

Heft 6

München, Mai 1982

---

# Beiträge zur großräumigen Neutrassierung

Herausgegeben von  
W. Caspary und W. Welsch

---

## SCHRIFTENREIHE

Wissenschaftlicher Studiengang Vermessungswesen  
Hochschule der Bundeswehr München





Heft 6

---

München, Mai 1982

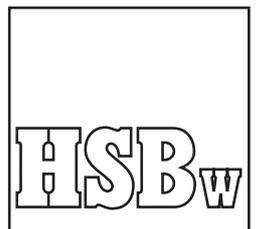
# Beiträge zur großräumigen Neutrassierung

Herausgegeben von  
W. Caspary und W. Welsch

---

## SCHRIFTENREIHE

Wissenschaftlicher Studiengang Vermessungswesen  
Hochschule der Bundeswehr München



Der Druck dieses Heftes wurde aus Haushaltsmitteln der Hochschule der Bundeswehr München gefördert.

Verantwortlich für die Herausgabe der Schriftenreihe:

Prof. Dr. G. Neugebauer  
Dipl.-Ing. J. Peipe

Bezugsnachweis:

Studiengang Vermessungswesen  
im Fachbereich Bauingenieur- und Vermessungswesen  
Hochschule der Bundeswehr München  
Werner-Heisenberg-Weg 39  
8014 Neubiberg

ISSN 0173-1009

## VORWORT

Im Auftrag des Bundesministers für Forschung und Technologie wurden in den Jahren 1979 - 1981 zwei Planungsstudien erstellt, die Aufschluß über die Realisierbarkeit eines elektromagnetischen Schnellbahnsystems (EMS) und eines Rad/Schiene-Schnellbahnsystems (R/S) geben sollten.

Um zuverlässige Aussagen über Investitionskosten und Umweltverträglichkeit zu gewinnen, wurde die Trassierung einer Neubaustrecke zwischen Frankfurt/Main und Paris durchgeführt und zwar bis zu einem Konkretisierungsgrad von 1 : 25 000 für den Grundriß und 1 : 1000 für den Höhenplan. Als Entwurfsgeschwindigkeiten wurden 400 beziehungsweise 300 km/h festgelegt. Für beide Systeme wurden dieselben Terminals vorgegeben, und es wurde nach denselben Trassierungs-, Bewertungs- und Berechnungsverfahren vorgegangen, so daß ein objektiver Vergleich der Ergebnisse möglich ist.

Das Problem der Trassenfindung und der Bewertung im Rahmen der Studien wurde von den aus Forschung und Praxis kommenden Autoren dieses Heftes bearbeitet, die sich nach Abschluß des Auftrags auf Anregung der Herausgeber noch einmal zusammengefunden haben, um eine Dokumentation des Arbeitskonzepts und aller Techniken, die dabei von Bedeutung waren, vorzulegen. Nicht immer können die Beschreibungen bis in die letzten Einzelheiten gehen, da zum Beispiel ein im freien Wettbewerb stehendes Ingenieurbüro ein verständliches Interesse daran hat, einen durch die Studien gewonnenen Know-how-Vorsprung nicht durch Offenlegung aller Details aufs Spiel zu setzen. Dennoch glauben die Herausgeber, daß die Beiträge in der Summe so viel Neues enthalten, daß das vorliegende Heft ein wichtiger Beitrag auf dem Gebiet der computerunterstützten Trassenbearbeitung darstellt.

Die beiden ersten Beiträge stellen die Verkehrstechnologien EMS und R/S vor und gehen auf die von den Systemen her zu fordernde Fahrweggestaltung ein. Ohne diese Hintergrundkenntnisse wird es dem Trassierungsingenieur kaum gelingen, eine die Besonderheiten der jeweiligen Technologie berücksichtigende Trassenführung zu entwickeln.

In den folgenden Beiträgen werden die eingesetzten Trassierungsgrundlagen erläutert. Neben den Trassierungselementen, die wegen der vorgesehenen hohen Entwurfsgeschwindigkeiten (EMS:  $V_E = 400$  km/h; R/S:  $V_E = 300$  km/h) einige

Besonderheiten aufweisen, werden die Kostenberechnungsmodelle und das Verfahren der dynamischen Optimierung, das zur Gradientenbearbeitung eingesetzt wurde, beschrieben.

Diese mathematisch-technischen Grundlagen erhalten in den folgenden beiden Beiträgen die notwendige Ergänzung im Hinblick auf die Umweltverträglichkeit der Trassierung. Denn selbstverständlich müssen ökologische und landesplanerische Daten in den ingenieurtechnischen Trassierungsprozeß Eingang finden, um als Grundlage für die Beachtung umweltschützender Belange und zur Abschätzung der Systemwirkungen auf den trassennahen Umweltbereich zur Verfügung zu stehen.

Die eigentliche Trassierung wird in zwei Stufen durchgeführt. In der Vorplanung wird ein Variantennetz erarbeitet, aus dem unter Berücksichtigung von Investitionskosten und von Auswirkungen auf die Umwelt eine oder wenige mögliche Linienführungen zur Weiterbearbeitung ausgewählt werden. Diese erfolgt in der zweiten Stufe, dem Vorentwurf, der zu einer geometrisch wohldefinierten Trasse führt. Eine genaue Festlegung der Fahrwegarten ermöglicht eine zuverlässige Kostenberechnung und die Ermittlung der Umweltbelastungen. Zur Unterstützung dieser Planungsstufe wurde das Programmsystem TROP entwickelt. Aufbauend auf grundsätzlichen Überlegungen zur Qualität einer Entwurfstätigkeit wurde das Konzept verfolgt, durch den Computereinsatz die Verwirklichung der Gestaltungsideen des Trassierungsingenieurs zu fördern und ihn zu fundierten Lösungen zu führen. Entscheidend ist dabei, daß in jedem Programm notwendigerweise inne wohnenden Schematismen nicht auf den Planungsprozess übergreifen und so die Entscheidungsfähigkeit und Freiheit des Entwurfsingenieurs einengen. Die heutige Bildschirmtechnik mit interaktiv arbeitender Software ermöglicht einen Mensch-Maschine-Dialog, der nach diesen Grundsätzen gestaltet werden kann. Die Strukturen und Algorithmen der in TROP gefundenen Lösung werden in den folgenden Beiträgen dargestellt.

Den Abschluß des Heftes bildet ein Aufsatz, der sich mit der Aufgabe auseinandersetzt, in welcher Form das umfangreiche erarbeitete Material am zweckmäßigsten dargeboten wird, ohne Ergebnisse zu unterdrücken und ohne durch ein Zuviel die Aufnahme des Inhalts zu erschweren.

Die Herausgeber meinen, daß die Zusammenschau aller Teilaufgaben, die bei der Bearbeitung des Gesamtkomplexes der großräumigen Neutrassierung gelöst werden müssen, zu einer informativen Darstellung der Vielschichtigkeit des Problems geführt hat.

Dem Fachmann mag die eine oder andere gewählte Problemlösung kritikwürdig oder verbesserungsbedürftig erscheinen. Auch fehlt in der Regel die Diskussion von Alternativlösungen. Es ist jedoch zu beachten, daß es hier nicht im Sinne eines Lehrbuches um eine erschöpfende Behandlung des Trassierungsproblems geht, sondern um die Darstellung einer Lösung, die praxisorientiert entwickelt wurde und sich bei insgesamt über 1000 km Neutrassierung bewährt hat.

Dem interessierten Laien, dem es weniger um Details geht, mag die Aufsatzsammlung einen Überblick über das vielseitige, reizvolle Aufgabengebiet geben.

Prof. Dr.-Ing. Wilhelm Caspary

Prof. Dr.-Ing. Walter Welsch

## BEITRÄGE ZUR GROSSRÄUMIGEN NEUTRASSIERUNG

	Seite
Mölzer, P., Zurek, R. "Elektromagnetische Schnellbahnsysteme (EMS)"	6
Kurz, H. "Konzeption und Technologie für Rad/Schiene- Schnellbahnen"	26
Mölzer, P., Stöckl, R. "Trassierungselemente für Schnellbahnen"	43
Kneißl Rabossi, S. "Eingang raumplanerischer und ökologischer Daten in den Trassierungsprozeß"	51
Kneißl Rabossi, S., Kneißl, M. "Zur Beurteilung von Schnellbahnwirkungen im trassen- nahen Umweltbereich"	67
Caspary, W., Heister, H., Welsch, W. "Gedanken zum interaktiven rechnerunterstützten Ent- werfen von Trassen für Verkehrssysteme"	80
Fischer, R., Karner, G. "Die Vorplanung bei großräumigen Neutrassierungen für schienengebundene Schnellverkehrssysteme"	102
Schwintzer, P., Stöckl, R. "Investitionskostenrechnungen für den Vorentwurf"	114
Caspary, W., Heister, H., Welsch, W. "Die dynamische Optimierung beim Gradientenentwurf"	140

	Seite
Caspary, W., Heister, H., Welsch, W. "Bearbeitung des Vorentwurfs für ausgewählte Varianten mit dem Programmsystem TROP"	159
Böge, G., Foros, P. "Struktur, Verwaltung und Verarbeitung der Daten im Rahmen des Programmsystems TROP"	175
Kneißl, M. "Einsatz bildlicher Darstellungstechniken im Laufe der Untersuchung und bei der Dokumentation der Ergebnisse"	245
Übersichtstafeln zum Trassierungsverfahren für Landverkehrswege	251
Autorenverzeichnis	267

# Elektromagnetische Schnellbahnsysteme (EMS)

Von Dipl.-Ing. P. Mölzer und Dr. R. Zurek, München

## Zusammenfassung

Der Beitrag führt in die Technik des elektromagnetischen Schwebens ein und erläutert die besonderen Anforderungen an die Fahrweggestaltung. Nach einem Rückblick auf die bisherigen Entwicklungsarbeiten werden die Anwendungsbereiche der elektromagnetischen Schnellbahnen aufgezeigt. Die neuen Techniken des Tragens, Führens und Antreibens/Bremsens werden beschrieben und die Anforderungen für die Fahrwegauslegung dargestellt. Die technischen Lösungen für das Tragwerk, die Fahrwerk-ausrüstung und die Trasse werden genannt. Die Magnetbahn als Gesamtsystem wird unter betriebsmäßigen Bedingungen in der Großversuchsanlage im Emsland (TVE) erprobt werden, insofern wurden im vorliegenden Beitrag die dort zur Anwendung kommenden Untersysteme beispielhaft zur Erläuterung herangezogen.

