungen möchten zum besseren Verständnis der Thematik der raumbezogenen Informationssysteme und der digitalen Geländemodelle beitragen.

Im theoretischen Teil sind ausführlich die Spline-Approximationen behandelt worden. Die aufgezeigten Beispiele belegen die Effizienz von einfachen Formulierungen kubischer Splines mit eingeschränkter C_2 -Kontinuität, deren Parameter mittels der Methode der kleinsten Quadrate zu schätzen sind.

Es wurde gezeigt, daß Verfahren der digitalen Signalverarbeitung bei der Datenerfassung und der Ableitung von DGM-Produkten eingesetzt werden können. Insbesondere ist die Vermutung einer Homogenisierung von Neigungsinformation durch längere Differentiatoren nicht bestätigt worden.

Die geometrischen Betrachtungen konnten zum besseren Verständnis von Datenverwaltungsstrukturen beitragen, die mit den Konzepten der Informatik in einer niederen Ebene mittels Listen (Datenfiles) und auf einer höheren Ebene mit Datenbankmodellen zu bewerkstelligen sind.

Der praktische Teil hat den allgemeinen Aufbau von raumbezogenen Informationssystemen vorangestellt, um dann hardwareunabhängige RIS vorzuschlagen. Ebenso ist auf die Datentypen eingegangen worden. Nach den Anforderungen an RIS wurden Schnittstellen eingeführt, wobei in interne und externe Schnittstellen klassifiziert worden ist. Die für den praktischen Umgang wichtigen externen Schnittstellen sind später nochmals gesondert aufgeführt worden.

Die Thematik des digitalen Geländemodells begann mit Betrachtungen zur Datenerfassung und Datenaufbereitung und mündete in ein Geländeinformationssystem, welches aus dem raumbezogenen Informationssystem abgeleitet wurde. In den Untersuchungen zur Methodenbank sind die im theoretischen Teil angestellten algorithmischen Betrachtungen durch Beispiele erweitert. Da bisher geringe Kenntnis über Ereignisse innerhalb der Höheninformationen vorlag, wurden Abfrageräume nach Fachdisziplinen und Maßstäben getrennt definiert.

Innerhalb der Integration von Geländedaten in raumbezogene Informationssysteme konnte sich drei möglichen Modellen zugewendet werden. Alle drei Möglichkeiten der Höhenintegration bieten Vor- und Nachteile, die für den speziellen Anwendungsfall zu überprüfen sind. Dies ist deshalb besonders wichtig, weil eine eindeutige Entscheidung für eine Realisierung getroffen werden muß, da es nicht möglich ist, eine Form der Integration als Vorstufe für eine andere durchzuführen. Der Aufwand für die Realisierung ist bei der Sachdatenabsorption am geringsten, bei der DGM-Anbindung trotz vorhandener Berechnungsprogramme schon deutlich höher, und bei der totalen Integration mit Sicherheit am größten.

Bei den zu lösenden Fragestellungen kehren sich die Vor- und Nachteile um. Die vollständige Höhenintegration ist in der Lage, die Probleme aller Fachbereiche zu bearbeiten. Dagegen läßt sich mit der Sachdatenabsorption nur der Bereich des Leitungs- und Kanalwesens zufriedenstellend lösen. Die Bestandsaufnahme hat gezeigt, daß alle drei Modelle bereits zur Verfügung stehen.

Zukünftig wird zumindest im großmaßstäblichen Bereich eine vollständige dreidimensionale Beschreibung des Geländes samt seiner künstlichen Objekte (Häuser, Brückenbauten etc.) notwendig sein. Jedoch auch in mittleren und kleinen Maßstäben gewinnt die vollständig dreidimensionale Geometrie und Attributierung mehr und mehr an Bedeutung, insbesondere im Hinblick auf Umweltverträglichkeitsprüfungen. Deshalb ist eine leistungsfähige Höhenintegration in einem raumbezogenen Informationssystem unabdingbar.

Erweiterungen der hier behandelten Problematik sind die Bereitstellung von Abfragesprachen, mit denen sich ebenso künftig verstärkt auseinandergesetzt werden sollte. Während mit den strukturierten Abfragesprachen (structured query language, SQL) der relationalen Datenbanksysteme bereits ein mächtiges Werkzeug zur Verfügung steht, fehlt es noch an Abfragesprachen für graphische Objekte.

Auch für Geländeinformationssysteme sollten Abfragesprachen zur Verfügung gestellt werden, um dem Benutzer den Umgang mit großen Datenmengen sowie ihren Analysen zu erleichtern. Erst die Komplettierung eines GelIS mit dieser Form der Kommunikation wird sie total in die "Welt" der Informationssysteme integrieren.

6 Literatur

- ADLER, R. (1978): Organisation und Struktur digitaler Geländemodelle. In: Landinformationssysteme, Ed. G. Eichhorn, Schrift. Reihe Wissenschaft, Technik, 11, S. 2/3/01 – 2/3/14.
- ALAGIĆ, S. (1989): Object-Oriented Database Programming. Springer, New York.
- ANZENHOFER, M. (1988): Untersuchungen zur Ableitung von Digitalen Gelände- und Neigungsmodellen. Diplomarbeit Techn. Univ. München, München (nicht veröffentlicht).
- ARBEITSGEMEINSCHAFT DER VERMESSUNGSVERWALTUNGEN DER LÄNDER DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND (AdV, 1970): Rahmen-Soll-Konzept Automatisierter Liegenschaftskataster als Basis der Grundstücksdatenbank (ALK). Landesvermess. Amt NRW, Bonn.
- ARBEITSGEMEINSCHAFT DER VERMESSUNGSVERWALTUNGEN DER LÄNDER DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND (AdV) (1988): Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem (ATKIS). Landesvermess. Amt NRW, Bonn.
- ASSMUS, E./A. KÖSTLI/K. KRAUS/L. MOLNAR/E. WILD (1982): Anforderungen an das digitale Höhenmodell aus der Sicht des Anwenders. Allgem. Verm. Nachr. (AVN), 89, S. 330 – 344.
- BALCE, A.E. (1986): Determination of Optimum Sampling Strategy Interval in Grid Sampling of Digital Elevation Models for Large-Scale Applications. Int. Arch. Phot. Rem. Sens., 26, 3/1, pp. 40 – 54, Rovaniemi.
- BALCE, A.E. (1987): Determination of Optimum Sampling Interval in Grid Digital Elevation Models (DEM) Data Acquisition. Phot. Eng. Rem. Sens., 53, pp. 323 – 330.
- BARNHILL, R.E./R.F. RIESENFELD (1974): Computer Aided Geometric Design. Academic Press, New York.
- BARNHILL, R.E./W. BÖHM (1983): Surfaces in CAGD. North-Holland, Amsterdam.
- BARTELME, N. (1989): GIS-Technologie. Springer, Berlin.
- BARWINSKI, K. (1983): Der Beitrag der Landesvermessung zu bodenbezogenen Informationssystemen. Zeitschr. Verm. Wes. (ZfV), 108, S. 14 – 20.
- BARWINSKI, K. (1988): Mitarbeit der Landesvermessung beim Aufbau von Geo-Informationssystemen. Geo-Informationssysteme (GIS), 1. S. 8 – 11.
- BAUMANN, M. (1985): Aufbau und Einsatzmöglichkeiten eines raumbezogenen Informationssystems mit SICAD. In: CAD-Kartographie, Hrsg. M. Schilcher, Wichmann, S. 279 – 299. Karlsruhe.
- BEERENWINKEL, R./J.D. BONJOUR/R.D. HERSCH/O. KÖLBL (1986): Real-Time Stereo Image Injection for Photogrammetric Plotting. Int. Arch. Phot. Rem. Sens., 26, 4, pp. 99 – 109.
- BÉZIER, P. (1972): Numerical Control – Mathematics and Applications. J. Wiley, London.
- BÖHM, W./G. GOSE (1977): Einführung in die Methoden der numerischen Mathematik. Vieweg.
- BÖIIMER, K. (1974): Spline-Funktionen. Teubner, Stuttgart.
- de BOOR, C. (1978): A Practical Guide to Splines. Springer, New York.
- BRAEDT, J. (1988a): Komponenten eines Umweltinformationssystems. Seminarbericht Arb. Gemeinsh. (ARGE) Alpenländer, Bayer. Staatsmin. Landesentwickl., Umweltfragen (LUM), München.

