

Die Nachführung der topographischen Karte 1:25000 mit Hilfe der digitalen Bildverarbeitung

Autor(en): **Appelt, G.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik : VPK =
Mensuration, photogrammétrie, génie rural**

Band (Jahr): **85 (1987)**

Heft 4

PDF erstellt am: **10.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-233443>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Die Nachführung der topographischen Karte 1 : 25 000 mit Hilfe der digitalen Bildverarbeitung

G. Appelt

Die Nachführung topographischer Karten ist sehr arbeitsintensiv. Beim Bayerischen Landesvermessungsamt in München wurde deshalb ein Konzept entwickelt, die Nachführung der topographischen Karten 1:25000 durch den Einsatz der Rasterdatenverarbeitung zu beschleunigen.

Die technischen Anforderungen an den Raster-scanner, die erforderlichen Systemkomponenten und die benötigten Programme werden nachfolgend beschrieben. Dargestellt wird auch der Weg vom Scannen der unveränderten Kartendarstellung und der Erfassung der Veränderungen mit Hilfe von Orthophotos, über die Digitalisierung und Codierung der neuen Objekte einschliesslich der Schriften sowie die interaktive graphische Korrektur bis zur Ausgabe der nachgeführten Kartenoriginale.

La tenue à jour de cartes topographiques est un labeur très intensif. C'est pour cette raison que l'office bavarois des mensurations de Munich a développé un concept permettant d'accélérer la mise à jour des cartes topographiques au 1:25000 à l'aide du traitement automatique des données en trames. Les exigences techniques posées au balayeur de trame, les composantes du système requises ainsi que les programmes nécessaires sont décrits ci-dessous. On présentera aussi le parcours suivi, partant du balayage de la carte originelle et de l'acquisition des données modifiées au moyen d'orthophotographies, passant par la digitalisation et le codage des nouveaux objets-y compris la nomenclature - de même que par leur correction graphique interactive, et menant à l'édition des cartes originales mises à jour.

1. Die Ausgangssituation

Anlass für die Entwicklung dieses neuen Verfahrens war die Tatsache, dass am Bayerischen Landesvermessungsamt die Nachführung des topographischen Kartenwerks 1:25000 den gestiegenen Anforderungen nicht mehr entsprach. Der Turnus der Kartenerneuerung lag früher bei 10 bis 15 Jahren, während heute eine fünfjährige Kartenerneuerung als notwendig angesehen wird. Da Bayern als Flächenstaat rund 500 Kartenblätter zu bearbeiten hat, kann der Erneuerungsturnus nicht mit einer Sofortaktion verkürzt werden. Vielmehr führt nur ein über längere Zeit konsequent durchgezogenes Programm zum angestrebten Ziel der Verkürzung des Erneuerungsturnus.

Die klassische Lösung, die erforderliche Arbeitskapazität durch zusätzliches Personal oder vermehrte Arbeitsvergabe an Privatfirmen zu verstärken, ist bei der gegenwärtigen Haushaltslage nicht realisierbar. So kann die notwendige Leistungssteigerung nur durch neue Arbeitstechniken bzw. moderne Geräte erreicht werden.

2. Die Entscheidung für die Scanner-Technik

In der von der Deutschen Geodäten Kommission initiierten und von der AdV unter-

stützten Arbeitsgruppe «Automation in der Kartographie» wurde bereits seit 1969 systematisch geprüft, welche EDV-gestützten Verfahren die kartographischen Arbeiten vereinfachen können. Dabei zeigte sich:

- 1) Die Umstellung der vorhandenen topographischen Kartenwerke von der jetzt vorliegenden analogen Form in eine digitale Modifikation ist wegen der notwendigen manuellen Digitalisierung sehr zeitaufwendig. Dies sollte erst dann begonnen werden, wenn für digitale topographische Daten ein Bedarf auch bei Nutzern ausserhalb der Vermessungsverwaltungen besteht. Nach neuen Erkenntnissen ist diese Voraussetzung jedoch bald gegeben.
- 2) Präzisionszeichenautomaten können die graphische Vielfalt topographischer Karten nicht befriedigend wiedergeben. Insbesondere versagt diese Technik bei Kartenschrift und Rasterdarstellung. Die Zeit für die Aufzeichnung einer Karte ist abhängig vom Inhalt und beträgt bei der Grundriss- oder Höhenliniendarstellung einer topographischen Karte mehrere Stunden.
- 3) Die Verbindung der Raster-scannertechnik und der digitalen Bildverarbeitung bietet die volle Palette graphischer Gestaltungsmöglichkeiten, die bei entsprechender Anpassung qualitativ gute und rationelle Lösungen für kartographische Arbeiten erwarten lassen. Die Zeit für die Aufzeichnung ei-

nes Rasterbildes beträgt unabhängig vom Inhalt nur rund eine halbe Stunde.

Nach Information über die am Markt angebotenen Scanner wurden im Frühjahr 1983 bei der Firma Dr. Hell in Kiel, einer Tochter der Firma Siemens, Versuche durchgeführt, um deren Scannersystem und die dazu verfügbare Software auf die Eignung und Leistungsfähigkeit für die Nachführung topographischer Karten zu prüfen.

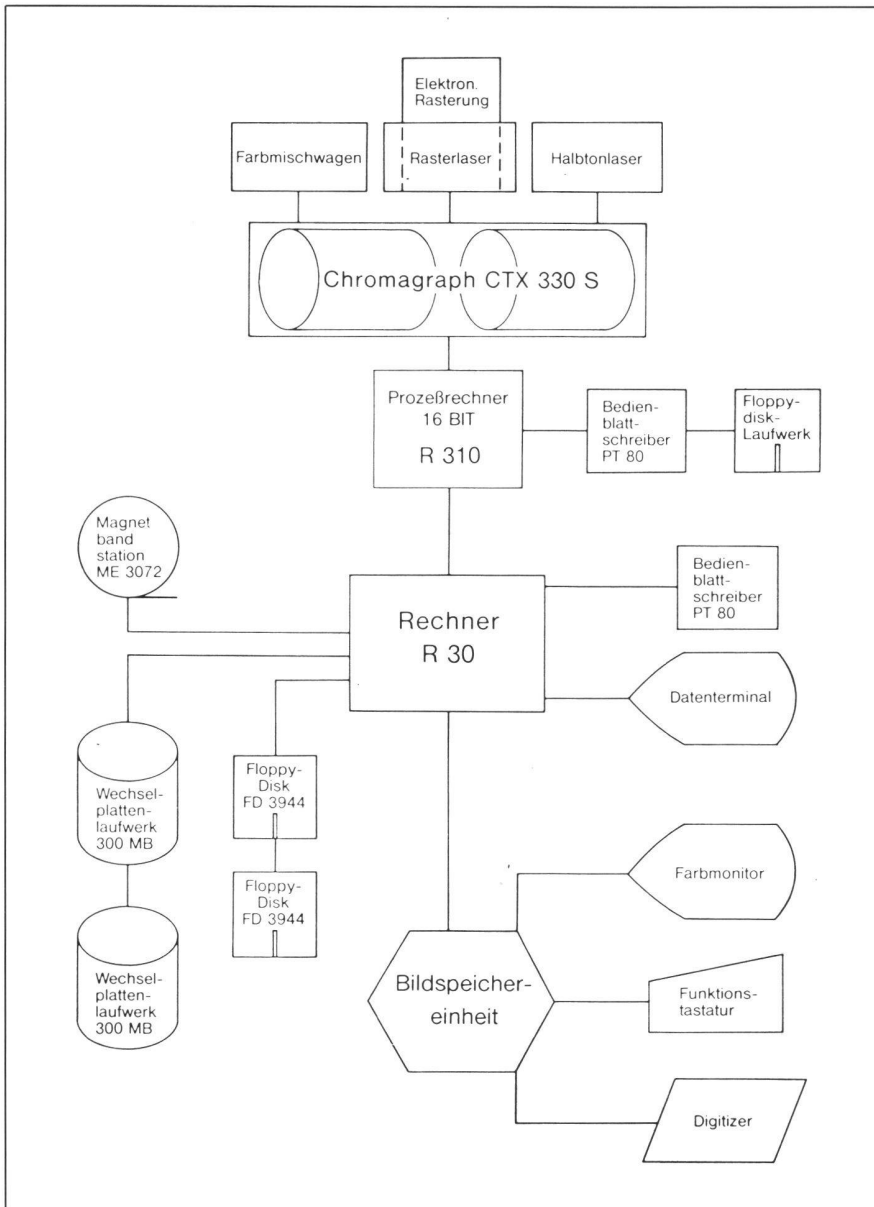
Es ergab sich:

- a) Die Auflösung des Scanners bzw. Recordors ist mit maximal 400 Linien/cm (d.h. 25 μ) genügend hoch, um die graphische Qualität einer topographischen Karte zu erhalten.
- b) Die vorhandenen Zusatzgeräte, wie interaktiver Farbbildschirm und Digitalisiertablett, sind für die erforderliche interaktive Bearbeitung geeignet. Besonders günstig ist dabei die kurze Zeit für den Bildaufbau und die starke Vergrösserungsmöglichkeit bis zur Darstellung jedes Pixels.
- c) Der Rechner und die Datenspeicherung auf einem Wechselplattenlaufwerk mit 300 MB reichen aus, um die grosse Datenmenge einer topographischen Karte 1:25000 zu bewältigen; auch genügt ein einziges Magnetband mit einer Dichte von 6 250 bpi für die Speicherung von einem Kartenblatt der TK 25.
- d) Die vorhandene Software, die ursprünglich für die Bearbeitung von Mustern in der Textilindustrie konzipiert wurde, bietet auch für kartographische Arbeiten befriedigende Teillösungen. Sie muss aber für einige typisch kartographische Aufgaben, z.B. Darstellen bogenlängenabhängiger Grenzsignaturen, Platzieren von geographischen Namen auf gebogenen Linien, noch erweitert werden.
- e) Der Scanner kann auch für andere wichtige kartographische Aufgaben vorteilhaft eingesetzt werden, wie etwa für die Herstellung von Vierfarbenausgaben für den Offsetdruck historischer Karten, die Verbesserung der Kontrastwiedergabe bei gerasterten Luftbilddarstellungen, die Reproduktion der Schummerung für topographische Karten, die Aufrasterung von Farbflächen nach vorgegebenen Deckern auf Folie unter Einhaltung genauer Rasterprozentwerte oder die Linienverbreiterung bei der Verkleinerung von Katasterkarten.

Auf der Grundlage der Versuche wurde eine Kosten-Nutzen-Analyse für die scannergestützte Nachführung der topographischen Karte 1:25000 aufgestellt.

Sie ergab, dass diese Arbeitsweise um rund 30% kostengünstiger ist als die übliche manuelle Bearbeitung der Karten-nachführung.

Vortrag zum 70. Deutschen Geodätentag in Nürnberg am 4.9.1986



1984 wurde deshalb zunächst als Grundeinheit der Scanner Chromagraph CTX 330 der Fa. Hell beschafft und auf Ende 1985 die weiteren Systemkomponenten für die Nachführung der topographischen Karten bestellt. Die Erweiterung wurde im Mai 1986 geliefert. Die für die kartographischen Arbeiten notwendige Software-Ergänzung wird voraussichtlich in zwei Monaten verfügbar sein. Die Gesamtkosten betragen rund 2,2 Mill. DM.

3. Hardware

Die Konfiguration des Systems zeigt die folgende Abbildung.