## 1. Einführung

Der Grundgedanke der Erhöhung der Attraktivität des spurgeführten Verkehrs führte Anfang der 70er Jahre zur Entwicklung neuer Spurführungs- und Antriebstechniken. Dabei lag folgender Zielkatalog zugrunde:

- Erhöhung der Reisegeschwindigkeit
- hohe Transportleistungen
- angemessene Transportkosten
- mäßiger Energieverbrauch
- keine Abhängigkeit von einer speziellen Primärenergieform
- geringe Umweltbeeinträchtigungen
- hohe Sicherheit und hoher Fahrkomfort

Weltweit wurde an berührungsfreien Fahr- und Antriebstechnologien gearbeitet, um die bestehenden Eisenbahnsysteme durch überlagerte Schnellbahnen zu ergänzen. Es entstanden Versuchseinrichtungen für das Luftkissensystem, das elektromagnetische und das elektrodynamische Schwebesystem [ 1 ].

Während in anderen Ländern schwerpunktmäßig nur jeweils ein System verfolgt wurde, entstand in der Bundesrepublik Deutschland ein breit angelegtes Programm, das vom Bundesministerium für Forschung und Technologie gefördert

---

Diese Arbeit entstand im Rahmen eines vom Bundesministerium für Forschung und Technologie geförderten Forschungs- und Entwicklungsprogramms.

wird. Dieses Programm sah die Entwicklung aller aussichtsreichen Varianten und eine schrittweise technisch fundierte Auswahl der am besten geeigneten Technologie vor. Dieser Abschnitt des Entwicklungsprogramms wurde Ende 1977 mit der Entscheidung zugunsten des elektromagnetischen Schwebesystems abgeschlossen [ 2 ].

Dieses Schwebesystem ist in insgesamt fünf zum Teil personentragenden Versuchsfahrzeugen mit verschiedenen Antriebsvarianten im Geschwindigkeitsbereich bis 400 km/h erprobt worden.

Das Entwicklungsprogramm befindet sich seit 1978 in der Phase der Anwendungsorientierung. Eingeleitet wurde diese Phase mit der Demonstrationsanlage für Schwebetechnik für die Internationale Verkehrsausstellung 1979 in Hamburg. Das Fahrzeug TRANSRAPID 05 führte erstmals begrenzten öffentlichen Personenverkehr auf einer 900 m langen Strecke durch und zeigte einem breiten internationalen Publikum den fortgeschrittenen Entwicklungsstand der Schwebetechnik in der Bundesrepublik Deutschland (Abb. 1).

Die nunmehr laufenden Entwicklungsarbeiten konzentrieren sich auf den Bau der TRANSRAPID Versuchsanlage Emsland (TVE), mit dem im Herbst 1979 begonnen wurde [ 3 ]. Die nördlich von Meppen liegende Versuchsanlage besteht aus einer im Endausbau 31,5 km langen geschlossenen Versuchsstrecke mit einem Versuchszentrum. 1983 wird der Probetrieb des 2gliedrigen Fahrzeuges TRANSRAPID 06 aufgenommen werden.

Ziele der TVE sind

- die Erprobung der Technik bei Dauergeschwindigkeiten von 300 km/h,
- die Weiterentwicklung der Technik für Geschwindigkeiten bis 400 km/h,
- der Nachweis der technischen, wirtschaftlichen und sicherheitstechnischen Anwendbarkeit der elektromagnetischen Schwebetechnik,
- die Durchführung von Genehmigungsverfahren für die Einführung als öffentliches Verkehrsmittel,
- der Nachweis der geringen Umweltbeeinträchtigung durch Schallemission, optisches Erscheinungsbild und "Durchlässigkeit" der aufgeständerten Fahrwege.

Zeitlich parallel zum Bau der TVE wird an einer Planungsstudie gearbeitet, die beispielhaft für die Strecke Frankfurt - Paris die Probleme behandelt, die mit der Einführung der elektromagnetischen Schnellbahn verbunden sein werden.

Das Entwicklungsprogramm befindet sich somit in einem fortgeschrittenen Stadium und soll Mitte der 80er Jahre, sofern die Experimente und die

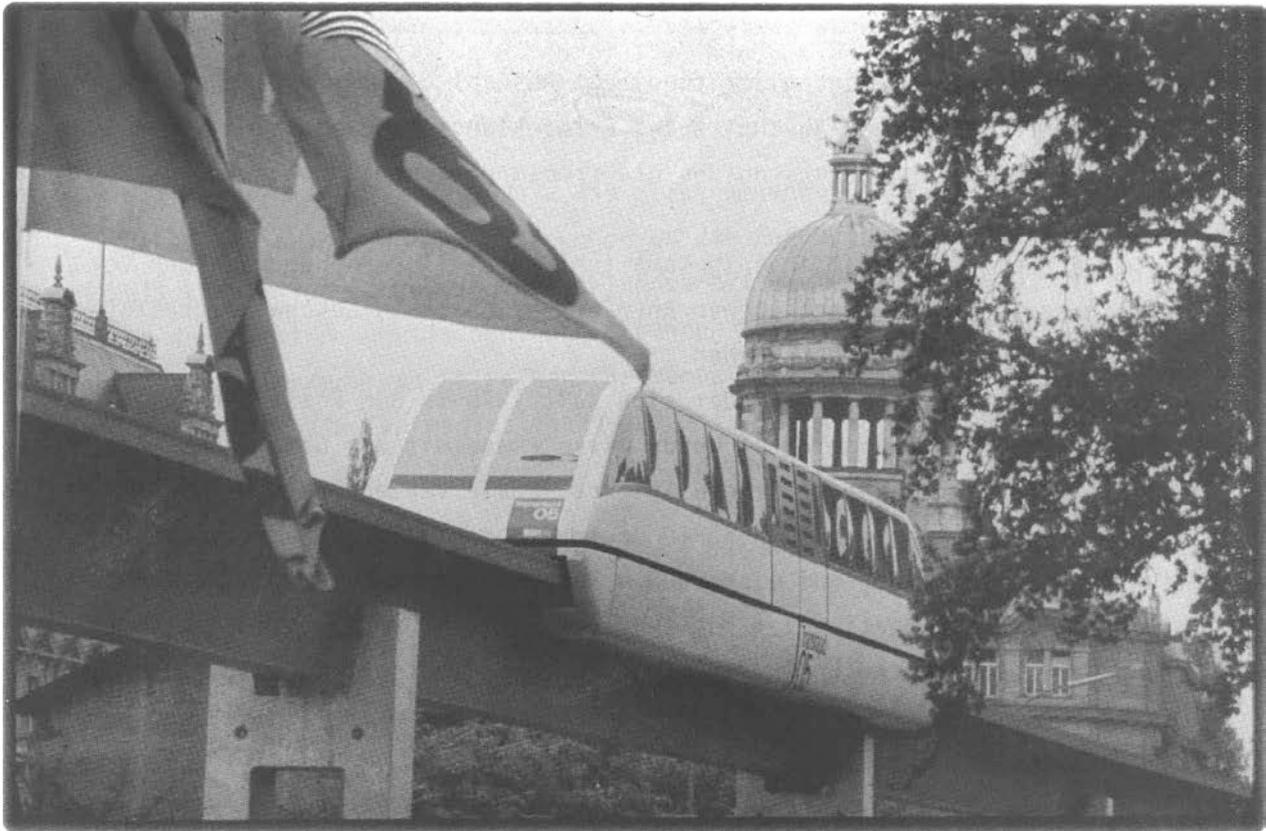


Abb. 1 TRANSRAPID 05 auf der Demonstrationsanlage für Magnet-  
schwebetechnik der Internationalen Verkehrsausstellung  
1979 in Hamburg

Dauerversuche auf der TVE erfolgreich sind und die Planungsstudie die Realisierbarkeit der neuen Schnellbahntechnik aufzeigt, in den Bau einer ersten Anwendungsstrecke (Pilotanlage) in der Bundesrepublik einmünden.

Nachdem in der ersten Phase der Entwicklung der Nachweis der Funktion des elektromagnetischen Trag-, Führ- und Antriebssystems im Vordergrund stand, führte die Anwendungsorientierung des Programmes zwangsläufig auf die besondere Bedeutung der Fahrwege für das neue Schnellbahnsystem. Der vorliegende Beitrag möchte einen auf andere Gebiete spezialisierten Leserkreis in die Technik des elektromagnetischen Schwebens einführen und die besonderen Auswirkungen auf die Fahrweggestaltung aufzeigen.

## 2. Anwendungsbereiche der EMS-Schnellbahntechnik

Umfangreiche parametrische Untersuchungen im Geschwindigkeitsbereich von 300-500 km/h und im Transportleistungsbereich von 4-20 Mio. Perskm/Netzkm · Jahr waren Grundlage zur Eingrenzung des Anwendungsbereiches von EMS-Schnellbahnen (Abb. 2). Die Untersuchungen umfaßten hierbei die technische Auslegung von Zügen für Personen- und Güterverkehr mit verschiedenen Transportkapazitäten, die technische Auslegung der dazugehörigen Antriebsenergieversorgungen und Fahrwegkonstruktionen, Trassierungsstudien im Raum Hannover - Kassel [ 4 ] und Köln - Dortmund sowie die Entwicklung eines Betriebskostenmodells zur Bestimmung der Investitionen und Betriebskosten.