- BRAEDT, J. (1988b): Satellitenbilder als Informationsquelle für Landesplanung und Umweltschutz. Mitt. Blatt DVW Landesverein Bayern, 40, S. 117 – 131.
- BRODLIE, K.W. (1980): A Review of Methods for Curve and Function Drawing In: *Mathematical Methods in Computer Graphics and Design*, Academic Press, London.
- BÜHLER, W./F. STEIDLER/R. SPOONER (1988): Datenstruktur im WILD-LEITZ System 9 am Beispiel der Netzwerkanalyse. In: *Ingenieurvermessung 88*, Hrsg. K. Schnädelbach/H. Ebner, Dümmler, D9, Bonn.
- BURROUGH, P.A. (1986): *Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment*. Clarendon Press, Oxford.
- CODD, E.F. (1970): A relational Model of Data for large shared Data Banks. *Communicat. CACM*, 13, pp. 377 – 397.
- COHEN, E./T. LYCHE/R.F. RIESENFELD (1980): Discrete B-Splines and Subdivision Techniques in Computer Aided Geometric Design and Computer Graphics. *Comp. Graphics, Image Process.*, 14, pp. 87 – 111.
- CONZETT, R. (1980): Zum Begriff "Landinformationssysteme". *Verm., Phot., Kult. Techn. (VPK)*, 78, S. 373 – 375.
- COTTLE, R.W./G.B. DANTZIG (1968): *Complementary Pivot Theory of Mathematical Programming*. *Lin. Algebra Applied*, 1, pp. 103 – 125.
- COX, B.J. (1986): *Object Oriented Programming – An Evolutionary Approach*. A. Wesley, Readings, Mass.
- CHRISTOFFERS, F./P. GRAMS/G. ROSSOL/R. WINTER/W. ZEDDIES (1985): Interaktive graphische Datenverarbeitung in der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung. In: *CAD-Kartographie*, Hrsg. M. Schilcher, Wichmann, Karlsruhe.
- DATE, C.J. (1986): *An Introduction to Database Systems*. Addison-Wesley, Reading, Mass.
- DIRSCHERL, E. (1987): Zur Ermittlung der kleinsten Digitalisierungseinheit bei der Quantifizierung von Kontinua. Diplomarbeit Techn. Univ. München, München (nicht veröffentlicht).
- DORRER, E. (1975): Gedanken zum digitalen Geländemodell. *Bildmess., Luftbildwes. (BuL)*, 43, S. 90 – 91.
- DÜPPE, R.D./H.J. GOTTSCHALK (1970): Automatische Interpolation von Isolinien bei willkürlich verteilten Stützpunkten. *Allgem. Verm. Nachr. (AVN)*, 77, S. 423 – 426.
- DÜSEDAU, G. (1986): Untersuchungen zur stückweisen glatten Approximation von zweidimensionalen Punkthaufen. Diplomarbeit Techn. Univ. München, München (nicht veröffentlicht).
- DÜSEDAU, G./R. HÖSSLER/W. REINHARDT/R. THIEMANN (1987): Digitale Geländemodelle – Neue Entwicklungen und Möglichkeiten. *Bildmess., Luftbildwes. (BuL)*, 55, S. 175 – 194.
- EBNER, H./B. HOFMANN-WELLENHOF/P. REISS/F. STEIDLER (1980): HIFI – Ein Minicomputer-Programmsystem für Höheninterpolation mit finiten Elementen. *Zeitschr. Verm. Wesen (ZfV)*, 105, S. 215 – 225.
- EBNER, H. (1983): Berücksichtigung der lokalen Geländeinformation mit finiten Elementen. *Bildmess., Luftbildwes. (Bul)*, 51, S. 3 – 9.

- EBNER, H./W. REINHARDT (1984): Progressive Sampling and DEM Interpolation by Finite Elements. *Bildmess., Luftbildwes. (BUL)*, 3a, pp. 177 – 182.
- EBNER, H./D. FRITSCH (1986): High Fidelity Digital Elevation Models – Elements of Land Information Systems. *Proceed. 18. Int. Congr. Survey. (FIG), Comm. V*, pp. 155 – 170, Toronto.
- EBNER, H./W. REINHARDT/R. HÖSSLER (1988): Generation, Management and Utilization of High Fidelity Digital Terrain Models. *Int. Arch. Phot. Rem. Sens.*, 27, B11, pp. III – 556 – 566, Kyoto.
- EBNER, H./R. HÖSSLER (1988): HIFI88-Quick Reference Guide. Ing. Büro Prof. Dr.-Ing. H. Ebner/Dr.-Ing. R. Hößler, München.
- EBNER, H./W. REINHARDT/L. TANG (1989): Beiträge der Rasterdatenverarbeitung zum Aufbau digitaler Geländemodelle. *Zeitschr. Verm. Wes. (ZfV)*, S. 268 – 278.
- EBNER, H./R. HÖSSLER/R. WÜRLÄNDER (1990): Integration von digitalen Geländemodellen in Geo-Informationssysteme – Konzept und Realisierung. *Nachr. Kart. Verm. Wes. (NaKaVerm)*, 105, S. 71-76.
- ECKER, R./J. JANSKA (1989): Digital Terrain Models and Digital Image Processing. In: *Geo-Informationssysteme, Anwendungen, neue Entwicklungen*, Hrsg. M. Schilcher/D. Fritsch, Wichmann, Karlsruhe.
- EICHHORN, G. (1978): Landinformationssysteme. *Schriftenreihe Wissenschaft und Technik*, Nr. 11, Techn. Hochschule Darmstadt, Darmstadt.
- EICHHORN, G. (1980): Zielsetzung und Organisation von Landinformationssystemen. *Verm., Phot. Kult. Techn. (VPK)*, 78, S. 330 – 334.
- EICHHORN, G. (1980): Auf- und Ausbau von Landinformationssystemen in Industrie- und Entwicklungsländern. *Zeitschr. Verm. Wes. (ZfV)*, 105, S. 541 – 550.
- ELASSAL, A.A. (1978): U.S.G.S. Digital Cartographic File Management System. *Proceed. DTM Symp.*, pp. 16 – 23, St. Louis.
- ESRI (1988): Firmenpräsentation, private Mitteilungen, Kranzberg.
- FAUX, I.D./M.J. PRATT (1981): *Computational Geometry for Design and Manufacture*. Ellis Horwood Ltd.
- FELDMANN, D./A. KRUSE/P. MERZIGER/G. MÜHLBACH/T. WIRTH (1973): *Repetitorium der Ingenieurmathematik*. Inst. Mathematik. Techn. Univ. Hannover, Hannover.
- FERGUSON, J.C. (1964): Multivariate Curve Interpolation. *Journal ACM*, 11, No. 2, pp. 221 – 228.
- FISCHER, K. (1982): SICAD-Datenhaltung für die Kartographie. Siemens-Studie, München (nicht veröffentlicht).
- FISCHER, K. (1983): Sachdatenhaltung für die Kartographie. Siemens-Studie, München (nicht veröffentlicht).
- FRANK, A. (1983): Datenstrukturen für Landinformationssysteme – semantische, topologische und räumliche Beziehungen in Daten der Geo-Wissenschaften. *Mitt. 34, Inst. Geod., Phot., Eidgen. Hochschule Zürich*, Zürich.
- FRITSCH, D. (1982): Entwurf digitaler zweidimensionaler nichtrekursiver Filter. *Deutsche Geod. Komm., Reihe C*, Nr. 275, München.
- FRITSCH, D. (1983): Optimal Design of Two-Dimensional FIR-Filters. *Proceed IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech, Signal Process. (ICASSP 83)*, 1, pp. 383 – 386, Boston.

