

**GEDANKEN ZUM INTERAKTIVEN
RECHNERGESTÜTZTEN ENTWERFEN
VON TRASSEN FÜR VERKEHRSSYSTEME**

*Wilhelm CASPARY
Hansbert HEISTER
Walter WELSCH*

In: *CASPARY, Wilhelm / WELSCH, Walter (Hrsg.) [1982]:*

Beiträge zur großräumigen Neutrassierung

Schriftenreihe des Wissenschaftlichen Studiengangs Vermessungswesen der Hochschule der Bundeswehr München, Heft 6, S. 80-101

ISSN: 0173-1009

GEDANKEN ZUM INTERAKTIVEN RECHNERGESTÜTZTEN ENTWERFEN VON TRASSEN FÜR VERKEHRSSYSTEME

von W. Caspary, H. Heister und W. Welsch

1. Interaktive Informationsverarbeitung

Bemühungen, die heutigen Möglichkeiten der Computertechnik für den Arbeitsprozeß beim Entwurf einer neuen Trasse nutzbar zu machen, führen zwangsläufig zu einem Konzept, das im Rahmen interaktiver Informationsverarbeitung seit längerem Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen ist. Im Zusammenhang mit Informationsverarbeitungsprozessen, an denen ein Computer beteiligt ist, spricht man häufig von Automation, was zum Beispiel in dem Begriff "Automatische Datenverarbeitung" zum Ausdruck kommt. Dies ist aber nur insoweit richtig, als (auch) automatisch ablaufende Computerprogramme eingesetzt werden. Im größeren Zusammenhang der Informationsverarbeitung ist der Computer aber nur als der eine - automatisch arbeitende - Partner einer Interaktion zu sehen, an der wenigstens zwei Teilsysteme vom Typ Mensch oder Automat beteiligt sind. Die Beziehungen zwischen den Teilsystemen sind durch wechselseitige Beeinflussung beim Informationsaustausch geprägt.

1.1 Kommunikationssysteme

Die Kommunikation zwischen den Teilsystemen Mensch oder Maschine tritt in drei Systemvarianten auf: Zwischenmenschliche, teilautomatisierte und automatisierte Interaktionen. Den Systemvarianten kommt auf Grund der spezifischen Funktionsfähigkeiten der Teilsysteme unterschiedliche Bedeutung zu, die wohl bedacht werden muß, wenn zu entscheiden ist, welche Systemvarianten zur Lösung komplexer Aufgaben eingesetzt werden sollen (Schwenk, 1978).

Deterministische Prozesse fallen in den Funktionsbereich des Automaten. Selbst wenn bei Steuerungs- und Regelungsaufgaben Entscheidungen gefällt werden müssen, braucht der Bereich der automatisierten Interaktion nicht verlassen zu werden, sofern nur der Entscheidungsprozeß vorherbestimmbar ist und in Programmen vorherbestimmt wird. Solche Prozesse treten vornehmlich im rein technischen Bereich auf. Die Teilsysteme sind von sich aus nicht lernfähig.

Liegt im Gegensatz dazu, etwa bei einer Meinungsfindung in freier Diskussion, ein Prozeß ganz im Bereich subjektiver Bewertungs- und Beurteilungskriterien der beteiligten Partner, kann nur die Systemvariante der zwischenmenschlichen Interaktion zum Erfolg führen, da der Entscheidungsbereich keiner Beschränkung unterliegt. Unterliegt aber der Entscheidungsbereich eines Partners, etwa wegen ideologischer Gebundenheit oder durch Vorgaben irgendwelcher Art, gewissen Beschränkungen, so muß wenigstens das Attribut der Freiheit des ablaufenden (Diskussions-) Prozesses in Frage gestellt werden; der Dialog nimmt mehr oder minder teilautomatisierten Charakter an. - Im Prinzip sind beide Teilsysteme der zwischenmenschlichen Interaktion lernfähig.

Für viele Aufgaben im technischen Bereich, insbesondere dort, wo nach Verarbeitung primärer Information zur Entscheidungsfindung sekundäre Information (Kröll, 1977) benötigt wird, kann im teilautomatisierten Interaktionssystem das Zusammentreffen der Systemgrößen Mensch und Automat zu sinnvollen Funktionsergänzungen führen. Der Mensch setzt in Ausübung entscheidungsspezifischer Funktionen den Automaten als Instrument für die Lösung fest umrissener Aufgaben ein. Das Teilsystem Mensch ist für den Ausgang des Dialogs verantwortlich. Es ist lernfähig.

1.2 Entwerfen im teilautomatisierten Interaktionssystem

Zunächst seien einige allgemeine Gedanken zum Begriff des Entwurfs und zur Notwendigkeit der Informationsverarbeitung beim Entwerfen geäußert.

Der Begriff des Entwurfs ist allgemein, nicht ingenieurspezifisch. Wesentliche Begriffsinhalte können deshalb in vielen Bereichen herausgearbeitet werden.

Ein Künstler etwa kann sich der Frage, wie etwas geformt werden soll, losgelöst von einer Zweckbestimmung stellen. Er hat lediglich die Eigenschaften des verwendeten Materials und die Regeln der Ästhetik zu berücksichtigen. Seine Entwurfstätigkeit steht in krassem Gegensatz zu Inhalten der Automation; die Frage eines teil- oder vollautomatischen Kommunikationssystems stellt sich erst gar nicht. Der künstlerische Entwurf ist frei.

Der Entwurf eines Hauses liegt im Feld zwischen Kunst und Technik. Zahlreiche Zwänge und die Forderung nach Zweckmäßigkeit konkurrieren oft mit den

allgemeinen Gesetzen der Ästhetik des Hauses und seiner Einbettung in die Umgebung. Darüber hinaus hat sich der Architekt dem Diktat von Bauordnungen, Normen und Kosten zu beugen. Im allgemeinen wird er all diese Informationen aber noch ohne einen automatisch arbeitenden Kommunikationspartner bewältigen können.

Anders verhält es sich beim Entwurf technischer Großprojekte, was am Beispiel der hier interessierenden großräumigen Neutrassierung von Landverkehrssystemen gezeigt werden soll. Analog zu den wesentlichen, einen künstlerischen Entwurf prägenden Faktoren sind hier die Art des Verkehrssystems und die Topographie, in die das Verkehrsmittel eingebettet werden soll, die den Trassenentwurf bestimmenden Elemente. Aufgabe des Entwurfs selbst ist die Verknüpfung des Verkehrsweges mit der Topographie. Diese Aufgabe eröffnet dem Entwurfsingenieur zwei Phasen kreativer Gestaltungsmöglichkeit: die Trassenfindung und die Trassengestaltung. Unter Trassenfindung wird das Aufsuchen und die Beurteilung möglicher und die Auswahl günstiger Trassen (Fischer und Karner, 1980) verstanden. In der Trassengestaltung wird eine beschränkte Anzahl erfolgversprechender Trassen untersucht und in der Folge der Fahrwegformen - Aufständiger Fahrweg, Einschnitt, Tunnel, Sonderbauwerke - variiert, bis schließlich eine günstigste Trasse zur Bauausführung vorgeschlagen werden kann.