Nach Abb. 2 wird der Anwendungsbereich von drei Kurven eingegrenzt:

- (1) ist eine Kurve konstanter Transportkosten von 0,2 DM/Perskm;
- (2) ist die Kurve konstanter installierbarer elektrischer Leistung pro Zug von 30 MW und
- (3) ist die Kurve, unterhalb derer sich durch Verminderung der Geschwindigkeit bei konstanter Transportleistung keine Transportkostenverringerung mehr ergibt.

Innerhalb des eingegrenzten Bereiches sind mit dem Blick auf europäische Verhältnisse zwei unterscheidbare Anwendungsfälle auffindbar:

1. Der Anwendungsfall "Europäisches Fernschnellbahnsystem", charakterisiert durch Geschwindigkeiten um 400 km/h, mittlere Stationsentfernungen von ca. 150 km und Transportleistungen im Mittel von 4-10 Mio. Pers/Jahr (Vergleichszahlen: London - Bristol 1975 = 4,4 Mio. Pers/Jahr; Paris - Lyon 1985 = 15 Mio. Pers/Jahr).

2. Der Anwendungsfall "Städteschnellverbinder", charakterisiert durch Geschwindigkeiten um 300 km/h, Streckenlänge von 50-80 km und Transportleistungen von im Mittel 8-16 Mio. Pers/Jahr.

Ersichtlich grenzt eine Erhöhung der Geschwindigkeit auf oder über 500 km/h den Transportleistungsbereich zunehmend ein und erscheint daher für westeuropäische Anwendungsfälle als nicht realistisch.

Die weitere Entwicklungsplanung sieht nun vor, nach erfolgreicher Erprobung der TVE zunächst den Anwendungsfall eines Städteschnellverbinders, der im Inselbetrieb betrieben werden kann, zu bauen und nach Bewährung als Verkehrssystem dann die Schaffung des Europäischen Fernschnellbahnsystems in Angriff zu nehmen.

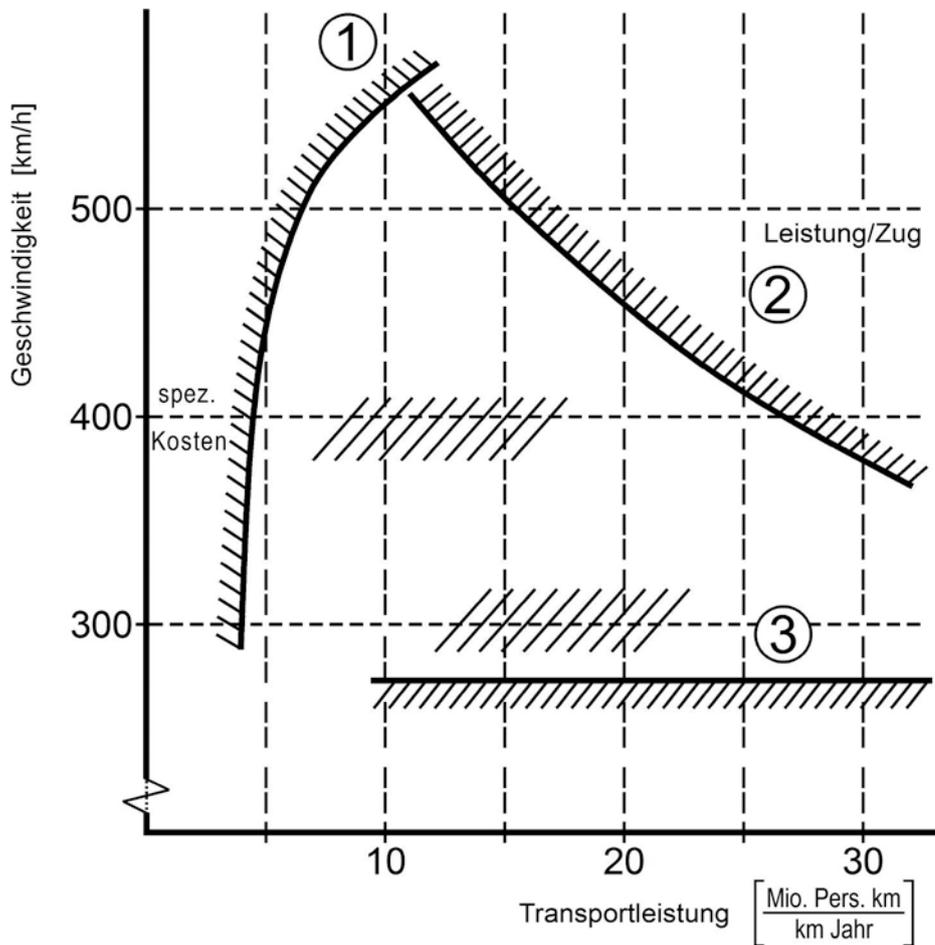


Abb. 2 Anwendungsbereich von EMS-Schnellbahnen

### 3. Elektromagnetische Fahr- und Antriebstechnik

#### 3.1 Das Trag- und Führsystem

Die zum Tragen und Führen der Fahrzeuge notwendigen Kräfte werden berührungsfrei durch Elektromagnete im Fahrzeug erzeugt, die anziehende Kräfte gegenüber ferromagnetischen Schienen am Fahrweg ausüben (Abb. 3). Zur Erzeugung der Kräfte ist elektrische Leistung notwendig, die je nach Anforderungsprofil und Systemauslegung zwischen 1 und 3 kW pro Tonne Fahrzeuggewicht beträgt. Die Elektromagnete sind bandförmig links und rechts über die gesamte Länge der Fahrzeuge angebracht. Der Erregerstrom durch die Magnetspulen wird derart geregelt, daß ein mittlerer Spalt von rund 10 mm zwischen Fahrzeug und Führschienen eingehalten wird. Die elektro-

nischen Regelungseinrichtungen gestatten somit die aktive und voneinander unabhängige Einstellung der Trag- und Führkräfte vom Fahrzeug aus, eine Eigenschaft des EMS-Systems, die maßgebend auf die Gestaltung der Fahrwege bzw. Trassierungselemente wirkt.

Nach dem erfolgreichen Nachweis der Funktionstüchtigkeit der geregelten Elektromagnete war und ist die weitere Entwicklungsarbeit darauf gerichtet, einerseits den Leistungsbedarf für das Schweben zu verringern und andererseits die Verfügbarkeit des Schwebesystems auf das für eine Anwendung notwendige Maß zu erhöhen [ 5 ]. Dies führte auf das Konzept des weitgehend dezentralen Aufbaues des Schwebesystems aus sog. "magnetischen Rädern", die unabhängig voneinander arbeiten und auf ein redundant aufgebautes elektrisches Bordnetz des Fahrzeuges.

Dieses Konzept, das auf der TVE eingesetzt wird, erlaubt den Ausfall einer

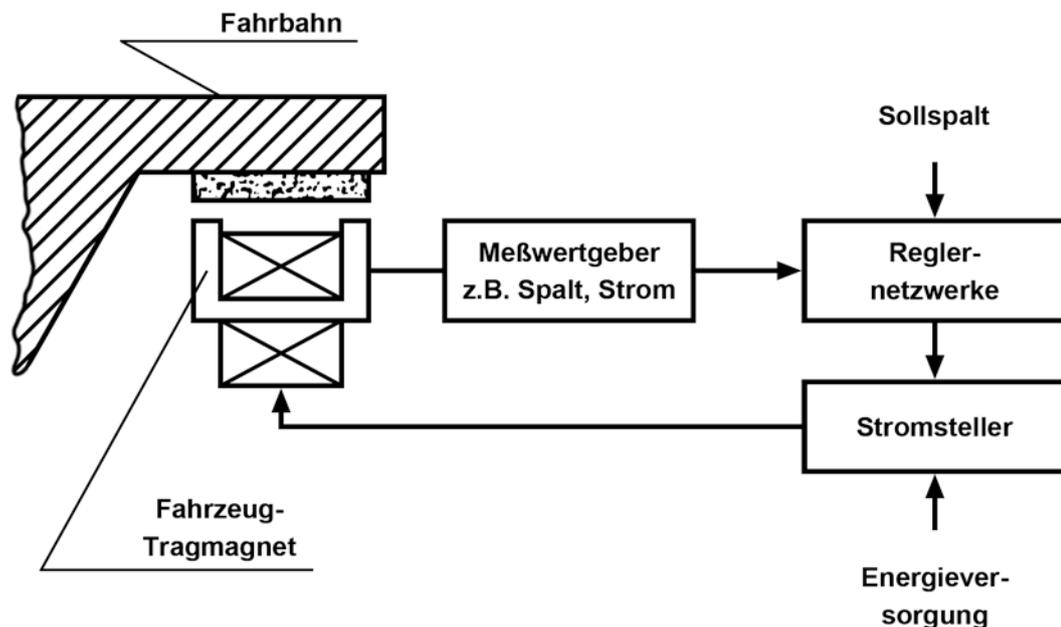


Abb. 3 Prinzip des elektromagnetischen Schwebens

bestimmten Anzahl von Magneten, ohne die Schwebefähigkeit des Fahrzeuges zu beeinträchtigen. Es gestattet wegen des guten Folgeverhaltens der Einzelmagnete darüber hinaus, die Toleranzforderungen an die Lage der Fahrschienen herabzusetzen und trägt dadurch zur Erniedrigung der Fahrweginvestitionen und Unterhaltungskosten bei.

Bei Störungen in einem der redundant aufgebauten Teile der Energieversorgung des Fahrzeuges setzt das Fahrzeug mit Gleitkufen auf Gleitflächen am Fahrweg gesteuert ab und kann durch Anschluß an eine externe Energieversorgung schwebend abgeschleppt werden.