- FRITSCH, D. (1984a): Two-Dimensional Finite Impulse Response (FIR) Linear Systems in Digital Photogrammetry. *Int. Arch. Phot. Rem. Sens.*, 25, A3a, pp. 290 – 300, Rio de Janeiro.
- FRITSCH, D. (1984b): Proposal for the Determination of the Least Sampling Interval for DEM Data Acquisition. *Techn. Paper, Workshop Digital Elevation Models, Edmonton.*
- FRITSCH, D. (1985a): Some Additional Informations on the Capacity of the Linear Complementarity Algorithm. In: *Optimization and Design of Geodetic Networks*. Ed. E.W. Grafarend/F. Sanso, Springer, Heidelberg, pp. 169 – 184.
- FRITSCH, D. (1985b): Some Remarks on Duality between Fourier Series and Discrete Fourier Transforms. *Allgem. Verm. Nachr. (AVN), Int. Edition, 2*, pp. 41 – 47.
- FRITSCH, D. (1987a): On Algorithms Solving the L_∞ -Approximation in Geometric Modelling. *Proceed. Intercomm. Conf. Fast Process. Photogr. Data, Interlaken, Inst. Geod., Phot., ETH Zürich, Zürich.*
- FRITSCH, D. (1987b): *Geographische Informationssysteme. Vorlesungsmanuskript Techn. Univ. München, München (nicht veröffentlicht).*
- FRITSCH, D. (1988a): Some Experience with the Determination of the Optimum Sampling Density. *Int. Arch. Phot. Rem. Sens.*, 27, B11, pp. III 493 – 504, Kyoto.
- FRITSCH, D. (1988b): *Hybride graphische Systeme – Eine neue Generation von raumbezogenen Informationssystemen. Geo-Informationssysteme (GIS), 1*, S. 12 – 20.
- FRITSCH, D./M. SCHILCHER/H. YANG (1988): Object Oriented Management of Raster Data in Geographic Information Systems. *Int. Arch. Phot. Rem. Sens.*, 27, B4, pp. 538 – 546, Kyoto.
- FRITSCH, D. (1989): Zur Raster-Vektor-Überlagerung in hybriden graphischen Systemen. In: *Geo-Informationssysteme, Anwendungen, Neue Entwicklungen*, Hrsg. M. Schilcher/D. Fritsch, Wichmann, Karlsruhe.
- FUCHS, H. (1975): Das DGM im Braunkohletagebau. *Bildmess., Luftbildwes. (BuL)*, 43, S. 96 – 102.
- GAUFROID, F. (1989): INFOCAM – Kern Geographical Information Systems, In: *Photogrammétrie et Systèmes d'Information du Territoire*, Ed. O. Kölbl, Presses Polytechn. Romandes, EPFL Lausanne.
- GELLERT, W./II. KÜSTNER/M. HELLWICH/H. KÄSTNER (1972): *Handbuch der Mathematik. Buch und Zeit Verlagsges., Köln.*
- GERSTL, M./G. HEINDL/E. REINHART (1979): Interpolation and Approximation by Piecewise Quadratic Smooth Functions of two Variables. *Pres. Paper IUGG General Assembly, Canberra.*
- GILLESSEN, W./J. KASTNER/R. THIEMANN/U. WOLFSEHER (1988): Gelände- und Bilddatenverarbeitung in der Umweltüberwachung. In: *Ingenieurvermessung 88*, Hrsg. K. Schnädelbach/H. Ebner, E7, Dümmler, Bonn.
- GÖLLNER, J.P. (1987): *Datenorganisation in System 9. Ernst Leitz Vertriebs-GmbH, Frankfurt.*
- GÖPFERT, W. (1978): Digitale Korrelation komplex exponierter Daten. *Zeitschr. Verm. Wesen (ZfV)*, 103, S. 475 – 484.
- GÖPFERT, W. (1987): *Raumbezogene Informationssysteme. Wichmann, Karlsruhe.*
- GOLD, B./C.M. RADER (1969): *Digital Processing of Signals. McGraw-Hill, New York.*
- GOTTSCHALK, H.J. (1981): Relationen im Raster. *Nachr. Karten, Verm. Wes. (Naka Verm), Nr. 82, Inst. Angew. Geod. (IfAG), S. 35 – 54, Frankfurt.*