Das Herausarbeiten dieser günstigsten Trasse ist ein sehr komplexer Vorgang. Einerseits stellt die Einbettung eines technischen Erzeugnisses in naturgegebene Landschaften eine ständige Herausforderung an das ästhetische Empfinden dar, andererseits sind der Kreativität des Entwurfsingenieurs noch enge Grenzen gesetzt als dem in höherem Maße dem Künstlerischen verhafteten Architekten. Technische Vorgaben für die Trassierungsparameter in Grund- und Aufriß, soziologische Aspekte wie Lärmbelästigung und Erholungsnutzung der Landschaft, ökologische Zwangsräume für Arten-, Natur- und Landschaftsschutz, Verwaltungsrichtlinien für die Landnutzung, bestehende Planungen anderer Stellen und nicht zuletzt das ökonomische Diktat der Kosten und Rentabilität schränken die Freiheit des Entwurfs ein; sie heben sie aber nicht gänzlich auf. Die Vielfalt der Faktoren bewirkt eine Vielzahl von Arbeitsschritten, Beurteilungsmöglichkeiten, Entscheidungsnotwendigkeiten, die im Rahmen denkbarer Lösungen zu guten und schlechten Ergebnissen führen können. Einzelne Arbeitsschritte können durchaus automatisiert werden, Beurteilungen und Entscheidungen aber bleiben dem freien Willen des Menschen vorbe-

halten. Die umfassende Aufgabe eines Trassenentwurfs ist nicht determinierbar, sie ist vielmehr ein gutes Beispiel für die teilautomatisierte Systemvariante des Mensch-Maschine-Dialogs.

Hier treten Mensch und Automat als selbständige und offene Systeme auf, deren wechselseitig sich beeinflussende Informationsverarbeitung ein Regelsystem darstellt, das von den menschlichen Fähigkeiten der Selektion, Interpretation, Beurteilung und Entscheidung und von den automatischen Komponenten der Informationsspeicherung, Ordnung, vorgedachten Verarbeitung und Darstellung geprägt wird.

Abgesehen davon, daß die Begriffe des Gestaltens und Entwerfens als menschliche Tätigkeit auf Grund ihrer gewissen Subjektivität von sich aus der vollständigen Automation widerstreben (Hoinkes, 1980), ist infolge der erweiterten und verbesserten Hardware-Entwicklungen ein Trend zur interaktiven Bearbeitung auch deterministischer Prozesse eindeutig feststellbar: gestufte Arbeitsabläufe können erheblich flexibler gestaltet werden (Conzett, Frank und Misslin, 1980).

1.3 Hard- und Softwarekonfigurationen

Für die Funktionsweise eines interaktiven Systems sind vier Merkmale charakteristisch, die gleichzeitig eine Abgrenzung gegenüber zwischenmenschlichen und automatisierten Interaktionssystemen darstellen (Schwenk, 1978):

- Schrittweise Bearbeitung eines Aufgabenkomplexes mit der Möglichkeit der Arbeitsteilung zwischen Mensch und Automat, wobei die verschiedenen Qualitäten der Systempartner ausgenutzt werden. Der Benutzer des Automaten verfügt über das Instrument der Steuerung, d.h. er kann die einzelnen Arbeitsvorgänge einleiten, unterbrechen, beenden,
- automatisierte Dokumentation des Bearbeitungsstandes zu einem vom Benutzer gewählten Zeitpunkt. Durch freie Wahl von Darstellungsvariablen sind analoge oder digitale Gesamt- und Detaildarstellungen möglich,
- Aufbau und Manipulation (Korrigieren, Löschen, Ergänzen) von Daten durch Benutzereingriff,
- Benutzung auch durch datenverarbeitungs-ungeübte Fachkräfte.

Die Realisierung dieser Dialogmöglichkeiten für den Trassenentwurf stellt

an die Ausgestaltung des interaktiven Arbeitsplatzes gewisse Forderungen, die aus der Aufgabe abgeleitet werden, daß im Trassenentwurf eine rechenbare, somit digital darstellbare Geometrie mit der meist in der analogen Form einer Karte vorliegenden Geländeinformation zu verbinden ist. Das bedeutet, daß bei der heute allgemein verfügbaren Peripherie ein interaktiver graphischer Arbeitsplatz mit alphanumerischen Dialogmöglichkeiten unumgänglich ist. Datenumfang und -struktur, geplante Arbeitsverfahren und wirtschaftliche und organisatorische Aspekte bestimmen Konfiguration und Komfort des Systems.

Kernstück des interaktiven graphischen Arbeitsplatzes ist der graphische Bildschirm, der in Bezug auf die Bildgenerierung im refresh oder im storage Mode angeboten wird. Für die statische Darstellung von Geometrien ist eine preiswerte Speicherbildröhre geeignet und ausreichend. Der Vorteil eines refresh-Displays liegt in der dynamischen Wiedergabe von Geometrieänderungen. Der Digitizer ist ein spezifisch graphisches Eingabegerät hoher Genauigkeit, wobei die on-line Digitalisierung erhöhten Komfort bietet. Für die Rückkoppelung zwischen Benutzer und Rechner können alphanumerische Tastaturen, Funktionstasten, Menüs, graphische Tablettts und die Position einer Marke auf dem Bildschirm verwendet werden. Weitere Hilfsmittel für graphische Manipulationen werden durch Begriffe wie Windowing, Clipping, Zooming und Scrolling angesprochen (Stuhlmann, 1980). Zur Dokumentation der Ergebnisse stehen Drucker, on- und off-line Plotter, der Bildschirm selbst und Hardcopies des Bildschirminhalts zur Verfügung. Das Schlagwort vom "elektronischen Bleistift, Papier, Lineal und Radiergummi" beschreibt zwar sinngemäß, aber nur sehr unvollständig die Möglichkeiten des vollendet ausgestatteten interaktiven graphischen Arbeitsplatzes.

Graphische Operationen sind in der Regel sehr rechenintensiv. Dazu kommt, daß bei interaktiven Arbeiten der Benutzer Realzeitverhalten oder zumindest einen akzeptablen Dialogrhythmus erwartet. Die Erfüllbarkeit dieser Erwartungen hängt wesentlich von der Schnittstelle der dezentralen Peripherie zum zentralen Rechner ab. Mit steigendem Dialogkomfort gibt es dabei die Möglichkeiten des einfachen Bildschirms mit Tastatur, des gepufferten Bildschirms, des intelligenten Terminals und des intelligenten Satelliten (Stuhlmann, 1980).

Da Anwender immer weniger geneigt sind, Kompromisse zu Lasten des Bedienungskomforts oder der zeitlichen Abwicklung zu schließen, sind nicht nur

für das Grundsystem hohe Investitionskosten erforderlich. Auch die Software erfordert einen hohen Entwicklungsaufwand.

Wesentliche Richtlinien für die Konzeption der Software zum interaktiven Entwurf einer Trasse ergeben sich aus zwei Gesichtspunkten.

Die wesentlichen Arbeitsschritte sind das Sammeln, die Verarbeitung, die Manipulation und die Ausgabe von primärer und sekundärer Information. Eine möglichst hohe Unabhängigkeit dieser Bereiche kann durch einen modularen Aufbau der Software erreicht werden. Dies ist auch erheblich für einen reibungslosen Austausch einzelner Programmteile, wenn sich die Art der Datengewinnung, die technischen Randbedingungen oder die Aufgabenstellung ändern. Der modulare Aufbau eines Softwaresystems stellt gewissermaßen eine horizontale Gliederung dar.

Eine vertikale Gliederung ergibt sich aus der Tatsache oder der Forderung eines datenbankbezogenen Informationssystems. Werden Daten in speziellen Formaten und Codes auf geeigneten Datenträgern angelegt und zur Weiterverarbeitung organisiert, so stellt diese Datensammlung eine Datenbasis dar (Kröll, 1977). In einer Datenbank wird eine solche Datenbasis durch ein Datenverwaltungssystem zugänglich gemacht und aktiviert. Ein System schließlich, das auf einer Datenbank aufbauend Daten verarbeitet, sie mit Zeichen und Zahlen versieht oder graphisch so darstellt, daß der Mensch daraus Informationen gewinnen kann, nennt man datenbankbezogenes Informationssystem. Dieses ist organisatorisch von den Programmteilen getrennt, die man als Anwenderprogramme bezeichnet und die ihrerseits wieder unabhängig von den Daten und deren Nachführung und Kontrolle entwickelt werden (Conzett, Frank und Misslin, 1980).