Das System besteht aus den drei Untergruppen Chromagraph CTX 330, Combiskop MDP und der Magnetbandstation.

a) Zu der Untergruppe Chromagraph CTX 330 gehören:

- der Scanner und Recorderteil maximales Vorlagen- und Aufzeichnungsformat 112 x 100 cm, Abtast- und Auf-

zeichnungsfeinheit bis 400 Linien/cm (= 25 μ), Abtast- und Aufzeichnungszeit 20 sec/cm Zylinderhöhe bei 200 Linien/cm, Massstabsänderung 7% - 1150%, Farberkennung von 15 wählbaren Einzelfarben, Aufzeichnung mit Halbtonlaser oder elektronischer Rasterung

- der 16-bit - Rechner
- das 8" - Floppy - Disk - Laufwerk
- der Bedienblattschreiber PT 80
- der Farbmischwagen.

b) Die Untergruppe Combiskop MDP besteht aus:

- dem 16-bit-Rechner R 30 mit einem 256 KW Festspeicher und 4 Laufbereichen
- dem Wechselplattenlaufwerk 3948 B für 300 MB
- dem Farbmonitor Format 25,5 x 26,5 cm, Bildspeicher 8 bit Tiefe
- der zentralen Bildspeichereinheit ZBE,
- einem alphanumerischen Bildschirm

- dem Bedienplatz mit der Funktionstastatur und dem Digitizer, Format 28 x 28 cm, Auflösung 0,1 mm
- dem Datenterminal FD 3944 mit einem 8"-Floppy-Disk-Laufwerk
- dem Bedienblattschreiber PT 80

c) Die Magnetbandstation ME 3072 mit Aufzeichnungsdichte 1600 oder 6250 bpi

d) Weitere Hilfsgeräte sind:

- ein Klimaschrank
- eine Registerlochstanze
- eine Filmentwicklungsmaschine.

4. Software

Entscheidend für die Leistungsfähigkeit des Arbeitsverfahrens ist die Software. Sie besteht aus einer grösseren Anzahl von Programmen, die wie folgt eingeteilt werden können:

a) Betriebsprogramme

- Steuerung der System-Komponenten-Rechner, Scanner, Recorder, alphanumerischer Bildschirm, interaktiver Farbbildschirm, Magnetplatten-speicher, Magnetbandgerät.

b) Dienstprogramme

- Übernahme von Fremddaten aus anderen Quellen
- Wandlung von Vektordarstellung in Rasterdarstellung.

c) Programme für geometrische Veränderung des Gesamtbildes

- Ändern des Massstabs, unabhängig in Achs- und Umfangsrichtung
- Parallelverschieben
- Drehen
- Ausschnittbildern (Window)
- Spiegelbild erzeugen.

d) Programme für optische Veränderung des Gesamtbildes

- Erzeugen des Negativbildes bzw. Positivbildes
- Addieren oder Subtrahieren von Bildern, Vereinigen zu farbgleichen Bildern
- Verbreitern/Verschmälern der Bildelemente, Erzeugen von Freistellmasken
- Tilgen von singulären Bildpunkten (Staubretusche)
- Rastern der Bildelemente nach vorgegebenen Werten für Rasterweite, Rasterprozent und Winkelung.

e) Programme für Veränderungen von Bildteilen

- interaktives Korrigieren am Farbbildschirm
- Füllen von Umrisskonturen mit Farben oder Raster.

f) Programme für kartographisches Editieren

- Definieren von Kartensignaturen und Kartenschriften
- Belegen von durch Koordinaten vorgegebenen Einzelpunkten oder Vektorzügen mit Kartensignaturen
- Belegen von gescannten Farbpunk-

ten oder Farblinien mit Kartensignaturen nach wählbarer Zuordnung

– Plazieren von Kartenschriften auf vorgegebene Standlinien.

Für die Arbeitseinteilung und die praktische Arbeit ist das Zeitverhalten der Rechenprogramme sehr wichtig. So soll zum Beispiel die interaktive Arbeit am Bildschirm durch keine lange Wartezeit für den Bildaufbau unterbrochen werden.