- GRÜNDIG, L. (1988): Datenverwaltungskonzepte für typische Aufgaben aus der Ingenieurgeodäsie. Deutsche Geod. Komm., Reihe C, Nr. 336, München.
- GÜNTSCH, H. (1985): Untersuchungen zum Entwurf digitaler zweidimensionaler Filter. Diplomarbeit Techn. Univ. München, München (nicht veröffentlicht).
- GÜNTSCH, H. (1988a): Datenstrukturen in raumbezogenen Informationssystemen In: Ingenieurvermessung 88, Hrsg. K. Schnädelbach/H. Ebner, Dümmler, B8, Bonn.
- GÜNTSCH, H. (1988b): Zur Lösung der Höhenintegration bei INTERGRAPH. Private Mitteilungen, München.
- HEIPKE, Ch. (1986): Zum Vergleich von zwei Komplementaritätsalgorithmen. Diplomarbeit Techn. Univ. München, München (nicht veröffentlicht).
- HERRING, J.R. (1989): The Definition and Development of a Topological Spatial Data System. In: Photogrammetrie et Sytemes d'Information du Territoire, Ed. O. Kölbl, Presses Polytechn. Romandes EPFL, Lausanne.
- HERZNER, W. (1988): Rasche Berechnung perspektiver Darstellungen eindeutiger Funktionen (Flächen) in zwei Variablen. In: Austrographics 88, Hrsg. A. Clauner/W. Purgathofer, Informatikfachbereiche, 183, Springer, Wien, S. 15 – 41.
- HOFFMANN, H.J. (1987): Smalltalk – Verstehen und Anwenden. Hauser, München.
- IABG (1989): Die interaktive Bearbeitung Digitaler Geländemodelle mit HIFI – 88. Mitt. Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft mbH, Stand Sept. 1989, Ottobrunn.
- JANCAITIS, J.R. (1976): Statement of Work for Basic Digital Terrain Data Base Software. U.S. Army Engin. Topographie Lab., Belvoir.
- JONES, C.B./I.M. ABRAHAM (1986): Design Considerations for a Scale-Independent Cartographic Database. Proceed. Int. Symp. Spatiel Data Handling, pp. 384 – 398, Seattle.
- KAMMERER, J./M. SCHILCHER/B. SONNE/U. THEISSING (1987): Hybride Graphik in Geoinformationssystemen. In: Ingenieurvermessung 88, Hrsg. K. Schnädelbach/H. Ebner, Dümmler, B10, Bonn.
- KEPP, H. (1988): Das Umweltsystem des Umweltbundesamtes Wien – Aspekte eines raumbezogenen Umweltinformationssystems. In: Ingenieurvermessung 88, Hrsg. K. Schnädelbach/H. Ebner, E8, Dümmler, Bonn.
- KOCH, K.R./A.J. POPE (1969): Least Squares Adjustment with Zero Variances. Zeitschr. Verm. Wesen (ZfV), 94, S. 390 – 393.
- KOCH, K.R. (1973): Höheninterpolation mittels gleitender Schrägebene und Prädikation. Verm., Phot., Kult. Techn., 71, S. 229 – 232.
- KOCH, K.R. (1985): Digitales Geländemodell mittels Dreiecksvermaschung. Verm. Wes., Raumordn. (VR), 47, S. 129 – 135.
- KOCH, K.R. (1987): Parameterschätzung und Hypothesentests. Dümmler, Bonn.
- KRABS, W. (1983): Einführung in die lineare und nichtlineare Optimierung für Ingenieure. Teubner, Stuttgart.
- KRAUS, K. (1972): Interpolation nach kleinsten Quadraten. Bildmess., Luftbildwes. (BuL), 40, S. 3 – 8.
- KRAUS, K. (1983): Die Geländehöhenbank, Basis eines topographischen Informationssystems. Zeitschr. Verm. Wes. (ZfV), 108, S. 27 – 33.

- KREILING, W. (1976): Automatische Herstellung von Höhenmodellen und Orthophotos aus Stereobildern durch digitale Korrelation. Dissertation Universität Karlsruhe, Karlsruhe.
- KUHDORFER, F./A. SCHLEIFENBAUM (1988): Anbindung des Geländeinformationssystems SCOP an das raumbezogene Informationssystem SICAD. Private Mitteilungen, München.
- LEE, D.T./W.S. SCHACHTER (1980): Two Algorithms constructing a Delauney-Triangulation. Int. Journ. Comp. Inform. Sciences, 9.
- LEMKE, C.Z. (1968): On Complementary Pivot Theory, In: Mathematics of the Decision Sciences, Part 1, Ed. GB. Dantzig/A.F. Veinott, Americ. Math. Society, Providence.
- LICHTNER, W./A. ILLERT (1989): Entwicklungen zur Kartographischen Mustererkennung. In: Geo-Informationssysteme. Anwendungen, Neue Entwicklungen. Hrsg. M.Schilcher/D. Fritsch, Wichmann, Karlsruhe.
- LOTHER, G. (1985): Softwareschnittstellen in CAD-Systemen. In: CAD-Kartographie. Hrsg. M. Schilcher, Wichmann, Karlsruhe, S. 265 – 277.
- MAKAROVIC, B. (1977a): Digital Terrain Models – A Constituent of Geo-Information Systems. Proceed. Symp. Topol. Data Structures for Geographic Information Systems. 1, pp. 1 – 21, Cambridge, Mass.
- MAKAROVIC, B. (1977b): Composite Sampling for Digital Terrain Models. ITC Journal, pp. 406 – 433.
- MARK, D.M. (1978): Concepts of “Data Structure” for Digital Terrain Models. Proceed. DTM Symp., pp. 24 – 31, St. Louis.
- MEIER, A. (1986): Methoden der grafischen und geometrischen Datenverarbeitung. Teubner, Stuttgart, 224 S.
- MEISSL, P. (1982): Least Squares Adjustment – A Modern Approach. Mitt. Geod. Inst. Techn. Univ. Graz, Folge 43, Graz.
- MENKE, K. (1989): Presentation of the Zeiss Phocus System. In: Photogrammetrie et Systèmes d' Information du Territoire, Ed. O. Kölbl, Presses Polytechn. Romandes EPFL, Lausanne.
- MILLER, C.L./R.A. LAFLAMME (1958): The Digital Terrain Model – Theory and Application. Phot. Eng. Rem. Sens., 24 pp. 433 – 442.
- MITTELSTRASS, G. (1987): Der graphisch-interaktive Arbeitsplatz (ALK-GIAP). Nachr. öffentl. Verm. Dienst (NÖV) NRW, 20, S. 99 – 115.
- MITTELSTRASS, G. (1988): Die Informationssysteme ALK und ATKIS aus der Sicht der Verwaltung und der Ingenieurvermessung. In: Ingenieurvermessung 88, Hrsg. K. Schnädelbach/H. Ebner, Dümmler, B11, Bonn.
- MOLENAAR, M. (1989): Single Valued Vector Maps – A Concept in Geographic Information Systems. Geo-Informationssysteme (GIS), 2, pp. 18 – 26.
- MOON, G./D. SKIBA (1986): Modelling of Networks with a Relational Database. Wild Heerbrugg, Ltd., Heerbrugg.
- MÜLLER, K.P./H. WÖLPERT (1976): Anschauliche Topologie. Teubner, Stuttgart.
- NEWMAN, W.M./R.F. SPROULL (1986): Grundzüge der interaktiven Computergraphik. McGraw – Hill, Hamburg.
- NIEDEREICHHOLZ, J. (1983): Datenbanksysteme – Aufbau und Einsatz. Physik, Würzburg.