Das Softwaresystem kann also im Großen als ein datenbankbezogenes Informationssystem mit modular gegliederter Anwendersoftware beschrieben werden. Die "Interaktivität im Kleinen" (Conzett, Frank und Misslin, 1980) ist es dann, die in vielen Einzelheiten der Führung durch die verschiedenen Arbeitsschritte bei Eingabe, Verarbeitung, Manipulation und Ausgabe von Daten und Information die teilautomatisierte Entwurfsbearbeitung gestaltet und die Funktionsweise des interaktiven Gesamtsystems kennzeichnet.

2. Interaktive Entwurfsbearbeitung

Jede Programmentwicklung basiert auf der Analyse der zu lösenden Aufgaben und orientiert sich an den technischen Möglichkeiten des verfügbaren Rechners und seiner Peripherie.

Die Arbeitsschritte, in denen eine Trasse geplant, entworfen und realisiert wird, bauen in logischer Folge aufeinander auf. Sie legen den Arbeitsablauf fest, der sich in der Praxis herausgebildet hat und auch dann keine Änderung erfuhr, als die elektronische Datenverarbeitung begann, die menschliche zu unterstützen. Der Trassierungsingenieur wurde im rechnerischen und graphischen Bereich der Datensammlung, -umformung und -darstellung entlastet. Entscheidungsgrundlagen konnten wirtschaftlicher, objektiver und in einer größeren Anzahl von Alternativen erarbeitet und dargeboten werden. Sobald aber eine Entwicklung die kreative Entscheidungsfreiheit einzuengen drohte, mußte man sie als Fehlleistung verwerfen. Dieser Grundsatz wird durch verstärkte Hinzunahme interaktiver numerischer und graphischer Möglichkeiten nicht angetastet oder gar aufgehoben, sondern in natürlicher und flexibler Weise unterstützt. Der richtige Trend ist der, der ein "ideales" Trassieren zum Ziel hat.

Richtungsweisend für computerunterstütztes Entwerfen (Computer Aided Design - CAD) war und ist wohl noch das "Programmsystem zur Optimierung des Straßenentwurfs", über das als Forschungsprogramm vom Bundesministerium für Verkehr in zahlreichen Veröffentlichungen (BMV, 1968 - 1977) berichtet wurde. Die ersten Erfahrungen mit Trassierungen am interaktiven graphischen Arbeitsplatz wurden in Stuttgart (Benner und Domsch, 1976) gesammelt. Sehr weitgehende, arbeitsfähige Realisierungen im Bereich des Trassenvorentwurfs bieten z.B. die Programmsysteme OPT-1 (Manolopoulos, 1979) und EPOS-I (KfK-CAD, 1980). Weitere Systeme werden vom Arbeitsausschuß DV-Straßenentwurf der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (1978) dokumentiert. Diese im Laufe der siebziger Jahre konzipierten Programme lassen aber durch umfassendere Optimierungsalgorithmen und stärkere Einbeziehung interaktiver graphischer Techniken die Möglichkeit einer ständigen Anpassung an die neuesten Entwicklungen offen.

2.1 Erfassung und Verarbeitung topographischer und anderer planungsrelevanter Daten im digitalen Informationsmodell

Ausgangsbasis für jeden rechnergestützten Trassenentwurf ist ein mehr oder weniger detaillierter graphischer Entwurf (Freihandlinie) für die Linienführung im Interessenstreifen, der in der Regel bereits verkehrstechnische Mindestanforderungen und topographische und ökologische Zwangspunkte berücksichtigt. Zu diesem Entwurf hat sich der Planer nach "manueller Optimierung" auf Grund von Kriterien der Fahrdynamik, Ästhetik, Ökologie, Baukosten u.a. entschieden. Entscheidungshilfsmittel sind Gelände-, Bewertungs- und Kostenlängsschnitte und Massenbilanzen, für deren Erarbeitung natürlich auch schon der Rechner herangezogen wurde. Dieser bedeutsame Arbeitsschritt der Trassenfindung wird von Karner, Kneißl, Fischer (1982) beschrieben. Auf ihn wird hier nicht weiter eingegangen. Gegenstand der folgenden Ausführungen ist vielmehr die Bearbeitung einer ausgewählten Trasse zum eigentlichen Trassenvorentwurf.

Der wichtigste Informationsträger für die rechnergestützte Trassierung ist ein digitales Modell des Interessenstreifens, das wegen der zu speichernden Datenqualität und -quantität als ein digitales Informationsmodell anzusehen ist. Es enthält nicht nur geländegeometrische sondern auch eine Vielzahl weiterer topographischer Daten und Faktoren soziologischer, ökologischer und verwaltungsrechtlicher Relevanz.

Die Möglichkeiten, ein solches Modell zu realisieren, sind vielfältig, was in einer umfangreichen Literatur zum Ausdruck kommt. Für die Aufgabe eines Trassenentwurfs wird ein praxisnahes Modell benötigt, was sich speziell für die Bearbeitung linienförmiger Objekte eignet. Das allgemein bei digitalen Geländemodellen angewandte Vorgehen, die topographischen und andere planungsrelevanten Informationen durch Digitalisierung aus Karten oder durch Erhebung in der Örtlichkeit zu gewinnen und zum Zwecke allgemeiner Verwendbarkeit rasterförmig zu interpolieren, um daraus wiederum für spezielle Aufgaben benötigte Informationen abzuleiten, ist natürlich grundsätzlich richtig und auch hier anwendbar (Manolopoulos, 1979). Wolf (1979) hat eine Auswahl in dieser Weise konzipierter Modelle eingehend auf ihre Verwendbarkeit untersucht und verglichen, während sich Ackermann (1978) mehr den Fragen der Genauigkeit zuwandte. Für Detailuntersuchungen ist ein engmaschiges, genaues digitales Modell nach Stüttgen (1978) unentbehrlich, aber schon Schek (1970) stößt auf Schwierigkeiten wegen der großen, teilweise nicht benötigten, aber

dennoch zu verarbeitenden Datenmengen. Er geht deshalb vom globalen Informationsmodell zum lokalen über, das trassenbegleitend gerade den Interessensstreifen abdeckt und - rektifiziert - ein Rechteckraster ohne weitere Rechenarbeit direkt verfügbar macht. Doch erscheint die nicht der Aufgabenstellung angepaßte Regelmäßigkeit als zu starr und nicht ausreichend projektbezogen. Zu den gleichen Schlüssen gelangt auch Flauw (1978). Auf der Grundlage dieser Erfahrungen erscheint die Forderung nach einem flexiblen, projektbezogenen Informationsmodell, das nur die notwendigen Daten enthält und verarbeitet, angebracht.

Diese Datenbasis enthält bewertungsfähige primäre und ableitbare sekundäre Informationen. Sie kann daher die Grundlage für eine automatisierte Trassenbearbeitung und Optimierung bilden. Der Einsatz starr ablaufender Anwenderprogramme ist jedoch nicht günstig, weil eine kreative Ingenieurleistung mit den charakteristischen Merkmalen der Subjektivität eines Entwurfs nicht realisiert werden kann. Ideal wäre der Entwurf der Trasse im "Anblick des Geländes", d.h. in einer anschaulichen analogen Darstellung des digitalen Datenbank-Modells am graphischen Bildschirm. Er wird durch interaktives Arbeiten in perspektivischen Darstellungen des Geländes und aller zusätzlichen Informationen (Keith und Turner, 1968) greifbar.