Andere Arbeitsschritte, wie etwa eine Transformation aller Bildelemente zur Einpassung auf vorgegebene Stützpunkte, können längere Bearbeitungszeiten erfordern und sollten deshalb nach der regulären Arbeitszeit ausgeführt werden. Da der Rechner mehrere getrennte Laufbereiche hat, können während des zeitaufwendigen Editierens am Scanner Vorlagen abgetastet oder am Recorder Filme belichtet werden. Dadurch wird eine gute Ausnutzung der Anlage erreicht.

5. Das konzipierte Arbeitsverfahren

5.1 Scannen der Originalfolien

Grundlage der Kartennachführung sind die vorliegenden Originalfolien von Grundriss, Höhenlinien, Gewässerkontur, Gewässerfläche und Vegetationsfläche. Damit später Schriften mit Hilfe der Bildverarbeitung freigestellt werden können, wird vor dem Scannen noch durch manuelles Abdecken Schrift und Grundriss getrennt. Die Kartendarstellungen der Original-Folien werden dann einzeln gescannt. Die zeilenweise erhaltenen Pixel-Folgen werden laulängencodiert auf Magnetplatten gespeichert. Nach dem Scannen ist die Karte als «Rasterbild», d.h. als Rasterdarstellung in Pixeln, jedoch nach Folie getrennt in verschiedenen Ebenen, elektronisch auf Magnetplatten gespeichert.

5.2 Erstellen des Tilgungsdeckers und der Veränderungsfolien

Die wegfallenden Kartenobjekte oder einzufügenden Kartennachträge erhält man aus Orthophotos im Bildmassstab 1:10 000. Zum leichteren Erfassen der Veränderungen werden blattviertelweise Vergrößerungen der Topographischen Karte 1: 25 000 auf 1:10 000 erstellt und die Orthophotos darauf eingepasst. Dann zeichnet man einen «Tilgungsdecker» für alle wegfallenden Objekte. Die neu einzufügenden linienhaften Objekte werden auf «Veränderungsfolien» hochgezeichnet, z.B. neue Strassen, Wege, Bachkorrekturen, wobei nur die Mittelachsen skizziert und die Strassenklassen dazu geschrieben werden. Nun werden die Tilgungsdecker und die «Veränderungsfolien» gescannt.

5.3 Digitalisieren der Linienzüge

Auf dem Farbbildschirm werden die Stützpunkte der Linienzüge der neuen Strassen, Wege und Gewässer mit dem Faden-

kreuz des Sensors nachdigitalisiert und die Klassifizierungen eingegeben. So kann der Rechner nach der Strassenklasse die jeweilige Signatur erzeugen. Neue Gewässerkonturen werden ebenfalls nachdigitalisiert und zugleich als Gewässer klassifiziert. Wenn es sich um ein flächenhaftes Gewässer handelt, wird die Fläche dem Gewässerflächendecker zugeordnet.

5.4 Erzeugen der Rohkarte

Die durch die Digitalisierung am Bildschirm erzeugten Vektordaten der neuen Linienzüge werden in einem Rechenprogramm zu einem Rasterbild umgewandelt. Durch Überlagerung dieses Rasterbildes mit dem gespeicherten Rasterbild der bisherigen TK 25 und dem Rasterbild des Tilgungsdeckers erhält man das Rasterbild der neuen Rohkarte 1: 25 000. Sie wird im Massstab 1:10 000 blattviertelweise auf Film ausgegeben.

5.5 Erfassen der verdrängten Kartenobjekte

Die Rohkarte dient als Anhalt für die Erfassung der neuen Gebäude, Dämme, Böschungen, topographischer Einzelheiten, Waldflächen, Baumsignaturen, kurz all der Kartenobjekte, die infolge Verdrängung geometrische Verschiebungen erfahren. Diese Kartensignaturen werden im Massstab 1:10 000 auf einer Klarsichtfolie lagekorrigiert aufgetragen, so dass das erhaltene Kartenbild nicht mehr überarbeitet werden muss. Für einzelne Kartensignaturen, z.B. Gebäude, Böschungen, topographische Einzelzeichen oder Baumsignaturen, verwendet man mit Vorteil Abreibefolien, weil sie ein gut deckendes kontrastreiches Bild ergeben. Auch diese «Veränderungsfolien» werden gescannt und als Rasterbild gespeichert.