- NOMA, A.A. (1974): Toward Creation of a Digital Terrain Data Base. Pres. Paper, 34. Ann. Conv., Americ. Congr. Survey, Mapping, St. Louis.
- NOMA, A.A./N.S. SPENCER (1978): Development of a DMAC Digital Terrain Data Base System. Proceed. DTM Symp., pp. 493 – 505, St. Louis.
- PARKS, T.W./J.H. McCLELLAN (1972): A Program for the Design of Linear Phase Finite Impulse Response Digital Filters. IEEE Trans., Audio-, Electroacoustics, AU – 20, 3, pp. 195 – 199.
- PAVLIDIS, T. (1982): Algorithms for Graphics and Image Processing. Springer, Berlin.
- RABINER, L.R./B. GOLD (1975): Theory and Application of Digital Signal Processing. Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
- RADWAN, M.M./J. KURE/M. AL-HARTHI (1988): Data Structuring in Topographic Data Bases. Int. Arch. Phot. Rem. Sens., 27, B10, pp. IV – 317 – 326, Kyoto.
- RALSTON, A. (1965): A First Course in Numerical Analysis. MC Graw-Hill, New York.
- RAPIOR, L./D. BOPP (1975): Weiterentwicklung des Programms "Auswertung Digitales Geländemodell". Bildmess., Luftbildwes., 43, S. 108 – 114.
- REINHARDT, W. (1988): On-Line Generation and Verification of Digital Terrain Models. Int. Arch. Phot. Rem. Sens., 27, B11, pp. 546 – 555, Kyoto.
- REINSCH, C.H. (1967): Smoothing by Spline Functions. Numer. Math., 12, pp 177 – 183.
- REINSCH, C.H. (1971): Smoothing by Spline Functions II. Numer. Math., 16, pp. 451 – 454.
- REISS, P. (1985): Aufbau digitaler Höhenmodelle auf der Grundlage einfacher finiter Elemente. Deutsche Geod. Komm., Reihe C, Nr. 315, München.
- RESCHBERGER, O. (1988): Untersuchungen zur stückweisen Approximation von Raumkurven. Diplomarbeit Techn. Univ. München, München (nicht veröffentlicht).
- RIEGGER, P. (1989): Die Bedeutung der Graphik in einem Umweltinformationssystem. In: Geo-Informationssysteme, Anwendungen, Neue Entwicklungen. Hrsg. M. Schilcher/D. Fritsch, Wichmann, Karlsruhe.
- RODER, B. (1988): Das Geographische Grundinformationssystem des Bayerischen Landvermessungsamtes. Mitt. Blatt Deutsch. Verein Verm. Wes., Landesverein Bayern, 40, S. 159 – 178.
- ROSSOL, G. (1987): Der ALK-Datenbankteil. Nachr. Öffentl. Verm. Dienst (NÖV) NW, 20, S. 89 – 98.
- RUDOLF, D.J. (1988): Technische Datenbanken in der Elektronik. CHIP Plus 5, S. 18 – 22.
- SCHAFFRIN, B. (1981): Ausgleichung mit Bedingungs-Ungleichungen. Allgem. Verm. Nachr. (AVN), 6, S. 227 – 238.
- SCHIEK, H.J. (1988): Perspektiven zukünftiger Datenbanksysteme – Erweiterbarkeit und Objektorientierung. Tagungsband AM/FM Regionalkonferenz Siegen, Nachtrag, Siegen.
- SCHILCHER, M. (1985): CAD-Kartographie. Wichmann, Karlsruhe.
- SCHILCHER, M./U. THEISSING (1987): Hybride graphische Datenverarbeitung in der Kartographie. Tagungsband Kontaktstudium "Digitale Bildverarbeitung und Mustererkennung", Techn. Univ. Hannover, Hannover.
- SCHILCHER, M./D. FRITSCH (1989): Geo-Informationssysteme, Anwendungen, Neue Entwicklungen. Wichmann, Karlsruhe.

- SCHWEINFURTH, G. (1988): Errors due to Integration of Image Data to Geographical Information Systems. *Int. Arch. Phot. Rem. Sens.*, 27, B10, pp. IV – 301 – 308, Kyoto.
- SELLGE, H. (1987): Einheitliche Daten-Bank-Schnittstelle (EDBS). *Nachr. öffentl. Verm. Dienst (Növ) NW*, 20, S. 194 – 212.
- SITTARD, M. (1988): *Geographisches Informationssystem. Datenmodell und Anwendung. Sem. Unterl. Geo-Informationssysteme Öffentl. Verw. Inst. Phot., Fernerk., Univ. Karlsruhe, Karlsruhe.*
- SONNE, B. (1988): Raumbezogene Datenbanken für kartographische Anwendungen. *Geo-Informationssysteme (GIS)*, 1, S. 25 – 29.
- SPÄNI, B. (1988): *Das Geländeinformationssystem ATOS und das raumbezogene Informationssystem INFOCAM. Private Mitteilungen, Aarau.*
- SPÄNI, B./N. BARTELME (1988): Vom Modell der Daten zur Anwenderschale eines Raumbezogenen Informationssystems. In: *Ingenieurvermessung 88*, Hrsg. K. Schnädelbach/H. Ebner, Dümmler, B9, Bonn.
- STADLER, R. (1988): Anforderungsprofil eines Geo-Informationssystems aus der Sicht der amtlichen Statistik. *Sem. Geo-Informationssysteme. Öffentl. Verw., Inst. Phot., Fernerk., Univ. Karlsruhe, C*, S. 13 – 38, Karlsruhe.
- STEARNS, S.D. (1979): *Digitale Verarbeitung analoger Signale. Oldenbourg, München.*
- STEIDLER, F. (1986): CIP – ein allgemeines Programmpaket zur DGM-Interpolation unter Verwendung von Dreiecksvermaschung. *Bildmess., Luftbildwes. (BuL)*, 54, S. 5 – 16.
- STEIDLER, F./C. DUPONT/G. FUNCKE/C. VUATTOX/A. WYATT (1986a): CIP – A Program Package for Interpolation and Plotting of Digital Height Models. *Int. Arch. Phot. Rem. Sem.*, 13a, Rio de Janeiro.
- STEIDLER, F./C. DUPONT/G. FUNCKE/C. VUATTOX/A. WYATT (1986b): Digital Terrain Models and their Application in Database Systems. *Proceed. AUTOCARTO, London.*
- STÖPPLER, H.W. (1987): Die automatisierte Liegenschaftskarte (ALK) – Überblick. *Nachr. öffentl. Verm. Dienst (NÖV) NRW*, 20, S. 64 – 88.
- SYSTEM 9 (1987): *Polygon Overlay, a Tutorial. Wild Heerbrugg, Heerbrugg.*
- TEMPFLI (1982): Genauigkeitsabschätzung digitaler Höhenmodelle mittels Spektralanalyse. *Geowiss. Mitteil.*, Nr. 22, *Inst. Photogrammetrie, Techn. Univ. Wien, Wien.*
- TRETTER, U. (1987): Quasioptimale Approximation für den Entwurf von digitalen linearen Systemen. *Diplomarbeit Techn. Univ. München, München (nicht veröffentlicht).*
- WIESER, E. (1988): Systementwicklung eines kommunalen Landinformationssystems. In: *Ingenieurvermessung 88*, Hrsg. K. Schnädelbach/H. Ebner, Dümmler, B12, Bonn.
- WÜRLÄNDER, R. (1988): Untersuchungen zur Integration von Digitalen Geländemodellen in Raumbezogene Informationssysteme. *Diplomarbeit Techn. Universität München, München (nicht veröffentlicht).*

7 Anhang

7.1 Tschebyscheff-Approximation

Die Tschebyscheff-Approximation kann durch verschiedene iterative Lösungsverfahren erhalten werden. Eine Methode, die sich hierzu in der jüngsten Vergangenheit bewährt hat, ist die Approximation vermittels der Methode der kleinsten Quadrate mit Ungleichungen als Nebenbedingungen (B. Schaffrin, 1981, D. Fritsch, 1982, 1985a, 1987).