2.2 Optimale Verknüpfung der Trassengeometrie mit dem digitalen Informationsmodell

Die Aufgabe des Entwurfsingenieurs besteht darin, eine im Rahmen zulässiger Parameter flexible Trassengeometrie unter Beachtung mehr oder minder gewichtiger Zwänge so mit dem Gelände zu verknüpfen, daß gewisse Vorstellungen über eine optimale Trassenführung möglichst gut erfüllt werden. Dieser Vorgang ist äußerst komplex, da die Beachtung einer ganzen Hierarchie von Überlegungs-, Entscheidungs- und Handlungszusammenhängen (Wenderlein, 1980) noch erschwert wird durch Probleme der mathematischen Formulierung und durch extremen Bedarf an Rechnerkapazität. Das Modul "Trassenoptimierung" ist deshalb in eine Reihe von Segmenten zu zerlegen. Eine simultane Lösung aller auftretenden Schwierigkeiten ist nicht möglich. Sie wird aber auch wegen zu großer Praxisferne gar nicht angestrebt (Caspary, Heister und Welsch, 1980a).

Die mathematische Behandlung der Trasse setzt ein, nachdem durch den Arbeitsschritt der Trassenfindung (Fischer, Karner, 1980) und durch die Erstellung

eines digitalen Informationsmodells eine Ausgangsbasis geschaffen ist. In der Vorplanung sind bereits zum Teil subjektiv einzuschätzende Kriterien bewertet worden. Das Informationsmodell enthält in digitaler Form alle planungserheblichen Vorgaben, so daß die mathematische Formulierung von (gewichteten) Restriktionen möglich ist. Diese Restriktionen sind eine Funktion der Ausgangsbasis. Änderungen der Linienführung in der Vorplanung, verursacht etwa durch eine Modifizierung der Bewertungen, würde in der Folge zu einer Änderung der Restriktionen führen. Das mathematische Modell ist daher nur scheinbar objektiv.

Ein weiteres, zu einem gewissen Grad der Subjektivität des Entwurfsingenieurs unterworfenen Segment ist die Art der zu optimierenden, im allgemeinen zu minimierenden Zielfunktion. Es besteht die Aufgabe, die Vorstellung, was als optimal angesehen werden soll, mathematisch zu formulieren. Bei immer enger werdendem Lebensraum verliert das reine Kostendenken beim Verkehrswegebau an Bedeutung. In den Vordergrund treten andere berechnete Gesichtspunkte qualitativer Art, die zum Teil nicht einmal mathematisch faßbar sind. Eine Zielfunktion zur Minimierung von Baukosten, Erdmassenbewegungen, Fahrzeit oder Kraftstoffverbrauch läßt sich formulieren. Spies (1977) und Boesefeld (1979) beschreiben ein Programmsystem, das dem Entwurfsingenieur hinsichtlich verschiedener Zielfunktionen eine ganze Entscheidungsmatrix zur endgültigen Kosten-Nutzen-Analyse zur Verfügung stellt. Ein künstlerischer, menschlicher Gesichtspunkt wie "Ästhetik" kann dagegen nicht in Formeln gefaßt werden. Während für mathematisierbare Ziele die interaktive graphische Datenverarbeitung Flexibilität und Effizienz bedeutet, ist sie für ideelle Kriterien essentiell.

Unter der Annahme eines wohldefinierten Informations-, Restriktions- und Zielfunktionsmodells kann eine Trasse mathematisch durch Optimierung berechnet werden. Entscheidungsspielraum besteht nur noch bei der Wahl des Optimierungsverfahrens selbst.

Die Güte des Optimierungsverfahrens kann erhebliche praktische Bedeutung haben, wenn es auch theoretisch unwichtig ist, mit welchem Optimierungsverfahren gearbeitet wird. Zu bedenken ist, daß eine Verbesserung der Zielfunktion gegenüber dem Ausgangswert nicht unbedingt zu der Auffassung berechtigt, ein gutes Verfahren zu haben, da im allgemeinen jedes Optimierungsverfahren Verbesserungen bringt. Vor allem dann ist eine solche Meinung unzulässig, wenn

einerseits ein unsicheres, d.h. dem Problem schlecht angepaßtes Verfahren angewendet, andererseits aber versucht wird, bei der Aufstellung der Zielfunktion möglichst viele Einflüsse zu berücksichtigen. Schek (1973) hat hierzu weitgehende Untersuchungen angestellt und die Überlegenheit der dynamischen Optimierung ermittelt. Hinzu kommt noch, daß es möglich geworden ist (Caspary, Heister und Welsch, 1980b), mit diesem systematischen Suchverfahren auch ohne anschließende Glättungsoperationen einen Trassenverlauf zu berechnen, der alle trassengeometrischen Kriterien erfüllt. Damit ist die dynamische Optimierung als strenge Lösung zufälligen Suchverfahren und Simulationsmethoden (Spies, 1977) überlegen.

Die ersten Versuche, die mathematische Optimierung als Hilfsmittel bei der Trassierung einzusetzen, erfolgten bei der Gradientenentwicklung (Hintzen, 1965). Bei festgehaltenem Grundriß wird die Gradientenentwicklung so eingerechnet, daß die Kosten der Erdbaumaßnahmen ein Minimum annehmen. Ausgegangen wird von einem graphischen Entwurf, für den nach der Querschnittsmethode auf der Grundlage eines rasterförmig angeordneten digitalen Geländemodells die Erdmassen berechnet werden.

Prinzipiell ist ein Trassierungsverfahren, insbesondere in Verbindung mit einer dreidimensionalen Geländedarstellung, als räumliches Problem zu sehen. Räumliche Verfahren sind zwar automatisierbar (vgl. Schek, 1973; Koch, 1976; Stüttgen, 1978; u.a.); es zeigt sich jedoch, daß entsprechende Programmsysteme für praktische Anforderungen und umfangreiche Studien zu starr und aufwendig sind. Die Zerlegung des Problems in eine Grundriß- und Gradientenoptimierung ist nach wie vor das praktizierte Verfahren, wobei sich eine iterative Optimierung als sukzessive Approximation (Schek, 1973) anbietet. Der Räumlichkeit kann dabei dadurch Rechnung getragen werden, daß dem Trassierer, vor allem bei Entscheidungen im Programmablauf, ein dreidimensionales Bild des Planungsstandes zur Verfügung gestellt wird und auch die Endbegutachtung räumlich erfolgt.