Die Verwendung von anziehenden Magnetkräften erfordert es, daß das Fahrzeug den Fahrweg umgreift, eine weitere Eigenschaft, die die Gestaltung und Dimensionierung der Fahrwegkonstruktionen wesentlich beeinflusst. Die Lastverteilung auf die gesamte Fahrzeuglänge führt bei Personenfahrzeugen auf eine Last von ca. 2,5 t/m statisch. (Dynamische Lastüberhöhungen sind in [ 8 ] behandelt.)

### 3.2 Der Antrieb

Als berührungsfreie Antriebe stehen dem EMS elektrische Linearmotoren zur Verfügung, die nach den von rotierenden Motoren bekannten Prinzipien des Asynchron- und Synchronmotors arbeiten [ 6 ] (Abb. 4). Bei den asynchronen Linearmotoren wird das elektrische Wanderfeld im Fahrzeug erzeugt, wo auch die zur Antriebssteuerung notwendige Leistungselektronik untergebracht ist. Dieses Antriebsprinzip benötigt ein Stromschienensystem zur Übertragung der elektrischen Antriebsleistung in das Fahrzeug. Wegen der relativ kurzen Primärteile des Motors wird es auch das "Kurzstator-Antriebssystem" (KST) genannt.

Beim synchronen Linearmotor wird diejenige Bauart bevorzugt und in der TVE eingebaut, die das elektrische Wanderfeld in den Tragschienen des Fahrzeuges erzeugt. Die Tragschienen sind hierfür auf der gesamten Länge des Fahrzeuges mit Drehstromwicklungen ausgerüstet. Die magnetischen Felder der Tragschienen werden als Erregerfelder für die Erzeugung der Antriebskräfte genutzt. Die zur Antriebssteuerung notwendige Leistungselektronik ist in stationären Unterwerken entlang der Strecke untergebracht, die Übertragung hoher Antriebsleistungen in das Fahrzeug entfällt. Die um Größenordnungen geringere Bordnetzleistung wird über Lineargeneratoren berührungsfrei in das Fahrzeug gebracht. Wegen des vergleichsweise langen Primärsystems wird dieses Antriebssystem auch "Langstator-Antriebssystem" (LST) genannt.

Beide Antriebsvarianten führen zu unterschiedlich hohem technischen und wirtschaftlichen Aufwand für Fahrzeuge und Fahrwege. Das KST-System erfordert einen vergleichsweise höheren Fahrzeugaufwand und einen geringeren Aufwand im Fahrweg, beim LST-System dagegen ist es umgekehrt.

Die kostenmäßige Auswirkung dieses Sachverhalts zeigt Abb. 5, in dem die Gesamtinvestitionen eines Schnellbahnsystems mit 400 km/h im Personenverkehr und 250 km/h im Güterverkehr bezogen auf die Streckenlänge für beide Varianten angegeben sind.

Die berührungsfreien Antriebe üben insofern Einfluß auf die Streckengestaltung aus, als sie nicht reibungsgebunden arbeiten und von daher zunächst keine Begrenzung der Längsneigungen der Trassen ableitbar ist. Allerdings sind praktische Grenzen durch die zur Überwindung der Neigungen notwendigen elektrischen Leistungen gegeben, so daß die maximalen Neigungen aus technisch-wirtschaftlichen Gründen auf 35 %, ausnahmsweise 50 % beschränkt werden.

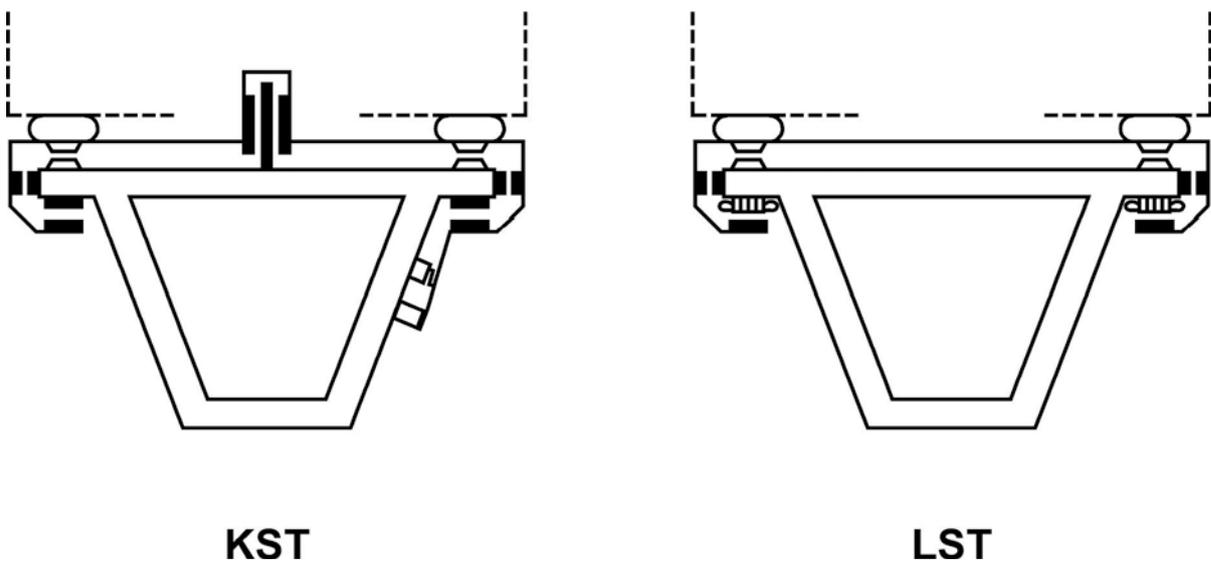


Abb. 4 Antriebsalternativen für EMS-Schwebefahrzeuge

### 3.3 Bremsen

Als Bremsen stehen das elektrische Antriebssystem, das als berührungsfreie Betriebsbremse benutzt wird, und ein berührungsbehaftetes mechanisches Zwangsbremssystem zur Verfügung. Dieses Zwangsbremssystem arbeitet 2stufig in Form von Bremsbacken, die auf die seitliche am Fahrweg angeordneten Führungsschienen wirken und in Form der Gleitkufen, die auf die Gleitflächen auf der Oberfläche des Fahrweges wirken. Durch die Zweistufigkeit wird sichergestellt, daß einerseits die erforderliche Mindestbremsverzögerung von ca.  $1 \text{ m/sec}^2$  bei allen Witterungsverhältnissen sicher erreicht wird, andererseits jedoch die kurzzeitig auf den Fahrweg wirkenden Reaktionskräfte  $4 \text{ m/sec}^2$  nicht übersteigen.

### 3.4 Das Fahrzeug

Die hohen Geschwindigkeiten stellen neue Anforderungen an die Gestaltung der Fahrzeuge, vor allem an eine aerodynamisch günstige Formgebung der Wagenkästen, die die Fahrgäste aufnehmen, und der Schwebestelle, die das Trag-, Führ- und Antriebssystem aufnehmen. Die Schnellbahnaerodynamik war hierzu theoretisch und experimentell bis zu Geschwindigkeiten über 400 km/h zu erweitern. Spezielle Problemstellungen der Ausformung des Spaltes zwischen Fahrzeug und Fahrweg, der Verkleidung der durch die

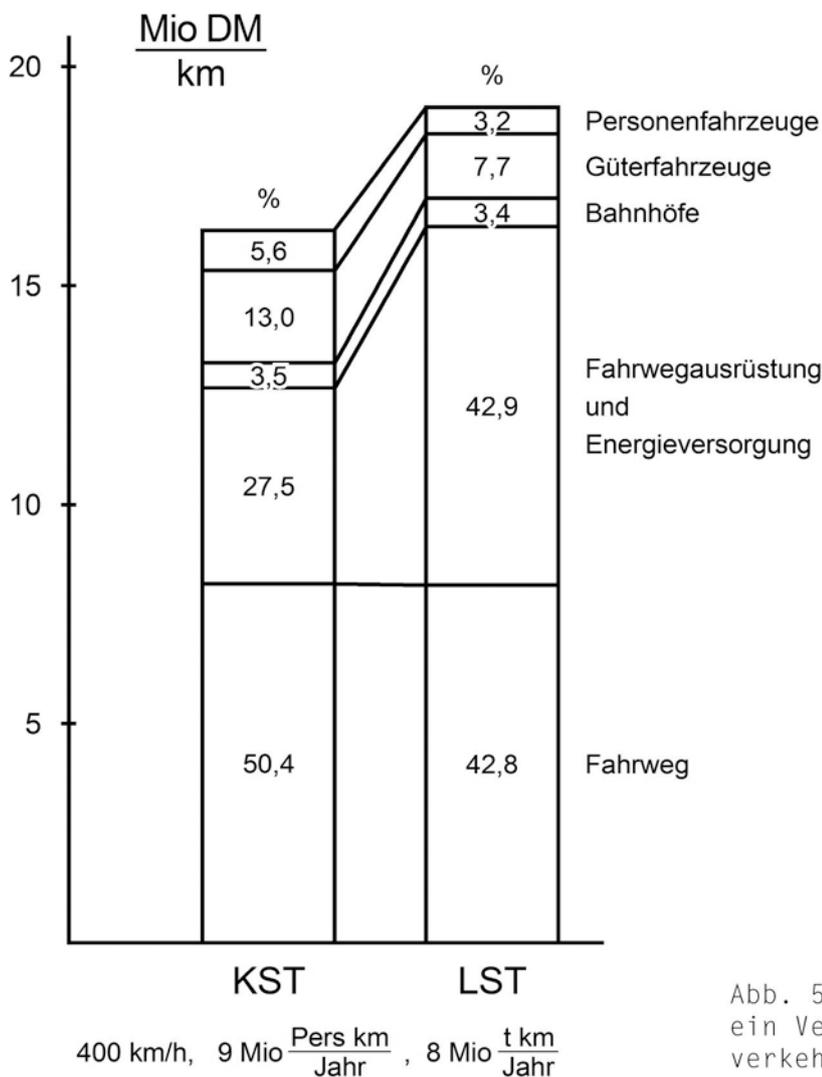


Abb. 5 Gesamtinvestitionen für ein Verkehrssystem mit Personenverkehr (400 km/h, 9 Mio Perskm/Jahr) und Güterverkehr (250 km/h, 8 Mio tkm/Jahr)

Sekundärfedern zwischen Wagenkasten und Schwebegestellten erforderlichen Längsspalte und der Spalte zwischen den Sektionen der Züge waren zu lösen. Abb. 6 zeigt ein Modell des 2gliedrigen Fahrzeuges TRANSRAPID 06 für die TVE.