Gegeben sei das verallgemeinerte lineare Modell (2.3)

$$\begin{aligned} y + v &= Ax, \quad P \text{ pos. definit, } \{y, v\} \in \mathfrak{R}^n, \quad x \in \mathfrak{R}^m, \quad \text{rg} A = m \\ \text{unter} & \\ Hx &\geq c, \quad c \in \mathfrak{R}^g, \quad \text{rg} H = g, \quad n \geq m \geq g \end{aligned} \quad (7.1)$$

mit dem eine Tschebyscheff-Approximation herbeigeführt werden soll. Hierzu wird sich erst einmal der Zielfunktion der Methode der kleinsten Quadrate bedient

$$\min_x \|Ax - y\|_P^2 \quad \text{unter} \quad Hx \geq c \quad (7.2)$$

die vermittels der Ungleichungsrestriktionen überführt werden kann in die Zielfunktion der Tschebyscheff-Approximation

$$\min_x \|Ax - y\|_P^\infty := \min_x \max_{1 \leq i \leq n} |p_i v_i| \quad (7.3)$$

Zur Schätzung der unbekannt Parameter x ist mit (7.1) und (7.2) das folgende quadratische Programm aufzulösen

$$\min_x \Phi(x) := \frac{1}{2} x^T Q x - b^T x + \gamma \quad \text{unter} \quad Hx \geq c \quad (7.4)$$

in dem $Q := A^T P A$, $b := A^T P y$ und $\gamma = y^T P y$ substituiert sind. Die Transformation der linearen Ungleichungen in lineare Gleichungen erfolgt vermittels des Schlupfvariablenvektors $u := [u_1^2, u_2^2, \dots, u_g^2]^T$

$$Hx - u = c \quad (7.5)$$

so daß (7.4) umzuschreiben ist in

$$\min_x \Phi(x) := \frac{1}{2} x^T Q x - b^T x + \gamma \quad \text{unter} \quad Hx - u = c \quad (7.6)$$

Die Lösung des quadratischen Programms (7.6) erfolgt durch den Aufbau der Lagrange'schen Funktion

$$\min_{x, u, \lambda} L(x, u, \lambda) := \frac{1}{2} x^T Q x - b^T x + \gamma - \lambda^T (Hx - u - c) \quad (7.7)$$

deren partielle Ableitungen zu den gesuchten linearen Gleichungen führen:

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial x} &= Q\hat{x} - b - H^T \hat{\lambda} = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} &= -H\hat{x} + \hat{u} + c = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial u} &= 2\hat{\lambda}_i \hat{u}_i = 0 \quad \forall \quad i = 1, 2, \dots, g \Rightarrow \hat{\lambda}^T \hat{u} = 0 \end{aligned} \quad (7.8)$$

Eine zusätzliche Einschränkung des Lösungsraumes durch Parametrisierung der Ungleichungen (B. Schaffrin, 1981), also

$$Hx \geq c + \alpha k, \quad \alpha \in \mathfrak{R}, \quad \alpha k \geq 0 \quad (7.9)$$

führt zu der Bedingung (D. Fritsch, 1985a)

$$\hat{\lambda} \geq 0 \quad (7.10)$$

Vermittels (7.8) und (7.10) – bekannt als Kuhn-Tucker Bedingungen, die zur Auflösung von (7.4) notwendig und hinreichend sind – wird das quadratische Programm in das folgende lineare Komplementaritätsproblem transformiert

$$\begin{aligned} \text{finde } \hat{u}, \hat{\lambda} &\geq 0 \\ \text{unter } \hat{u} &= M\hat{\lambda} + q \\ \text{und } \hat{\lambda}^T \hat{u} &= 0 \end{aligned} \quad (7.11)$$

mit den Substitutionen

$$\begin{aligned} M &:= H(A^T P A)^{-1} H^T \\ q &:= H(A^T P A)^{-1} A^T P y - c \end{aligned} \quad (7.12)$$

Die Auflösung von (7.11) wird als komplementäre Lösung bezeichnet, da $\hat{\lambda}$ und \hat{u} zueinander komplementär sind, d. h. falls

$$\hat{\lambda}_i > 0 \Rightarrow \hat{u}_i = 0 \quad (7.13)$$

Für die Modelle (2.1) und (2.2) ergeben sich aus (7.8) die wichtigen Sonderfälle

$$\text{a) } H = 0 \Rightarrow \hat{x} = (A^T P A)^{-1} A^T P y \quad (7.14)$$

$$\text{b) } \hat{u} = 0 \Rightarrow \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{\lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^T P A & H^T \\ H & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} A^T P y \\ c \end{bmatrix} \quad (7.15)$$

was den bekannten Formalismen für Lösungen nach der Methode der kleinsten Quadrate entspricht (K.R. Koch, 1987).

Die Algorithmen zur Auflösung von (7.11) basieren auf linearer komplementärer Pivot-Theorie (C.Z. Lemke, 1968, R.W. Cottle/G. B. Dantzig, 1968). Eine detaillierte Beschreibung des Lemke-Algorithmus ist in D. Fritsch (1985) gegeben; umfangreiche Untersuchungen durch Ch. Heipke (1986) haben gezeigt, daß dieser Algorithmus weiteren Algorithmen vorzuziehen ist.

Zur Anwendung des Algorithmus von Lemke ist (7.11) umzuschreiben in

$$\begin{aligned} \text{finde } \hat{u}, \hat{\lambda} &\geq 0 \\ \text{unter } \hat{u} &= M\hat{\lambda} + e z_0 + q \\ \text{und } \hat{\lambda}^T \hat{u} &= 0, z_0 \in \mathbb{R}, z_0 \geq 0 \end{aligned} \quad (7.16)$$

wobei die Variable z_0 zu minimieren ist; e ist der Einheitsvektor $e := [1, 1, \dots, 1]^T$. Der Algorithmus prüft zuerst, ob der Vektor $q \geq 0$, da dieses die triviale Lösung ergibt. Falls dieser Fall nicht vorliegt, wird mit einer modifizierten Simplex-Methode solange fortgefahren, bis daß die komplementären Vektoren \hat{u} und $\hat{\lambda}$ gefunden sind.

Die Berücksichtigung von (2.5) erfolgt mit (2.3) und seiner Auflösung (7.16) durch die Formulierung von Ungleichungen als Nebenbedingungen

$$\begin{aligned} Ax &\geq y - \varepsilon \\ Ax &\leq y + \varepsilon \end{aligned} = \begin{bmatrix} A \\ -A \end{bmatrix} x \geq \begin{bmatrix} y - \varepsilon \\ -y - \varepsilon \end{bmatrix} \quad (7.17)$$

deren geometrische Interpretation mit der Abb. 7.1 gegeben ist. Dabei wird der zur Verfügung stehende Lösungsraum L reduziert auf einen Unterraum U mit

$$U \subset L \quad (7.18)$$

seine Bandbreite ist der minimale Maximalfehler ε . Da a priori keine Kenntnis über ε vorliegt, muß diese Größe innerhalb des Lösungsprozesses ermittelt werden. Es hat sich gezeigt (D. Fritsch, 1987, U. Tretter, 1987), daß

vermittels einer relaxierten Intervallschachtelung in einer geringen Anzahl von Schritten die gesuchte Lösung gefunden wird.