Als Bestandteil aller Programmsysteme zur Grundrißtrassierung treten Einrechnungsprogramme auf, die in ihrer einfachsten Form vorgegebene Trassierungselemente miteinander verknüpfen. Die Elemente Geraden, Kreisbögen und Übergangsbögen werden dem graphischen Entwurf entnommen. Die Wahl der Bestimmungstücke ist in Grenzen frei wählbar und führt zur Definition von Fest-, Schwenk-, Koppel- und Pufferelementen. Ebenso ist es möglich, Zwangs-

punkte einzuführen oder zumindest in einer Zwangspunkt-diagnose eine Liste der Abstände zwischen vorgegebenen Punkten und der Trasse abzurufen. Kennzeichnend ist für diese Programme, daß genau so viele unveränderliche Trassenparameter einzugeben sind, wie zur geometrisch eindeutigen Festlegung benötigt werden. Beispiele findet man in ARE (1964), Schrader (1970, 1976), Programmbeschreibungen von IBM, Siemens, weiteren Computerfirmen sowie verschiedenen Ingenieurbüros. Die Arbeiten können auch interaktiv ausgeführt werden (Schrader, 1980). Übersteigt die Zahl der Zwangspunkte und Festelemente den Freiheitsgrad der Trasse, so können nicht mehr alle Zwangspunkte auf der Trasse liegen. Linkwitz, Benner und Profke (1969) schlagen für diesen Fall eine Lösung nach der Methode der kleinsten Quadrate vor, bei der die Summe der Quadrate der gewogenen Abstände zwischen Trasse und Festpunkten minimiert wird. Die Gewichte für diesen Optimierungsprozeß werden aus dem Bewertungsmodell abgeleitet. Ein anderes Konzept besteht darin, möglichst wenig Zwangselemente und Zwangspunkte zuzulassen, dafür aber eine Vielzahl von Näherungspunkten und Näherungselementen dem graphischen Entwurf zu entnehmen, denen sich eine kürzeste Trasse unter Einhaltung der Entwurfsbedingungen möglichst gut anpassen soll. Dieses Problem wird mit den Methoden der mathematischen Optimierung gelöst, wobei die Güte der Anpassung durch eine Zielfunktion gemessen wird, die aus dem Bewertungsmodell abzuleiten ist (z.B. Hupfeld, 1970; Weber, 1970; Klumpp, 1973). Von besonderem Vorteil ist bei diesem Vorgehen, daß die graphischen Vorarbeiten nicht so genau sein müssen und damit viel schneller erledigt werden können. Weiterentwicklungen dieser Idee werden von Möhlenbrink und Gründig (1977) und Möhlenbrink (1979) beschrieben, die ein automatisch arbeitendes Programm entwickelt haben, das aus einer digitalisierten Freihandlinie in einem kombinierten Ausgleichs- und Optimierungsprozeß eine absteckungsreife Trasse erzeugt.

Die beste Realisierung der mathematischen, räumlich gesehenen Trassenoptimierung ist wohl die bereits erwähnte sukzessive Approximation. Für sich gesehen stellt sie einen automatisierten Planungsverlauf dar, der zu einer Lösung führt, die akzeptiert oder verworfen werden kann. Sie muß umso eher verworfen werden, je freier der Entwurf der Freihandlinie ist, da die Gelände- und Situationsbezogenheit in gewisser Weise verloren gehen kann. Um das Risiko einer unbefriedigenden Lösung zu vermeiden, ist ein schon gut durchdachter graphischer Vorentwurf zu wünschen, der bereits subjektiv zu bewertende Restriktionen beachtet. Eine regelgerechte mathematische Optimierung

des Grundrisses mit dem alleinigen Ziel der Minimierung der Trassenlänge wird unter diesem Gesichtspunkt der Aufgabe nicht gerecht. Die partielle Verschiebung der Lageachse, die aus verschiedenen Gründen günstig erscheinen kann, ist jedoch als wünschenswerte Option vorzuhalten. Auch hier wird interaktives graphisches Arbeiten im Anblick des perspektivisch dargestellten Geländes, in das die geplante Achse einkopiert und laufend nachgerechnet wird, den Erfordernissen eines ingenieurmäßigen Entwurfs am weitesten entgegenkommen, da mit Rechnerunterstützung analog probiert und getestet werden kann. Die weitgehenden Ansprüche an Software und Rechnerperipherie werden im Einzelfall diese Idealvorstellung auf eine machbare Version reduzieren.

2.3 Kommunikationsabwicklung, interaktive und passive Graphik

Die Schnittstelle Mensch - Rechner war bis vor wenigen Jahren die Stapelstation oder die mit einem Fernschreiber ausgerüstete Konsole. Wenn auch die ersten systematischen Untersuchungen zum DV-Einsatz bei der Entwurfsbearbeitung von Trassen noch auf den Batch-Betrieb abgestellt waren, so zeigte sich doch schon sehr frühzeitig, daß der Bildschirm eine weitaus flexiblere Kommunikationsmöglichkeit mit dem Rechner bot. Der Bildschirm kann je nach Art verschiedene Aufgaben bei der Dateneingabe, im Verlauf der Datenverarbeitung und für die Ergebnisausgabe übernehmen.

Zunächst seien einige allgemeine Gesichtspunkte für den Verkehr mit dem Rechner dargestellt (Kröll, 1977; Stuhlmann, 1980). Die Grundlage sollte eine einheitliche Sprachsyntax mit vertrauten fachspezifischen Begriffen sein. Der Rechner, der das ihm eingespeiste Programm besser "kennt" als der unter Umständen EDV-ungewohnte Benutzer, sollte durch Programmkopfinformationen einfache Entscheidungsfragen mit bereits vorgegebenen Antwortalternativen durch Hinweise und Hilfestellungen (HELP) die Führung durch die interaktiven Teile von Datenerfassung und -verarbeitung übernehmen. Dabei muß aber der Benutzer den Ablauf aus seiner Entscheidung heraus beeinflussen können, z.B. durch sequentielles Ablegen, Sichern oder Aufrufen von Daten, durch Änderung der Ablaufsteuerung oder durch die Möglichkeit des Abbruchs und der Wiederaufnahme des "Gesprächs" an der gleichen Stelle u.a. So wie der Rechner auf Fragen eine Reaktion erwartet, muß auch der Benutzer eine Resonanz durch Bestätigung, Ablehnung oder Fehlermeldung erhalten. Daten sollten korrigiert, ergänzt, gelöscht und so gesichert werden können, daß

sie nicht ungewollt zerstört werden. Das Programm sollte auf den Bearbeiter keinen zeitlichen Druck ausüben und ihn von Routinearbeiten durch Befehlsbündelungen befreien. Die Liste der Wünsche des menschlichen Partners könnte noch lange fortgesetzt werden, nur darf der Benutzer nicht vergessen, daß der Automat nur in vorgedachten Bahnen arbeiten und nicht "mitdenken" kann.

Computergraphik ist das Ergebnis einer digital-analog Wandlung (Schenk, 1980) und bei solchen Arbeiten vorteilhaft und notwendig, bei denen der Mensch auf die ihm gemäße, augenfällige und intuitive analoge Präsentation nicht verzichten kann. Graphische Editierungen sind passiv, wenn sie den digitalen Speicherinhalt des Rechners für Kontrollzwecke oder zur Veranschaulichung am Bildschirm vorübergehend oder über on- oder off-line Plotter dauerhaft auf Informationsträger für weitere Bearbeitungen oder als Dokumentation von Endergebnissen darstellen. Interaktive graphische Darstellungen am Bildschirm sind geeignet, durch Benutzereingriff unmittelbar beeinflusst und manipuliert zu werden.

Um solche Aufgaben sinnvoll lösen zu können, sind Optionen vorzusehen, die eine flexible, steuerbare Darstellung erlauben: freie Wahl des Editors, des Maßstabs und von Maßstabsverhältnissen, Prozeduren zur beliebigen Platzierung von Symbolen und Texten, Ausschnittsvergrößerungen, Identifikations- und Modifikationsmöglichkeiten für alle graphischen Elemente (Punkt, Symbol, Linie, Polygon, Text, Freistellung, Flächenfüllung), Programmaufruf über Menüs oder Funktionstasten für spezielle Probleme der Nachführung, Wahlmöglichkeit von Projektion und Perspektive bei dreidimensionalen Darstellungen u.a.