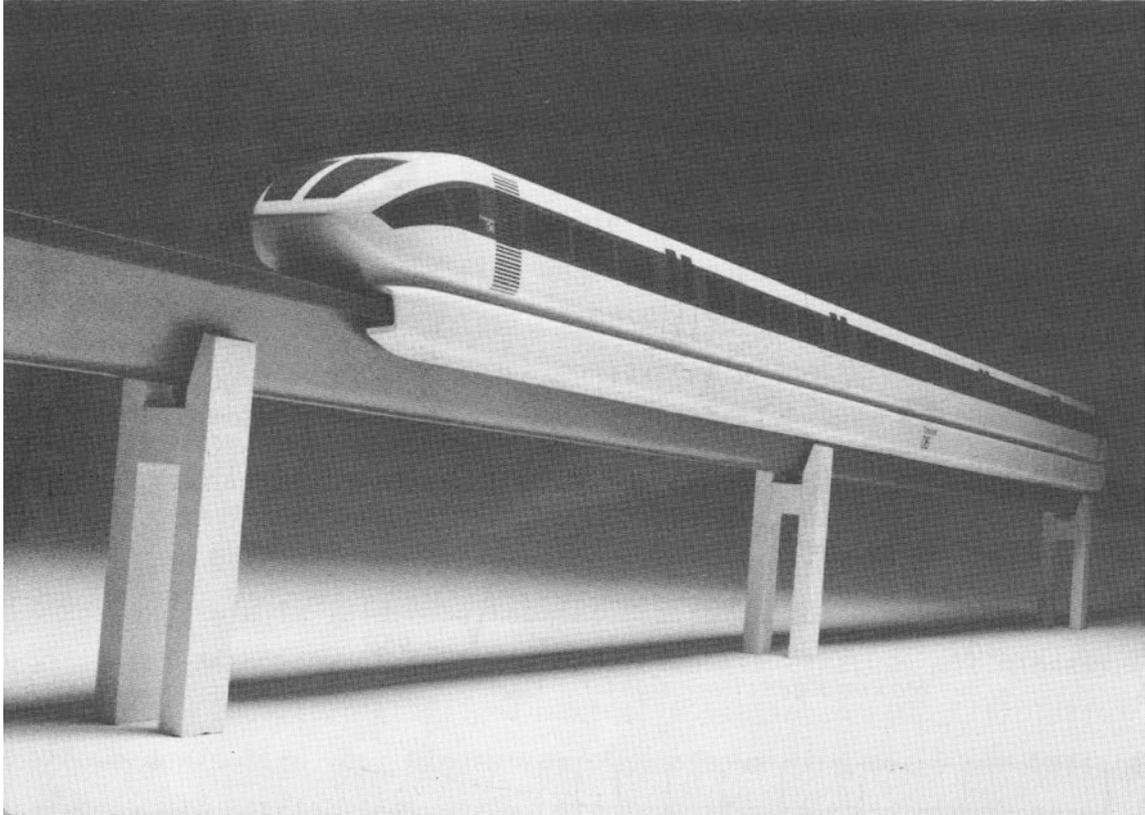
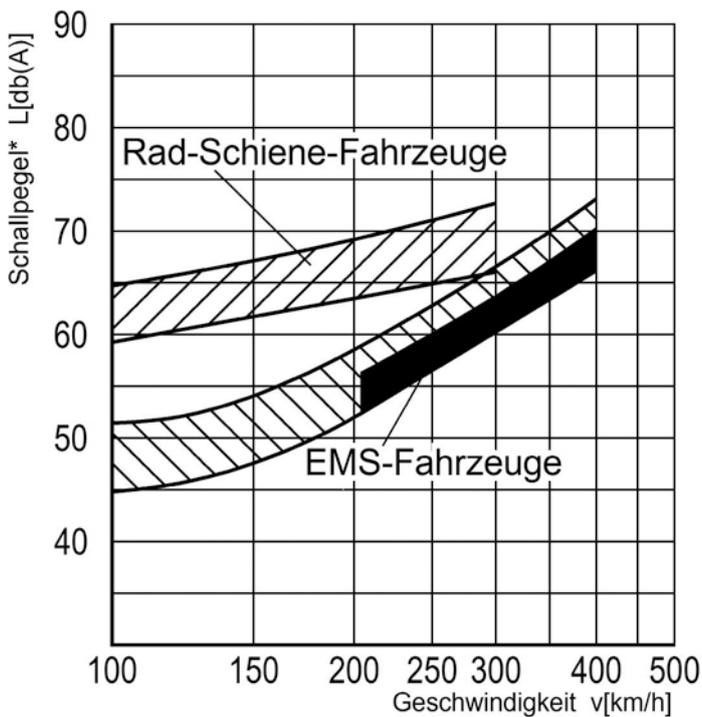
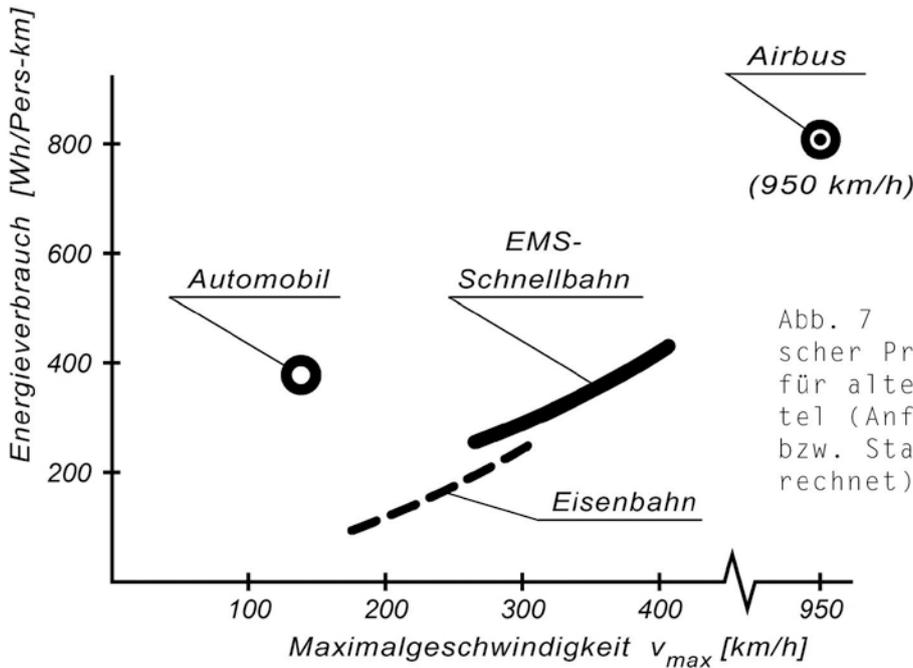


Abb. 6 Modell des Fahrzeuges TRANSRAPID 06 (TVE)

Aerodynamische Effekte der Bugwellen und Nachlaufströmung sowie die damit verbundenen Druckschwankungen bei Zugbewegungen und Vorbeifahrt an festen Hindernissen bestimmen den Abstand der Fahrspuren untereinander, die aerodynamisch freizuhaltenen Räume auf der freien Strecke sowie die erforderlichen Tunnelquerschnitte [ 7 ]. Aerodynamisch günstige Formgebung und geringes Gewicht tragen dazu bei, den spezifischen Energieverbrauch pro Personenkilometer trotz gegenüber rotierenden Motoren niedriger Wirkungsgrade der Linearmotoren bei Werten zu halten, die dem Vergleich mit anderen Verkehrsmitteln standhalten (Abb. 7). Formgebung und Abmessungen der Fahrzeuge und die Berührungsfreiheit des Fahrens verursachen darüber hinaus bis zu 400 km/h zum Teil deutlich geringere Schallemission als heute bekannte Eisenbahnzüge (Abb. 8).

	Auto	Bahnen	Airbus
Auslastung	0,64		
Komfort	Mittelkl.	2. Klasse	Touristenkl.



\* gemessen bei 10 Fahrzeugen pro Stunde in 25m Entfernung

Weitere Anforderung an die Fahrzeuge ist ein möglichst geringes Gewicht, um die zum Schweben notwendige Leistung klein zu halten und ein hohes Nutzlastverhältnis zu erreichen. Dies führte zusammen mit den aerodynamischen Anforderungen auf die Verringerung der Bauhöhe der Fahrgastzelle auf 220 cm und eine Verbreiterung auf 370 cm, so daß 5 Sitzplätze nebeneinander angeordnet werden können. Aus dem Flugzeugbau bekannte Konstruktionen und Materialien werden angepaßt übernommen, so daß Gesamtgewichte von ca. 130 t für ein 2gliedriges Fahrzeug mit 200 Sitzplätzen und damit Nutzlastverhältnisse von ca. 15 % erreicht werden.