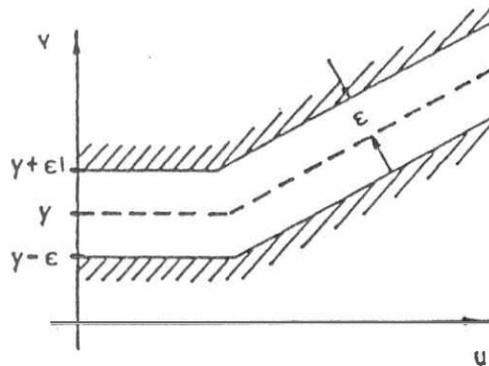


Abb. 7.1: L_∞ -Lösungsraum

Dazu ist die folgende Vorgehensweise zu empfehlen:
man starte mit dem

1. Schritt:

$$\varepsilon_1 = \alpha v_0, \quad v_0 = \max_{1 \leq i \leq n} |\tilde{v}_i| \quad \text{unter } 0.6 \leq \alpha \leq 0.9 \quad (7.19)$$

in dem v_0 das maximale Residuum einer Kleinsten-Quadrate-Schätzung darstellt. Der zweite Schritt berücksichtigt den Anfangswert ε_1 und das maximale Residuum $v_1 = \max |\hat{v}_i|$ aus der ersten Lösung von (7.16)

2. Schritt:

$$\varepsilon = \frac{1}{2}(\varepsilon_1 + v_1) \quad (7.20)$$

so daß der i -te Schritt das folgende Aussehen besitzt

i. Schritt:

$$\varepsilon_i = \frac{1}{2}(\varepsilon_{i-1} + v_{i-1}), \quad \text{wenn } \varepsilon_i = \varepsilon_{i-1} + \delta, \quad \delta \ll 1 \quad (7.21)$$

dann beende die Intervallschachtelung

δ ist dabei eine Inkonsistenzzahl, die die Genauigkeit der Intervallschachtelung steuert.

7.2 Parametrisierung von Spline-Funktionen

Im nachfolgenden werden Parametrisierungen von kubischen Splines vorgestellt, auf die häufig zurückgegriffen werden muß. Damit wird die in den Lehrbüchern wie K. Böhmer (1974) und C. de Boor (1978) abstrakt dargestellte Theorie und Parametrisierung anwendungsorientiert und problembezogen ergänzt.

7.2.1 Parametrisierung mit C_0 - und C_1 -Kontinuität

Gegeben sei die Polynomdarstellung einer Kurve

$$p = p(t) \quad (7.22)$$

wobei für den unabhängigen Parameter t gelten soll

$$t \in [T_j, T_{j+1}] \quad \forall j = 0, 1, 2, \dots \quad (7.23)$$

Eine kubische Parametrisierung für (7.22) mit (7.23) ergibt

$$p(t) = a_0 + a_1(t - T_j) + a_2(t - T_j)^2 + a_3(t - T_j)^3 \quad (7.24)$$

und liefert somit 4 unbekannte Parameter $a_i \forall i = 0, 1, 2, 3$. Um Kontinuität an den Intervallgrenzen T_j, T_{j+1} zu erreichen, wird (7.24) reparametrisiert

$$\begin{aligned} f(T_j) &= a_0 \\ f'(T_j) &= a_1 \\ f(T_{j+1}) &= a_0 + a_1(T_{j+1} - T_j) + a_2(T_{j+1} - T_j)^2 + a_3(T_{j+1} - T_j)^3 \\ f'(T_{j+1}) &= a_1(T_{j+1} - T_j) + 2a_2(T_{j+1} - T_j) + 3a_3(T_{j+1} - T_j)^2 \end{aligned} \quad (7.25)$$

die die Grundlage zur neuen Parametrisierung mit den Parametern $f(T_j)$, $f'(T_j)$, $f(T_{j+1})$ und $f'(T_{j+1})$ darstellt. Die Umkehrung der Parametrisierung (7.24) liefert

$$\begin{aligned} a_0 &= f(T_j) \\ a_1 &= f'(T_j) \\ a_2 &= \frac{3[f(T_{j+1}) - f(T_j)] - [2f'(T_j) + f'(T_{j+1})](T_{j+1} - T_j)}{(T_{j+1} - T_j)^2} \\ a_3 &= -\frac{2[f(T_{j+1}) - f(T_j)] + [f'(T_j) + f'(T_{j+1})](T_{j+1} - T_j)}{(T_{j+1} - T_j)^3} \end{aligned} \quad (7.26)$$

so daß (7.24) umgeschrieben werden kann zu

$$\begin{aligned} p(t) &= f(T_j) + f'(T_j)(t - T_j) + \frac{3[f(T_{j+1}) - f(T_j)] - [2f'(T_j) + f'(T_{j+1})](T_{j+1} - T_j)}{(T_{j+1} - T_j)^2} \\ &\quad - \frac{2[f(T_{j+1}) - f(T_j)] + [f'(T_j) + f'(T_{j+1})](T_{j+1} - T_j)}{(T_{j+1} - T_j)^3} \end{aligned} \quad (7.27)$$

Wird (7.27) nach unbekanntem Parametern in aufsteigender Reihenfolge geordnet, so folgt

$$\begin{aligned} p(t) &= \left[1 - 3\frac{(t - T_j)^2}{(T_{j+1} - T_j)^2} + 2\frac{(t - T_j)^3}{(T_{j+1} - T_j)^3} \right] f(T_j) + \\ &+ \left[(t - T_j) - \frac{2(t - T_j)^2}{(T_{j+1} - T_j)} + \frac{(t - T_j)^3}{(T_{j+1} - T_j)^2} \right] f'(T_j) + \\ &+ \left[\frac{3(t - T_j)^2}{(T_{j+1} - T_j)^2} - \frac{2(t - T_j)^3}{(T_{j+1} - T_j)^2} \right] f(T_{j+1}) + \\ &+ \left[-\frac{(t - T_j)^2}{(T_{j+1} - T_j)} + \frac{(t - T_j)^3}{(T_{j+1} - T_j)^2} \right] f'(T_{j+1}) \end{aligned} \quad (7.28)$$

zusammenzufassen in dem Gleichungssystem

$$p(t) = a(t)f(T_j) + b(t)f'(T_j) + c(t)f(T_{j+1}) + d(t)f'(T_{j+1}) \quad (7.29)$$

Mit der Normierung

$$(T_{j+1} - T_j) = 1 \quad \forall \quad 0 \leq t \leq 1 \quad (7.30)$$

folgt aus (7.28) die symbolische Vektorgleichung

$$p(t) = [1 \ t \ t^2 \ t^3] * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -3 & -3 & -2 & -1 \\ 2 & -2 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f(T_j) \\ f(T_{j+1}) \\ f'(T_j) \\ f'(T_{j+1}) \end{bmatrix} \quad (7.31)$$

Die Multiplikation wird nach den gewohnten Regeln der Matrizenrechnung definiert, wobei nur je eine Matrix mit Vektorelementen auftreten darf. Diese gemischte Matrizenmultiplikation wird deshalb genutzt, damit Vektorgleichungen wie (7.28) einfach und kompakt erscheinen (I.D. Faux/M.J. Pratt, 1981).