Es ist zu entscheiden, welche Zwischenergebnisse am graphischen Bildschirm für eine unmittelbare interaktive Weiterverarbeitung ausgegeben oder nach on- oder off-line Zeichnung als länger benötigte Information vorgehalten werden sollen. Grundsätzlich sollte die Möglichkeit bestehen, die Ergebnisse aller Arbeitsstufen graphische oder numerisch zu dokumentieren.

Auf Gestaltungswünsche der interaktiven Kommunikation sowie interaktiver und passiver Graphik wurde bei der allgemeinen Behandlung der Arbeitsabschnitte Datenerfassung und Trassenentwurf in Grund- und Aufriß schon hingewiesen. Benner und Domsch (1976) machen hierzu eingehende Untersuchungen. Benner und Boesefeld (1976) analysieren im Detail das Zusammenwirken halb-automatischer, d.h. interaktiver Arbeitsgänge mit intellektuellen und manu-

ellen Vorgängen einerseits und automatisch ablaufenden Prozeduren andererseits.

Die Verwirklichung aller Vorschläge wird wieder von der Rechnerkonfiguration und dem möglichen Aufwand für Softwareentwicklungen abhängen.

3. Das Programmsystem TROP :

Realitäten und Wünsche - Ausblick

Basierend auf den grundsätzlichen Überlegungen der vorangegangenen Abschnitte wurde ein datenbank-orientiertes, modular aufgebautes Programmsystem entwickelt, das besonders für großräumiges interaktives Trassieren von Landverkehrssystemen im Maßstab 1 : 25 000 geeignet ist. Maßgeblicher Faktor für die Ausgestaltung der Systemkomponenten war zunächst die verfügbare Rechnerkonfiguration. An die zentrale Einheit des Großrechners Burroughs B 7700/7800 sind angeschlossen und verfügbar: graphischer ungepufferter Speicherbildschirm Tektronix 4014 mit alphanumerischer Tastatur und Hardcopy-Einheit, Calcomp Digitizer mit Menütechnik zur on-line Digitalisierung, Calcomp-Trommelplotter on- und off-line, Stapelstation, Schnelldrucker und alphanumerisches Sichtgerät. Der Rechner mit seinen Peripherieeinheiten wird auf der Softwareseite ergänzt durch ein sehr benutzerfreundliches Dialogsystem (CANDE) und eine zentral ansprechbare integrierte Graphiksoftware, die ebenfalls benutzerorientiert ist und die Wahl der Editierstation offenläßt.

Bei der Programmentwicklung wurden folgende Gesichtspunkte verwirklicht:

- das Programm ist konsequent für interaktives Trassieren konzipiert und soll den Spielraum des Entwurfsingenieurs für individuelle schöpferische Tätigkeit nicht einengen; deshalb sind nach dem Monitorprinzip Entscheidungen und Funktionsrechnungen getrennt,
- das Trassierungsproblem wird, soweit es die Randbedingungen der Ausstattung zulassen, räumlich behandelt,
- für alternative Lösungen können Entscheidungsgrundlagen bereitgestellt werden,
- die Gradientenoptimierung als der wesentliche Teil der Trassenoptimierung wird nach dem strengen Verfahren der dynamischen Optimierung so durchgeführt, daß nach dem Rechengang regelgerechte Trassierungspara-

meter zu Verfügung stehen,

- das Programm befreit von Routinearbeit, die Bedienung kann auch von DV-ungeübten Fachkräften nach kurzer Einarbeitungszeit vorgenommen werden, Ergebnisse werden in anschaulicher Form angeboten,
- das Programm ist modular aufgebaut.

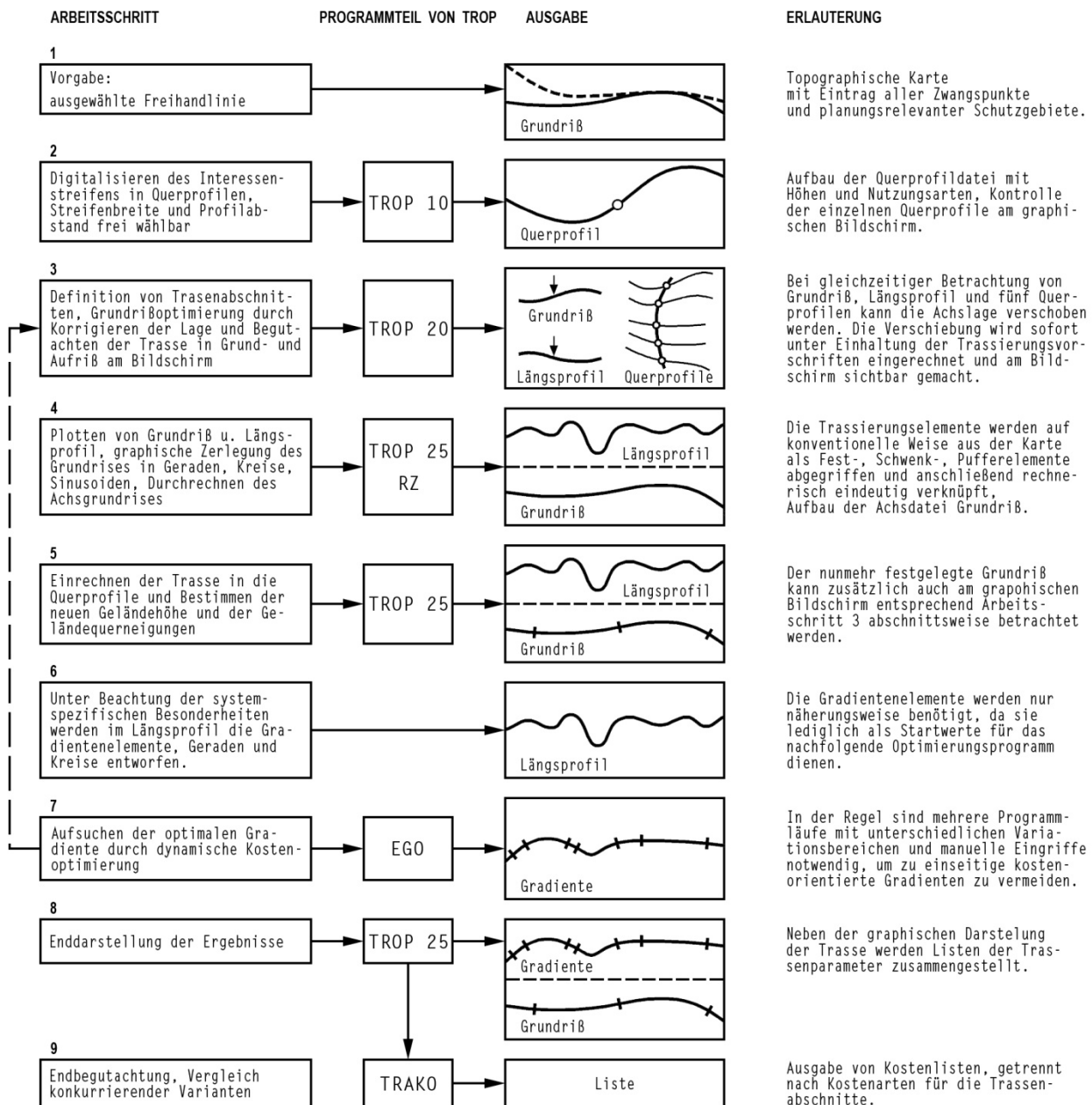
Die wesentlichen Systemkomponenten bestehen aus den Modulen für die Datenerhebung zur Erstellung des Informationsmodells (TROP 10), für die interaktive Grundrißbearbeitung (TROP 20) und geometrische Achseinrechnung nach Trassierungselementen (RZ), für die dynamische Gradientenoptimierung (EGO), für graphische Darstellungen (TROP 25) und für Massen- und Investitionskostenberechnungen (TRAKO). Der modulare Aufbau erleichtert die Berücksichtigung von systemspezifischen Vorgaben und die Anpassung an verschiedenartige Projekte. Die einzelnen Module können als selbständige Programme und im Rahmen unterschiedlicher Trassierungsaufgaben für die Lösung von Teilaufgaben, z.B. digitale Geländemodelle, Achseinrechnungen, Massenberechnungen, Achsnachrechnungen vorgegebener Gradienten, graphische Darstellungen u.a., mit Vorteil benutzt werden.