Für den Gesamteindruck des Fahrgastes spielt nicht nur die flugzeugähnliche Ausgestaltung der Fahrgasträume eine wesentliche Rolle, sondern auch die Beschleunigungen, denen er ausgesetzt ist. Die der Systemauslegung zugrunde gelegten zulässigen stationären Beschleunigungen orientieren sich an Grenzwerten, die international im spurgebundenen Schnellverkehr üblich sind. Sie betragen in bzw. gegen Fahrtrichtung  $\pm 1 \text{ m/sec}^2$ , in Seitenrichtung  $\pm 0,8 \text{ m/sec}^2$  und in Vertikalrichtung  $\pm 0,5 \text{ m/sec}^2$ . Der zulässige Ruck beträgt in allen Richtungen  $0,5 \text{ m/sec}^3$ . Diese Grenzwerte haben Einfluß auf die Trassierung, wie im folgenden Kapitel gezeigt wird.

Schließlich sei noch bemerkt, daß die Fahrzeuge als Ganzzüge mit mindestens 2 Sektionen (ca. 200 Sitzplätze) und maximal 6 Sektionen (600 Sitzplätze) betrieben werden sollen. Der Mindestfolgeabstand wird ca. 5 min betragen und ist durch das Betriebsleitsystem, das Bremsvermögen und die Sicherheitsabstände für die Weichen gegeben.

#### 4. Fahrwege für das EMS

Dem Fahrweg (FW) eines EMS kommt als Subsystem insofern eine Sonderstellung zu, als er das Verkehrssystem nach außen repräsentiert und daher bei einer späteren Durchsetzung des EMS eine entsprechende Rolle spielen wird. Daher mußte bei der FW-Entwicklung folgendes Ziel (manchmal in Form von Kompromissen) angestrebt werden.

"Erfüllung hoher technischer Anforderungen bei möglichst geringen Gesamtinvestitionen sowie unter Berücksichtigung berechtigter gesellschaftlicher Forderungen".

Dies gilt natürlich weitgehend auch für die Auslegung der Großversuchsanlage TVE [ 3 ].

Der optimale Erfüllungsgrad dieser Anforderungen ist unserer Meinung nach mit den in den folgenden Abschnitten geschilderten Konstruktionslösungen bzw. Verfahren und Konzepten erreicht worden. Auf die einzelnen Anforderungen wird dabei, wenn erforderlich, näher eingegangen.

Ein Großteil der für einen Anwendungsfall in Betracht kommenden Konstruktionen/Verfahren wird erstmals bei der TVE ausgeführt, insofern sollen diese beispielhaft zur Erläuterung herangezogen werden.

#### 4.1 Das Tragwerk

Das Spezifikum der Erzeugung elektromagnetischer Kräfte (s. Abschnitt 3.1) erfordert eine Umgreifung des Tragkörpers, was im Verein mit den sonstigen technischen sowie Freiraumanforderungen nahezu zwangsläufig zur Ausbildung eines Kastenträgers mit beidseitig auskragender Obergurtplatte führt. Als Trägerwerkstoff kann Stahl oder Spannbeton verwendet werden. In der TVE wird überwiegend der Spannbetonträger eingesetzt: Er erfüllt sämtliche Anforderungen bei geringstem Investitionsaufwand (Besonderheit: s. Abschnitt

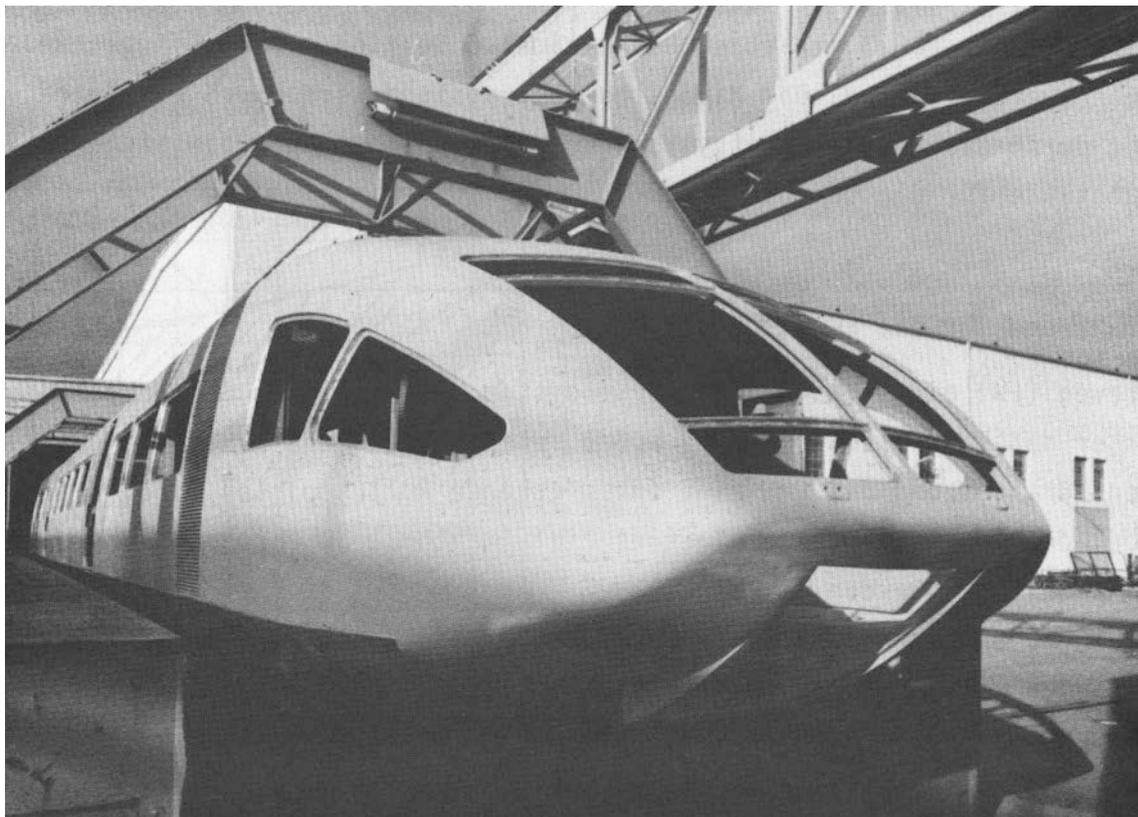


Abb. 9 Seitenansicht eines Modells des TVE-Fahrzeuges

4.2), hervorgehoben werden soll, daß der Betonträger festigkeitsmäßig trotz der hohen Steifigkeitsforderungen (Verformungsbeschränkung im Regelfall auf  $L/4000$ ,  $L$  = Stützmittelpunktsabstand) voll ausgenutzt wird.

Die Ausbildung des Trägers und die Berücksichtigung der meisten Anforderungen haben zur Folge, daß die aufgeständerte Fahrwegkonfiguration mit einem Regel-Stützmittelpunktsabstand von ca. 25 m am weitaus häufigsten bei EMS-Strecken vorkommen wird, in der TVE ausschließlich (Regelquerschnitte s. Abschnitt 4.3). Daher bestehen die Stützen und Fundamente aus Stahlbeton, die Träger aus Spannbeton; Träger und Stützen sind in der Regel Fertigbauteile, das statische System ist ein Einfeldträger. Eine Seitenansicht eines Modells zeigt Abb. 9. Folgende EMS-spezifische Eigenschaften begünstigen die wirtschaftliche Ausführung von Aufständungen:

- Die linienförmige Krafteinleitung ergibt relativ niedrige Flächenbelastungen und damit minimale Erschütterungen.
- Lücken in den Funktionsflächen werden zugelassen; die Ausrüstungselemente sind bis auf die Möglichkeit der Wärmedehnung fest mit dem Tragwerk verbunden und verändern nicht ihre Lage im Betrieb.
- Das geregelte elektromagnetische Trag- und Führsystem ist relativ unempfindlich gegenüber wechselnden Elastizitäten des Fahrweges, daher sind beliebige Mischungen von Feldweiten oder von Aufständungen und tiefliegenden Fahrwegen möglich.
- Durch die berührungsfreie Fahrtechnik entfällt die Erzeugung von Körperschall.

Weitere vorteilhafte Eigenschaften der Aufständung, die sich beim Planungsablauf der TVE bereits bewährt haben, sind in [ 3 ] dargelegt. Es sei angemerkt, daß die Tragwerkskonfiguration für beide in Abschnitt 3.2 geschilderten Antriebsvarianten im wesentlichen gleich sind; im weiteren wird die in der TVE ausgeführte LST-Variante behandelt.

#### 4.2 Die FW-Ausrüstung und deren Justage

Die Wirtschaftlichkeit des Betonfahrweges beruht u. a. darauf, daß die strengen Toleranzanforderungen für eine Geschwindigkeit von 400 km/h konsequent vom Tragwerk entkoppelt und durch geeignete Justierverfahren und -geräte erfüllt werden. Dadurch können den Tragwerken für Herstellung und Montage Toleranzen von  $\pm 20$  mm vertikal und horizontal zugestanden werden.