Der Spline ist nun darzustellen als

$$s(t) = p_{j,j+1}(t), \quad t \in [T_j, T_{j+1}] \quad \forall \quad j = 0, 1, 2, \dots \quad (7.32)$$

wobei die Parametrisierung in (7.27) - (7.32) automatisch C_0 - und C_1 -Kontinuität gewährleistet.

7.2.2 Erweiterung der Parametrisierung um C_2 -Kontinuität

Die kubische Spline-Funktion $s(t)$ soll neben der Kontinuität in ihren Funktionswerten (C_0) und ihren 1. Ableitungen (C_1) auch noch Kontinuität in ihren 2. Ableitungen (C_2) aufweisen. Vermittels (7.24) ergibt sich für

$$p'' = \frac{d^2 p(t)}{dt^2} = 2a_2 + 6a_3(t - T_j) \quad (7.33)$$

welches entsprechend den vorangegangenen Überlegungen reparametrisiert wird in

$$\begin{aligned} f''(T_j) &= -\frac{4f'(T_j)}{(T_{j+1} - T_j)} - \frac{2f'(T_{j+1})}{(T_{j+1} - T_j)} + \frac{6[f(T_{j+1}) - f(T_j)]}{(T_{j+1} - T_j)^2} \\ f''(T_{j+1}) &= \frac{2f'(T_j)}{(T_{j+1} - T_j)} + \frac{4f'(T_{j+1})}{(T_{j+1} - T_j)} - \frac{6[f(T_{j+1}) - f(T_j)]}{(T_{j+1} - T_j)^2} \end{aligned} \quad (7.34)$$

Die C_2 -Kontinuität resultiert in die Gleichungen

$$p''_{j-1,j}(t_i) = p''_{j,j+1}(t_i) \quad \forall j = 1, 2, \dots \quad (7.35)$$

wobei jede Gleichung explizit darzustellen ist als

$$\begin{aligned} \frac{1}{(T_j - T_{j-1})} f'(T_{j-1}) + 2 \left[\frac{1}{(T_j - T_{j-1})} + \frac{1}{(T_{j+1} - T_j)} \right] f'(T_j) + \\ + \frac{1}{(T_{j+1} - T_j)} f'(T_{j+1}) - \frac{3[f(T_j) - f(T_{j-1})]}{(T_j - T_{j-1})^2} - \\ - \frac{3[f(T_{j+1}) - f(T_j)]}{(T_{j+1} - T_j)^2} = 0 \end{aligned} \quad (7.36)$$

Geordnet nach unbekanntem Parametern in der bereits vorgegebenen Reihenfolge ergibt sich

$$\begin{aligned} \frac{3}{(T_j - T_{j+1})^2} f(T_{j-1}) + \frac{1}{(T_j - T_{j-1})} f'(T_{j-1}) + 3 \left[\frac{1}{(T_{j+1} - T_j)^2} - \frac{1}{(T_j - T_{j-1})^2} \right] f(T_j) + \\ + 2 \left[\frac{1}{(T_j - T_{j-1})} + \frac{1}{(T_{j+1} - T_j)} \right] f'(T_j) - \\ - \frac{3}{(T_{j+1} - T_j)^2} f(T_{j+1}) + \frac{1}{(T_{j+1} - T_j)} f'(T_{j+1}) = 0 \end{aligned} \quad (7.37)$$

oder aber in zusammengefaßter Schreibweise

$$h_1 f(T_{j-1}) + h_2 f'(T_{j-1}) + h_3 f(T_j) + h_4 f'(T_j) + h_5 f(T_{j+1}) + h_6 f'(T_{j+1}) = 0 \quad (7.38)$$

8 Verzeichnis der Abkürzungen

AdV	Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland
A-KART	Artenschutzkartierung
ALK	Automatisierte Liegenschaftskarte
ARC/INFO	Kurzbezeichnung aus Programmsystem ARC und relationaler Datenbank INFO der Fa. ESRI, Kranzberg
ATKIS	Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem
BALIS	Bayerisches Landwirtschaftliches Informationssystem
BIO-MESS	Bioindikatormeßnetz
BIX	Behördliches BTX-Informationssystem für großräumig wirksame umweltgefährdende Ereignisse
B-KART	Biotopkartierung
BOK	Bodenkataster
DAL	Digitaler Agrarleitplan
DB	Datenbank
DBMS	Datenbankmanagementsystem
DGM	Digitales Geländemodell
DIM	Daten- und Informationssystem Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft NRW
DKM	Digitales Kartographisches Modell
DLM	Digitales Landschaftsmodell
DSM	Digitales Situationsmodell
EDBS	Einheitliche Datenbankschnittstelle
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
E-KAT	Emissionskataster
EVU	Energieversorgungsunternehmen
GDB	Geographische Datenbasis bzw. geographische Datenbank
GelIS	Geländeinformationssystem
GEOGIS	Geographisches Grundinformationssystem
GIAP	Programmsystem Graphisch-Interaktiver Arbeitsplatz im Rahmen der AdV-Vorhaben ALK und ATKIS
GIS	Geographisches Informationssystem
HIFI-88	Höheninterpolation mit Finiten Elementen – Stand 1988
HIS	Höheninformationssystem
HYGRAS	Hybrides Graphisches System
HYGRIS	Hybrides Graphisches Informationssystem
IFR	Immissionsmeßsystem für Radioaktivität
IGMF	Interaktiver Graphischer Megafiler
I-KAT	Immissionskataster
INFOCAM	Geo-Informationssystem für Computer Aided Management der Fa. Kern, Aarau
INFOSAT	Informationen aus Satellitenbildern
KFU	Kernreaktorfernüberwachungssystem
KOSIS	Kommunales Statistisches Informationssystem
LANIS	Landschaftsinformationssystem
LIS	Landinformationssystem

MERKIS	Maßstabsorientierte Einheitliche Raumbezugsbasis für Kommunale Informationssysteme
NIBIS	Niedersächsisches Bodeninformationssystem
OSKA	Objektschlüsselkatalog
RaumDB	Raumbezogene Datenbank
RaumMB	Raumbezogene Methodenbank
RDB	Relationale Datenbank
RIS	Rauminformationssystem und auch Raumbezogenes Informationssystem
ROK	Raumordnungskataster
SCOP	Stuttgart Contour Program
SICAD	Siemens CAD, Raumbezogenes Informationssystem der Fa. Siemens, München
STABIS	Statistisches Bodeninformationssystem
STRUK	Strukturdatenbank
TOPIS	Topographisches Informationssystem der Bundeswehr
UIS	Umweltinformationssystem
WAF	Waldfunktionsplan
WIM	Wasserwirtschaftliches Informations- und Meßsystem