Der Arbeitsablauf eines Trassenentwurfs, wie er in der folgenden Übersicht dargestellt ist, wird eingehend von Caspary, Heister, Welsch (1982a) beschrieben. Dabei werden auch die interaktiven Möglichkeiten der einzelnen Programmkomponenten deutlich. Eine detaillierte Beschreibung liegt im Benutzerhandbuch (1981) vor. Über erste Erfahrungen wird von Caspary, Heister, Welsch (1980c) berichtet.

Ein Vergleich des Programmsystems TROP mit den früher formulierten Idealvorstellungen führt zu folgendem Ergebnis:

Die Datenerfassung zum Aufbau des digitalen Informationsmodells erfolgt streng interaktiv und on-line. Wenn sich der Benutzer einmal über sämtliche Möglichkeiten von TROP 10 orientiert hat, wird er vom Rechner im Dialog durch die Arbeit geführt. Das Benutzerhandbuch ist dabei entbehrlich. Am Ende des Datenerfassungsvorgangs stehen alle Informationen einschließlich der in das Geländemodell einkopierten Freihandlinie digital zur Verfügung.

Die Darstellung des Geländes erfolgt zunächst noch durch einzelne Querprofile oder (in TROP 20) durch fünf hintereinander geschaltete Querprofile mit gleichzeitiger Abbildung eines größeren Trassenabschnitts in Grund- und Auf-



Arbeitsablauf eines Trassenvorentwurfs mit TROP

riß. Diese Analogdarstellung des digitalen Modells ist noch verbesserungsfähig. Optimal wäre eine perspektivische dreidimensionale Darstellung eines größeren Trassenabschnitts, die bei der bestehenden Bildschirmausstattung auch möglich ist. Um dann aber in einem solchen räumlichen Bild partielle Verschiebungen der Linienführung vornehmen, dynamisch einrechnen und darstellen zu können, wäre ein refresh-Bildschirm wünschenswert. Augenblicklich werden Grundrißänderungen durch Cursor-Einstellung im mittleren der fünf gezeigten Querprofile interaktiv auf dem Bildschirm markiert, nachgerechnet und in allen Graphiken des behandelten Trassenabschnitts dokumentiert. Sämtliche Bildschirminhalte können im Hardcopy-Abzug direkt ausgegeben werden. Dauerhafte Dokumentationen sowohl der ursprünglichen als auch der nachgeführten Trasse sind in großer Variabilität durch das Modul TROP 25 über Plotter möglich.

Auf diesen Plots ist die Trasse zunächst in zweidimensionalen kubischen Splines enthalten. Sie werden vom Trassierungsingenieur durch Kreise und Geraden ersetzt, die im Programmteil RZ mit der gewünschten Übergangsbogenform (Klothoide, biquadratische Parabel, Sinusoide) verbunden und zusammengerechnet werden. Bei diesem Arbeitsschritt könnte Interaktivität am Bildschirm zur Entlastung des Bearbeiters verstärkt eingesetzt werden. Die nun in regelgerechte Trassierungselemente zerlegte Trasse wird durch TROP 20 wieder in das Informationsmodell eingerechnet und durch TROP 25 dargestellt. Es ist auch möglich, beliebige andere Trassenvarianten in das Geländemodell einzurechnen, sofern sie nur im Interessenstreifen liegen. Liegt auch schon ein Gradientenentwurf in Form von Tangentschnittpunkten und Ausrundungen vor, so kann dieser gleichzeitig mitgeplottet werden.

Unabhängig von der Grundrißbearbeitung oder auch aufbauend auf ihr wird die Gradientenbeziehung eines vorgegebenen Entwurfs streng optimiert. Über die Arbeit mit diesem wesentlichen Modul EGO orientieren Caspary, Heister und Welsch (1980b, 1982b). Die optimierte Gradientenbeziehung ist im Gegensatz zu dem Resultat anderer Verfahren bereits eine aus endgültigen Trassierungselementen bestehende Achse. Sie wird wieder in das Informationsmodell eingerechnet, dargestellt und zunächst dem Augenschein nach beurteilt und kann z.B. systemspezifischen Forderungen entsprechend variiert werden. Auch solche Varianten können sofort in das Informationsmodell, das zu einem digitalen Trassenmodell wird, übernommen werden.

Der letzte Programmteil TRAKO berechnet zu jeder Trasse, ob beliebig vorgegeben oder optimiert oder variiert, Massen und Investitionskosten. Mit diesem Programm können somit Entscheidungshilfen bereitgestellt und Optimierungsgewinne ausgewiesen werden.



Wünschenswert ist eine weitere Vervollkommnung der numerischen und graphischen Kommunikation, letztere besonders im Hinblick auf eine dynamisch nachgeführte perspektivische Bildschirmdarstellung des digitalen Trassenmodells. Weiterhin könnte eine Erweiterung des Programmsystems für den großmaßstäblichen Trassenentwurf ins Auge gefaßt werden, um aufbauend auf der eingeschlagenen und bewährten Strategie des interaktiven Programmsystems TROP zu einem absteckungsreifen Trassenentwurf zu kommen.

4. Literatur

- Ackermann, F. (1978), Experimental Investigation into the Accuracy of Countering from DTM, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1978, pp. 1537 - 1548
- Arbeitsausschuß DV-Straßenentwurf der Forschungsgemeinschaft für Straßen- und Verkehrswesen (1978), Analyse des aktuellen Zustandes der einsetzbaren Entwurfsprogrammsysteme, Studie 1978
- ARE (1964), Anleitung für die Anwendung des elektronischen Rechnens bei der Entwurfsbearbeitung im Straßenbau, Bundesminister für Verkehr, Bonn 1964
- Benner, E. und J. Boesefeld (1976), Entwicklung eines Konzepts zur Entwurfsbearbeitung im Straßenbau beim Einsatz von DV-Anlagen und Aufstellung eines Realisierungsprogrammes, Forschung Straßenbau und Verkehrstechnik, Heft 214, BMV, Bonn-Bad Godesberg 1976
- Benner, E. und H.-J. Domsch (1976), Entwicklung eines Programmsystems zur Optimierung der Gradienten- und Linienführung von Straßen mittels elektronischer Rechenanlagen, Forschung Straßenbau und Verkehrstechnik, Heft 207, BMV, Bonn-Bad Godesberg 1976
- Benutzerhandbuch (1981), TROP-Trassenoptimierung von Landverkehrswegen, GeoMeDa, München 1981
- BMV (1968 - 1977), Bundesminister für Verkehr, Abt. Straßenbau (Herausgeber), Programmsystem zur Optimierung des Straßenentwurfs, Forschung Straßenbau und Verkehrstechnik, Heft 68 (1968), Heft 129 (1972), Heft 187 (1975), Heft 224 (1977), Heft 225 (1977), Heft 226 (1977), Bonn-Bad Godesberg