Die vertikalen Lagetoleranzen der Statorunterkante sind teils mit der Verwölbung des Trägers und seiner Steifigkeit gekoppelt. Die zugelassenen, periodisch auftretenden Verlegetoleranzen sind teils abhängig von den Verformungen des Trägers aus Temperaturunterschieden zwischen Ober- und Untergurt und von der Wellenlänge. Sie können sich überlagern und betragen für die TVE nach Tafel 1. Wie aus Tafel 1 ersichtlich, sind die horizontalen Lagetoleranzen etwas großzügiger bemessen. Diese Toleranzen können mit dem entwickelten Verlegekonzept größtenteils eingehalten werden, bei einzelnen Überschreitungen ist eine Nachjustierung der Funktionsflächen vorgesehen. Als Maß für die

Tafel 1 Zulässige, periodisch auftretende Verlegetoleranzen

	Wellenlänge $\lambda$ [m]	Amplitude $a$ [mm]
Vertikal	$\lambda_1 = 24$	$a_1 = \pm 1,1$
	$\lambda_2 = 3-12$	$a_2 = \pm 1$
	$\lambda_3 = 1,5$	$a_3 = \pm 1$
	$\lambda_4 = 48$	$a_4 = \pm 3$
Horizontal	$\lambda_1 = 24$ (gleichsinnig)	$a_1 = \pm 2,8$
	$\lambda_2 = 24$ (gleichsinnig)	$a_2 = \pm 1,5$
	$\lambda_3 = 6$	$a_3 = \pm 1,5$
	$\lambda_4 = 48$	$a_4 = \pm 2$

Setzungsunempfindlichkeit ergibt sich, daß Setzungen einer einzelnen Stütze von vertikal 6 mm und horizontal 4 mm zugelassen sind. Ab dann muß der Träger nachjustiert werden (justierbare Lager zwischen Stütze und Träger). Bei der Planung der TVE wurde ein vermessungstechnisches Gesamtkonzept entwickelt [ 9 ]. Seine Anwendung bereits in einem sehr frühen Projektstadium hat sich derart ausgezeichnet bewährt, daß man ein solches auch bei einer späteren kommerziellen Einsatzstrecke unbedingt und so früh als möglich fordern muß. Bei seiner Erarbeitung wurden berücksichtigt:

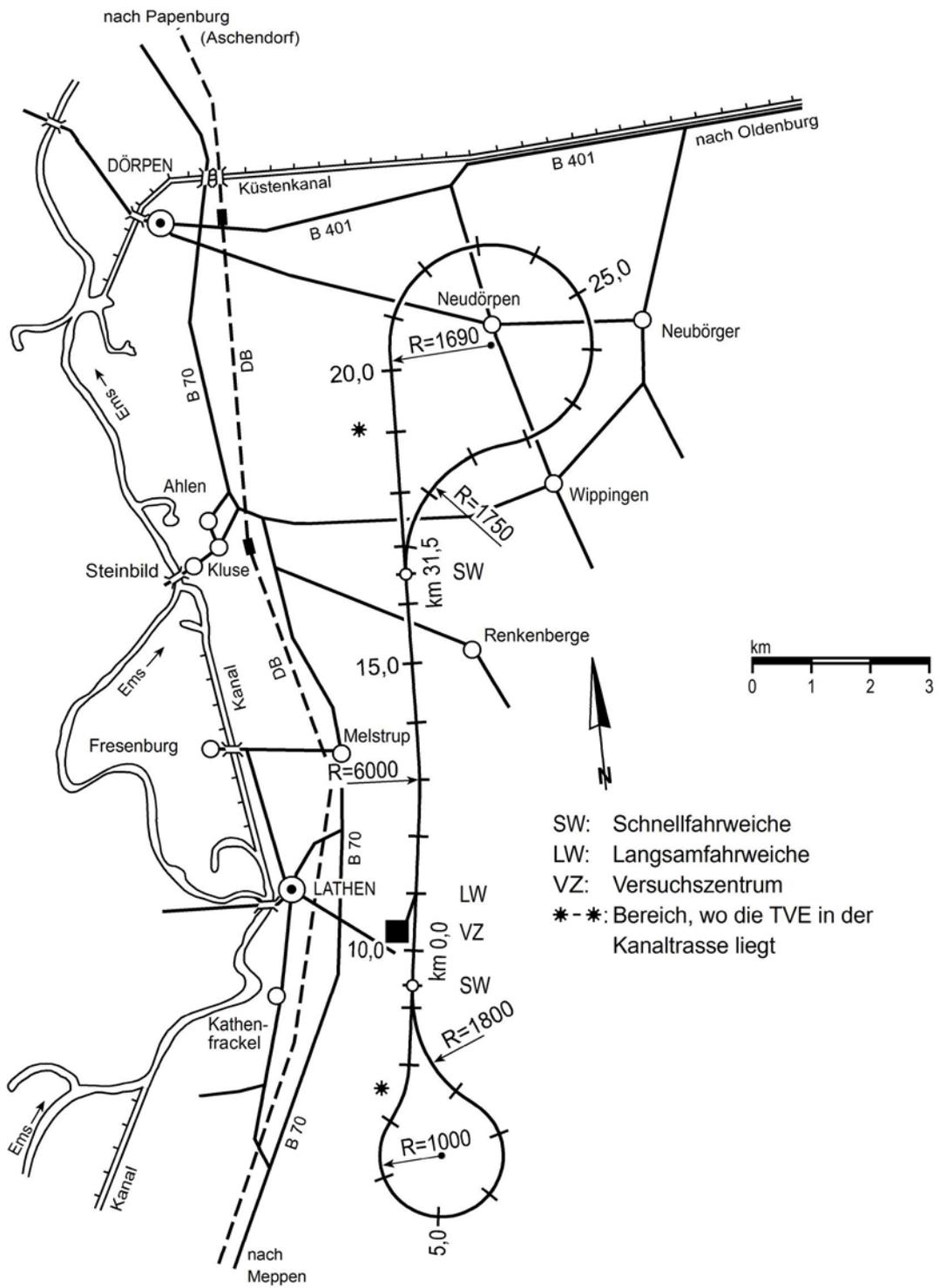


Abb. 10 Lageskizze der TVE

- die Konstruktion der Trasse (Abb. 10)
- die Geländegegebenheiten und Zwangspunkte
- die gewünschten Toleranzen für das Tragwerk und die geforderten hohen Lagegenauigkeiten an den Funktionsflächen
- Vorüberlegungen zur Tragwerkskonstruktion und zum Justagekonzept der FS-Ausrüstung und es galt die Prämisse, daß die Vermessung mit bereits am Markt befindlichen Geräten durchgeführt werden kann und daß der Aufwand in vertretbaren Grenzen bleibt.

Als Ergebnis dieser Arbeit wurde für die Justage der FW-Ausrüstung folgende Nahtstelle definiert:

Im Betonträger werden bei der Fertigung in der Mitte und an einem Ende (ca. 12,4 m Abstand) geeignete Anschlüsse für Meßbolzen hergestellt. Nach Verlegung der Träger werden diese Meßbolzen geodätisch bestimmt und ihre Lagekoordinaten relativ zur Gradientenlinie auf Kassette gespeichert. Die Bestimmungsgenauigkeit beträgt fahwegnormal  $\pm 0,3$  mm und lateral  $\pm 0,6$  mm. Die Meßbolzen werden später auch für die Anpeilung durch die mobile Justagevorrichtung benutzt, die im Taktverfahren arbeitet. Sie besitzt zur Gewährleistung der hohen Verlegegenauigkeit ein Meß- und Regelsystem, ein Bordrechner verarbeitet sowohl die geodätischen Meßdaten als auch Sollwerte und die von den Meßvorrichtungen rückgeführten Ist-Werte und steuert hydraulisch Stellglieder entsprechend an. Diese verformen den ca. 14 m langen Tragrahmen der Vorrichtung, nachdem dieser nach dem Weitertakten am Träger geklemmt und dabei abgehoben worden ist; die hydraulischen Stellglieder befinden sich zwischen dem Rahmen und den Klemmvorrichtungen. Die Taktzeit für die Ausrüstung eines ca. 12,4 m langen FW-Abschnittes wird 45 Minuten bis 1 Stunde betragen.

#### 4.3 Die Trassierungselemente, Regelquerschnitte

Die Grundüberlegungen zur Trassierung von EMS-Strecken sind geprägt von den speziellen Eigenschaften der EMS-Technologie und wurden ausführlich in [7] abgehandelt. Hier soll nur kurz wiederholt werden (Tafel 2):

- die aktive Spurführung ermöglicht eine große Querneigung des FS und damit kleine Horizontalradien. (Die wirksame Überhöhung kann in FW und Fahrzeug (Wagenkastensteuerung) aufgeteilt werden).
- Das berührungsfreie Antriebs-/Bremsystem ermöglicht große Längsneigung.
- Die in Abschnitt 4.1 aufgezählten Eigenschaften begünstigen die Verwendung eines aufgeständerten Fahrweges.

Tafel 2 Liste von Trassierungskriterien für  $v = 300 \text{ km/h}$  und  $400 \text{ km/h}$

Trassierungskriterien	Auslegegeschwindigkeit	
	300 km/h	400 km/h
max. Überhöhungswinkel $\alpha$ [°]	12	12
horiz. Mindestradius $R_{\min}$ [m]	2300	4000
horiz. Regelradius $R_{\text{Regel}}$ [m]	2500	4400
vert. Ausrundungsradius $R_v$ [m]		
- auf freier Strecke	14000	25000
- im Bahnhofsbereich	3600	3600
Längsneigung $S$ [‰]	35 ÷ 50	35 ÷ 50
Spurmittenabstand $d$ [m]	4,4	5,1
(FZ-Breite 3,7 m, freie Strecke)		
Doppelspurbreite $B_{\text{FW}}$ [m]	7,2	7,9
aerodyn. freizuhaltender Raum		
- Breite $B_{\text{aero}}$ [m]	9,5	11,6
- Raumhöhe über FZ-Oberkante $H_{\text{aero}}$ [m]	0,7	1,4

- Die Kombination der o.a. Möglichkeiten ergibt Trassierungen mit einer kleinen Länge von kostenintensiven Ingenieurbauten (Tunnels, hohe Talbrücken, tiefe Einschnitte, Kreuzungsbauwerke), was sich wesentlich auf die Höhe der Bauinvestitionen auswirken wird.
- Grundlage für die Gestaltung von Übergangsbögen und Überhöhungen ist ein sinusförmiger Ansatz für die Krümmung und somit für die freie Lateralbeschleunigung bzw. den Überhöhungsaufbau; damit verläuft auch die Ruck- und Verwindungslinie stetig.

Die Regelquerschnitte für EMS-Strecken wurden ebenfalls bereits in [7] beschrieben, hier soll nur der am weitesten häufigsten vorkommende, die Aufständigung (Abb. 11), erläutert werden.