5.6 Einfügen der Schrift

Von der neuen Beschriftung werden auf einem Offline-Digitizer nach einem Schriftentwurf die Namen und deren Standlinien, Schriftarten und Farbzuoordnung erfasst. Diese Daten werden dem Rechner über Magnetband zugeführt, der sie zu einem neuen Rasterbild der Schrift umsetzt. Durch Verbreiterung des Schriftbildes ergibt sich dann ein Rasterbild des Freistellungsdeckers. In gleicher Weise werden neue politische Grenzen auf dem Off-line-Digitizer anhand eines Vormerkbogens nach geometrischem Verlauf und Klassifizierung erfasst und über Magnetband dem Datenbestand hinzugefügt.

5.7 Zusammenstellen nach Druckfarben

Die einzelnen Rasterbilder werden entsprechend der Zuweisung zu den vier Druckfarben Schwarz, Blau, Braun und Grün zusammengefasst. Bei dem Rasterbild für die Druckfarbe Blau wird neben der Gewässerkontur die Gewässerfläche entsprechend dem Musterblatt als Punktra-

ster mit 25% Deckung, 54 Linien/cm und 45° Neigung hergestellt.

5.8 Revision des Kartenbildes

Anschliessend wird das neue Kartenbild auf dem Farbbildschirm eingehend durchgesehen und soweit notwendig, z.B. bei den Abrundungen von Strassenkreuzungen, interaktiv korrigiert.

Für jede Druckfarbe wird dann ein photographischer Film des Kartenbildes auf dem Recorderteil des Chromograph CTX 330 ausgegeben. Eine Chromalinkopie ist die Grundlage für die Kartenrevision, die nach der bisher üblichen Methode ausgeführt wird. Notwendige Korrekturen werden interaktiv auf dem Farbbildschirm ausgeführt.

5.9 Speichern des Kartenbildes

Die neue Karte besteht aus digital gespeicherten Rasterbildern des Grundrisses ohne Schrift, der Gewässerkontur mit Schrift, der Höhenlinien mit Schrift, der Waldfläche, der Gewässerfläche, der schwarzen Beschriftung. Diese Rasterdaten werden auf Magnetband ausgegeben und für die nächste Kartennachführung aufbewahrt. Ein nochmaliges Scannen der vorliegenden Kartendarstellung ist dann nicht mehr notwendig. Die Kartengraphik kann nicht mehr an Qualität verlieren, ganz gleich, wie oft die Karte nachgeführt wird.

6. Mögliche Variante

Um das Digitalisieren neuer Strassen und die Eingabe der Strassenklasse zu vermeiden, ist eine farbige Kodierung der neuen Strassen auf der «Veränderungsfolie» möglich; so würde z.B. eine Autobahn als violette Linie, eine I B – Strasse als blaue Linie gekennzeichnet, die Position einer Waldsignatur zeigt ein dunkelgrüner Punkt. Nach dem Scannen werden die farbigen Linienzüge bzw. die Farbpunkte durch die Kartensignatur nach dem Musterblatt ersetzt. Diese Arbeitsweise setzt aber voraus, dass in der Software ein Programm für das Glätten des farbigen Linienzuges auf der Strassen-Veränderungsfolie verfügbar ist, um einen zittrigen Verlauf der Strassen in der Kartendarstellung zu vermeiden.