- Boesefeld, J. (1979), Straßenentwurfs- und Informationssystem EPOS, CAD-Berichte, CAD im Straßenbau, S. 64 - 96, Kernforschungszentrum Karlsruhe 1979
- Caspary, W., H. Heister und W. Welsch (1980a), Ein interaktives Programmsystem zur Entwicklung einer optimalen Trasse auf der Grundlage topographischer Karten, Allgemeine Vermessungsnachrichten 87 (1980) 4, S. 178 - 191
- Caspary, W., H. Heister und W. Welsch (1980b), Die dynamische Optimierung und ihre Anwendung bei der optimalen Gradientenführung, Allgemeine Vermessungsnachrichten 87 (1980) 4 S. 166 - 178
- Caspary, W., H. Heister und W. Welsch (1980c), Erfahrungen mit einem interaktiven Programmsystem bei der Trassenoptimierung für schienengebundene Hochgeschwindigkeitsstrecken, VIII. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung, paper C4, Zürich 1980
- Caspary, W., H. Heister und W. Welsch (1982a), Bearbeitung des Vorentwurfs für ausgewählte Varianten mit dem Programmsystem TROP, Schriftenreihe des Wissenschaftlichen Studiengangs Vermessungswesen der HSBw, Heft 6, S. 159 - 174, München 1982
- Caspary, W., H. Heister und W. Welsch (1982b), Die dynamische Optimierung beim Gradientenentwurf, Schriftenreihe des Wissenschaftlichen Studiengangs Vermessungswesen der HSBw, Heft 6, S. 140 - 158, München 1982
- Conzett, R., A. Frank und C. Misslin (1980), Interaktive Triangulation, VIII. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung, paper A7, Zürich 1980
- Fischer, R. und G. Karner (1980), Rechnerunterstützte Verfahren zur Auffindung, Beurteilung und Auswahl von Trassen für Landverkehrswege, Allgemeine Vermessungsnachrichten 87 (1980) 4, S. 191 - 198
- Fischer, R. und G. Karner (1982), Die Vorplanung bei großräumigen Neutrassierungen für schienengebundene Schnellverkehrssysteme, Schriftenreihe des Wissenschaftlichen Studiengangs Vermessungswesen der HSBw, Heft 6, S. 102 - 113, München 1982
- Flauw, J. (1978), Les études de tracés ferroviaires par le calcul automatique, La Revue Générale des Chemins de Fer (1978) 11
- Hintzen, J. (1965), Die Bestimmung optimaler Gradienten von Straßen mit Hilfe elektronischer Rechenanlagen, Straßen- und Tiefbau (1965) 6, S. 691 - 694
- Hoinkes, Ch. (1980), Die "Digitale kartographische Zeichenanlage", ein neues Hilfsmittel für die Kartenherstellung, Vermessung, Photogrammetrie und Kulturtechnik 78 (1980) 2, S. 31 - 41
- Hupfeld, W. (1970), Automatisierung von gleistechnischen Trassierungsentwürfen mit Hilfe der mathematischen Optimierung, Dissertation, Braunschweig 1970

- Keith, A. und F. Turner (1968), Computer-assisted procedures to generate and evaluate regional highway alternatives, Joint Highway Research Project, Final Report, Purdue University, Lafayette, Indiana 1968
- KfK-CAD (1980), EPOS-I, Entwurfsfindung und Optimierung im Straßenbau, Benutzerhandbuch, CAD-Bericht 163, Kernforschungszentrum Karlsruhe 1980
- Klumpp, R. (1973), Achsberechnungen mit Hilfe der Ausgleichs- und Optimierungsrechnung, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft 194, München 1973
- Koch, K.-R. (1976), Dynamische Optimierung am Beispiel der Straßentrasierung, Vermessungswesen und Raumordnung 38 (1976) 6, S. 281 - 290
- Kröll, F. (1977), Interactive systems for large scale mapping, XV. FIG-Kongreß, paper 507.1, proceedings Comm. V, pp. 335-349, Stockholm 1977
- Linkwitz, K., E. Benner und L. Profke (1969), Untersuchungen von Rechenprogrammen für die Entwurfsbearbeitung im Straßenbau, Straßenbau und Verkehrstechnik, Heft 83, Bonn 1969
- Manolopoulos, N. (1979), Trassenfindung und Optimierung mit dem Programmsystem OPT-1, CAD-Berichte, CAD im Straßenbau, S. 109 - 144, Kernforschungszentrum Karlsruhe 1979
- Möhlenbrink, W. und L. Gründig (1977), Computer oriented solution of horizontal alignments based on rough graphics, XV. FIG-Kongreß, paper 605.1, proceedings Comm. 6, pp. 123 - 130, Stockholm 1977
- Möhlenbrink, W. (1979), Programmsystem zur Berechnung überbestimmter Achsgrundrisse unter Einhaltung der RAL-L, CAD-Berichte, CAD im Straßenbau, S. 97 - 107, Kernforschungszentrum Karlsruhe 1979
- Schek, H.-J. (1970), Optimierungsberechnungen bei der Entwurfsberechnung von Straßen, VI. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessungen hoher Präzision, Vortrag 2/9, Graz 1970
- Schek, H.-J. (1973), Optimierungsberechnungen und Sensitivitätsanalysen als Hilfsmittel bei der Entwurfsbearbeitung von Straßen, Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 153, S. 31 - 147, Bonn 1973
- Schenk, T. (1980), Datenaufbereitung und -verarbeitung mit interaktiven graphischen Systemen, VIII. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung, paper B3, Zürich 1980
- Schrader, B. (1970), Computergestütztes Trassieren von Verkehrswegen, VI. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessungen hoher Präzision, Vortrag 2/11, Graz 1970
- Schrader, B. (1976), Programmsysteme zur Achseinrechnung und Absteckung, VII. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessungen hoher Präzision, proceedings, S. 339 - 346, Darmstadt 1976

- Schrader, B. (1980), Interaktive, graphisch unterstützte Straßen-Entwurfs- und Absteckungsberechnungen mit Tischcomputern, VIII. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessungen, paper C 18, Zürich 1980
- Schwenk, W. (1978), Begriff und Problematik der Interaktion in graphischen Systemen, Zeitschrift für Vermessungswesen 103 (1978) 8, S. 399 - 409
- Spies, G. (1977), Programmsystem zur Optimierung des Straßenentwurfs, Teil V: Entwurfstechnische Benutzeranweisung, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 225, BMV, Bonn-Bad Godesberg 1977
- Stüttgen, W. (1978), Genauigkeitsuntersuchungen bei der Verknüpfung des digitalen Geländemodells mit dem digitalen Projektmodell am Beispiel der Straßentrassierung, Veröffentlichung des Geodätischen Instituts der RWTH Aachen, Heft Nr. 24, Aachen 1978
- Stuhlmann, H. (1980), Interaktiver graphischer Arbeitsplatz, Vermessungstechnische Rundschau 42 (1980) 3, S. 107 - 115
- Weber, W. (1970), Computergerechte Methoden zur Berechnung von Gleisnetzen unter Berücksichtigung geometrischer und dynamischer Bedingungen, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft 158, München 1970
- Wenderlein, W. (1980), Dynamische Optimierung und ihre Anwendung bei der optimalen Gradientenführung, Stellungnahme und Entgegnung zu Caspary, Heister und Welsch (1980a,b), Allgemeine Vermessungsnachrichten 87 (1980) 11-12, S. 474 - 475
- Wolf, F.-M. (1979), Zweckmäßigkeit von digitalen Geländemodellen im Straßenbau: Gegenüberstellung verschiedener digitaler Höhenmodelle, CAD-Berichte, CAD im Straßenbau, S. 51 - 63, Kernforschungszentrum Karlsruhe 1979