7. Bewertung des Verfahrens

Im Vergleich der Verfahrensabläufe der scannerunterstützten Kartennachführung und der bisher üblichen manuellen Kartennachführung durch Zeichnung oder Gravur sind folgende vier Punkte besonders bemerkenswert:

- Das Verfahren erfordert keine Digitalisierung des gesamten Karteninhalts der nachzuführenden Karte. Nur die einzufügenden neuen linienförmigen Objekte sind hinsichtlich der geometrischen Lage und der Klassifizierung zu erfassen. Die weiterhin unveränderten

darzustellenden Kartenobjekte sowie die neuen Gebäude und Böschungen werden durch das Scannen als graphische Bild behandelt. Für wegfallende Objekte ist nur ein grober Decker zu erstellen. Dadurch wird die mühsame Arbeit des manuellen Digitalisierens stark vermindert und nur auf das unumgänglich Notwendige beschränkt.

Andererseits erhält man auf diese Weise keine «digitale Karte». Die im Plattenspeicher lagernden Kartendaten in Rasterform können deshalb nicht dazu dienen, Karten in anderer Gestaltung, d.h. mit anderen neuen Signaturen oder unter Weglassen bestimmter Objekte zu schaffen.

- b) Ein wichtiger Anteil der Arbeitsvereinfachung ergibt sich aus der Möglichkeit, klassische Reproduktionsarbeiten durch digitale Bildverarbeitung zu ersetzen. Anstatt Additionskopien, Seitenumkehrungen, Rasterkopien, Vergrößerungen oder Verkleinerungen

real photographisch oder kopiertechnisch anzufertigen, werden diese reproduktionstechnischen Prozesse durch entsprechende Rechenvorgänge mit den Rasterbildern ausgeführt. Nur die tatsächlich benötigten fertigen Filme werden als Zwischen- oder Endergebnis auf dem Recorder ausgegeben. Dadurch erspart man Arbeitszeiten und Sachkosten.

- c) Die Möglichkeiten der digitalen Bildverarbeitung sind sehr vielfältig, aber nur über teure Geräte zu nutzen. Um die Geräte gut auszulasten, müssen langwierige kartographische Arbeiten möglichst unabhängig von den teureren Geräten an getrennten Arbeitsplätzen ausgeführt werden. Der Prozess der Kartennachführung wird in Teilschritte zerlegt, die in der Regel von verschiedenen Bearbeitern ausgeführt werden. Zwar sind es weniger Teilschritte, wie bei den derzeit üblichen Arbeitsverfahren. Aber das Ideal eines Arbeitspro-

zesses, bei dem ein Bearbeiter von Anfang bis Ende ein Kartenblatt vollständig nachführt, ist noch nicht erreicht.

- d) Ein Programm für die Wandlung der Rasterdaten in Vektordaten ist für die Nachführung der topographischen Karten nicht notwendig. Für andere zusätzliche Aufgaben, wie z.B. die Digitalisierung von Höhenlinien-Folien oder Katasterkarten, könnte allerdings der Scanner mit einem Rechenprogramm für die Raster-Vektor-Wandlung vorteilhaft eingesetzt werden. Es lohnt sich also, die Entwicklung in diesem Bereich aufmerksam zu verfolgen.

Adresse des Verfassers:
Prof. Dr.-Ing. Gerfried Appelt
Präsident des Bayerischen
Landesvermessungsamts
Alexandrastrasse 4
D-8000 München 22

Über die Rotation der Erde

I. Bauersima

Das Newton'sche Gravitationsgesetz

36. Newton überlegte deswegen anders: Wenn schon der absolute Raum und die absolute Zeit in den Bewegungsgesetzen 18.1, 18.2 und 18.3 implizit figurieren, und falls diese Gesetze die Bewegung eines bestimmten isolierten Systems von Massenpunkten adäquat beschreiben, dann muss es möglich sein, durch Beobachtungen dieses Systems den absoluten Raum und die absolute Zeit verfügbar zu machen.

Dies unter den folgenden Bedingungen:

37. Das erwähnte Massenpunktesystem

- 1) muss in der Natur existieren,
- 2) muss von anderen Systemen praktisch isoliert sein,
- 3) muss so einfach sein, dass wir es mit Sicherheit nur durch einige wenige physikalische Parameter (wie Massen) «vollständig» beschreiben können und
- 4) alle auf die Massenpunkte dieses Systems wirkenden Kräfte müssen als Funktionen der erwähnten Parameter und koordinateninvarianten Größen – wie der gegenseitigen Entfernungen der Massenpunkte – bekannt sein. Denn die Bewegungsgesetze 18.1), 18.2) und 18.3) verlangen nach solchen Kräfte-Modellen, wenn sie überhaupt – als Bewegungsgleichung des Massenpunktesystems – eine Lösung bieten sollen.

38. Ein solches System bot sich Newton in Form des Sonnensystems an. In der Tat erfüllte es die zuvor erwähnten ersten drei Bedingungen:

- 1) es existiert, indem es den optischen Richtungsbeobachtungen zugänglich ist,
- 2) es ist von anderen Systemen praktisch vollständig isoliert, da die übrigen Objekte – nämlich die Fixsterne – keine messbaren Parallaxen zeigten und somit sich als unendlich weit entfernte Objekte erwiesen haben, und

3) das System ist sehr einfach, da ein Planet dem anderen praktisch nur als ein Punkt erscheint und somit die Planetenmassen die einzigen Parameter sind, durch die das System «vollständig» beschrieben wird.

39. Die Bedingung 37.4, die nach dem Modell der zwischen den Planeten wirkenden Kräfte verlangt, wurde zunächst nicht erfüllt. Dies war die Lücke, die noch Newton zu füllen hatte.

40. Die grossen Vorarbeiten haben bereits Galileo und Kepler geleistet.

Der erste, indem er die aristotelische «Gegensätzlichkeit» der Erde und des Himmels, insbesondere deren inhomogenen und anisotropen Aufbau entkräftete. Dies durch seine Entdeckung der Einheitlichkeit des physikalischen Aufbaus der Himmelskörper (Sonnenflecken, Mondlandschaft, Venus-Phasen usw.) und der sich wiederholenden Bewegungsstrukturen, wie das Sonnensystem und das Jupiter-Mondsystem. Das Weltall wurde dadurch zum dreidimensionalen räumlichen Kontinuum mit euklidischer Metrik, besiedelt durch Himmelskörper, deren substantielle Eigenschaft – die träge Masse – Newton bereits aus der irdischen Erfahrung bekannt war. Mit solch einem Weltall ist

die Hypothese der Existenz einer universalen – in den Himmelskörper selbst angesiedelten – Fernwirkungskraft nicht nur verträglich, sondern sogar heuristisch sinnvoll.

41. Die konkrete Form der Abhängigkeit dieser Fernwirkungskraft von den *koordinateninvarianten* Eigenschaften des Systems zweier fernwechselwirkenden Massenpunkte (die Massen und die Entfernung) erhielt Newton durch die Analyse der drei Kepler-Gesetze 13. Er überlegte dabei etwa wie folgt:

42 a) Wenn die Wirkung einer Kraft den drei Newton'schen Bewegungsgesetzen folgt, dann kann diese Kraft aus Beobachtungen der Bewegung eines isolierten Massenpunktesystems abgeleitet werden.

b) Da der Raum physikalisch homogen und isotrop ist, muss dabei die gesuchte Kraft in Form einer Funktion koordinateninvarianter Größen, die die Konfiguration des Massenpunktesystems vollständig beschreiben, zum Ausdruck kommen. Solche Größen sind die Massen und die gegenseitigen Entfernungen der Massenpunkte.

c) Die wahre (also nicht nur scheinbare) Bewegung eines solchen Massenpunktesystems, nämlich des Sonnensystems, stand dabei Newton in Form der drei Kepler-Gesetze 13 zur Verfügung. Diese gelten im heliozentrischen System, in dem bekanntlich die Sonne und die Himmelskugel (durch Fixsterne materialisiert) ruhen.

d) In diesem Zusammenhang musste Newton zwei Arbeitshypothesen annehmen:

- 1) Das heliozentrische System sei ein Inertialsystem und
- 2) die in den 3 Kepler Gesetzen figurierende Kepler'sche Zeit ist identisch mit der Newton'schen absoluten Zeit.