Da keine ständige Begleitstraße oder Einzäunung erforderlich ist und die Nutzung des Geländestreifens ab der Regelstützhöhe von 5 m möglich ist, wird der Grundflächenbedarf vergleichsweise sehr gering sein, was für die Durchsetzung des EMS bedeutend sein wird (eine entsprechende gesetzliche

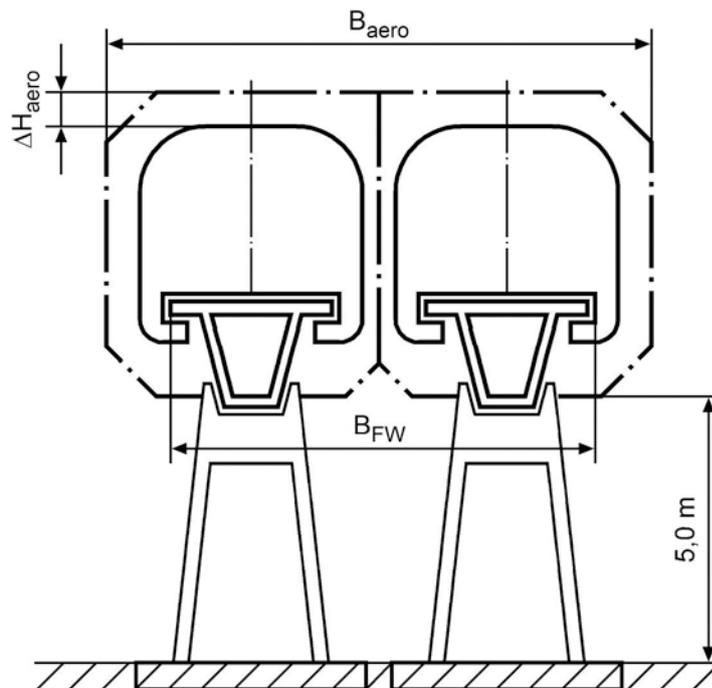


Abb. 11 Regelquerschnitt Aufständering

Regelung wie in Frankreich steht hierzulande allerdings noch aus).  
 Ab einer Stützhöhe von 7,5 m wird zwischen den FW-Trägern ein Fluchtweg angeordnet. Die Regelfeldweite beträgt ca. 25 m, für Sonderfälle (z.B. Kreuzungen) und ab einer Stützhöhe von ca. 15 m wird die Feldweite auf 31 m bzw. 37 m vergrößert (Grenze der Fertigteilmontage), ab einer Stützhöhe von 30 m (hohe Talbrücken) oder für Flußkreuzungen kommen Feldweiten  $> 70\text{ m}$  in Betracht.

In der TVE wird ausschließlich die Regelquerschnitt Aufständering mit Stützhöhen zwischen 2,5 m und 12 m und Feldweiten zwischen 25 m und 37 m gebaut werden. Die Horizontalbögen werden bis zu  $12^\circ$  überhöht sein und Radien von 500 m bis 6000 m haben, als Übergangsbögen werden Sinusoiden zum Einsatz kommen. Die vertikalen Ausrundungen werden zwischen 3600 m und 50000 m betragen.

## Literatur

- [ 1 ] ZUREK, R.: Schwebende Schnellbahnen. Umschau in Wissenschaft und Technik 78 (1978), Heft 19, S. 587 - 596
- [ 2 ] ROGG, D., und SCHULZ, H.: Systementscheidung bei der Magnetschwebetechnik. ETR, Heft 11 (1978), S. 721 - 728
- [ 3 ] KRETSCHMAR, R., und MÖLZER, P.: Die Planung der TRANSRAPID Versuchsanlage Emsland. ETR, Heft 5 (1979), S. 339 - 352
- [ 4 ] HSB-STUDIENGESELLSCHAFT: Trassierung einer Strecke Hannover - Kassel (EMS-Technik) und Vergleich mit einer R/S-Trassierung. (unveröffentlicht)
- [ 5 ] STEINMETZ, G.: Sicherheits- und Zuverlässigkeitsaspekte beim EMS-Trag- und Führsystem einer Magnetbahn mit Langstatorantrieb. Vortrag auf der Fachtagung "Sicherheit/Zuverlässigkeit und Zulassung von neuen Schnellbahnsystemen" am 31.1./1.2.80 in Köln
- [ 6 ] LANG, A.: Stand der Antriebstechnik bei EMS-Fahrzeugen. Elektrische Bahnen 9 (1977), S. 232 - 239
- [ 7 ] ZUREK, R., und MÖLZER, P.: Trassierungselemente für Schnellbahnen mit elektromagnetischer Schwebetechnik. ETR, Heft 4 (1977), S. 197 - 206
- [ 8 ] HILLIGES, D.: Fahrwege für Magnetschwebefahrzeuge unter dynamischer Beanspruchung. Bauingenieur 51 (1976), S. 337 - 347
- [ 9 ] KARNER, G.: Vermessungstechnisches Gesamtkonzept für die Magnetbahn Versuchsanlage im Emsland. (1978) (unveröffentlicht)

H. Kurz

---

## 1. Entwicklungspotential der Rad/Schiene-Technik

Der 26.02.1981 hat mit der spektakulären und weltweit öffentlichkeitswirksamen 380 km/h-Rekordfahrt des TGV Nr. 16 auf der Neubaustrecke Lyon - St. Florentin (-Paris) eindrucksvoller als durch jede Art von Theorie, Simulation und Prüfstandsversuch die bislang unausgeschöpften Reserven der Rad/Schiene-Technik demonstriert. Seit dem 27.09.1981 ist das TGV-System nunmehr auch planmäßig mit einer größten Geschwindigkeit von 260 km/h in Betrieb gegangen und beweist seitdem Tag für Tag die tatsächlich erreichte Ausweitung der Wettbewerbsfähigkeit der Bahn bis in den Entfernungsbereich von 500 km: Auto und Flugzeug liegen mit deutlich längeren Reisezeiten zurück, anhaltende Abwanderungsbewegungen zur Schiene werden sichtbar.

Mittelfristig kann von einer weiteren Steigung der Höchstgeschwindigkeit bis 300 km/h und damit einer weiteren Festigung der Wettbewerbsfähigkeit des R/S-Systems gerechnet werden.

Die Richtigkeit aller Bemühungen um eine Erhöhung der Attraktivität des spurgeführten Personenfernverkehrs durch Weiterentwicklung des Systems Eisenbahn ist damit in beeindruckender Weise bestätigt worden. Es besteht in unserem Nachbarlande auch kein Zweifel, daß der wirtschaftliche Erfolg des TGV-Systems ebenso beeindruckend sein wird.

Die volle Ausschöpfung aller Entwicklungsreserven des Systems Rad/Schiene ist in der Bundesrepublik Deutschland eines der wesentlichen Ziele des vom Bundesminister für Forschung und Technologie (BMFT) bisher maßgeblich geförderten Rad/Schiene-Forschungsprogramms, das sich nach umfangreichen Vorentwicklungen zur Zeit auf die Projektierung und den Bau eines Versuchs- und Demonstrationsfahrzeugs für eine Auslegungsgeschwindigkeit von 350 km/h konzentriert. Dieses Fahrzeug wird als herausragender optischer Höhepunkt des Gesamtsystems "Eisenbahn der Zukunft" zeigen, daß alle Anforderungen an fortschrittliche Schnellverkehrssysteme, charakterisiert durch

- Verkürzung der Gesamtreisezeit
- Angemessene Fahrpreise
- Verknüpfung mit vorhandener Verkehrsinfrastruktur

- Niedrige spezifische Energieverbrauchswerte
- Unabhängigkeit von "knappen" Primärenergieformen
- Umweltschonung
- Hohe Sicherheit und hoher Fahrkomfort

durch ein weiterentwickeltes innovatives Rad/Schiene-System im europäischen Rahmen voll erfüllt werden können. Die attraktive, energiesparende und umweltfreundliche Bahn von morgen ist die Rad/Schiene-Bahn, die zudem durch Nutzung der vorhandenen Infrastruktur von der ersten Ausbaustufe an voll netz-wirksam ist, wie es wiederum des Beispiel des TGV beweist. Kein anderes System kann diese Fülle aller Vorteile auf sich vereinigen.

## 2. Zukunftschancen für ein europäisches Schnellbahnsystem

Die jüngsten Erfolge der Rad/Schiene-Technik (R/S-Technik) können insgesamt noch nicht darüber hinwegtäuschen, daß der internationale Personenfernverkehr in Europa in den rückliegenden Jahrzehnten durch den relativen Stillstand der eisenbahntechnischen Entwicklung und den damit verbundenen Attraktivitätsverlust der Bahn gegenüber ihren Mitbewerbern gekennzeichnet ist. Diese Entwicklung wurde durch den politisch stark begünstigten Ausbau des Straßen- und Luftverkehrs verstärkt, aber auch durch die Bahnen selbst gefördert, die ihre im rein nationalen Bereich vielfach erreichte Beförderungsqualität auf den internationalen Verkehr nicht übertragen konnten.

Die Chancen eines europäischen Schnellbahnsystems sind jedoch noch nicht ver-tan. Fast 2/3 der wichtigsten Luftverbindungen in Europa überschreiten die 600 km-Grenze nicht, einen Entfernungsbereich also, in dem eine fortschrittliche Schnellbahn eine konkurrenzfähige Gesamtreisezeit und günstige Energieverbrauchswerte erreichen kann.

Voraussetzung ist hierfür jedoch eine abgestimmte europäische Netzkonzeption, die Harmonisierung der Auslegungsparameter und Betriebskonzepte für neue Strecken und eine koordinierte Betriebsführung. Die Eisenbahnen und die Eisenbahnindustrie Europas sind aufgerufen, die Voraussetzungen hierfür zu schaffen. Das überaus erfolgreiche Beispiel der Airbus Industries sollte An-sporn und Herausforderung sein.

## 3. Konzeption für eine Rad/Schiene-Schnellbahn

### 3.1 Allgemeines

Im Rahmen der deutsch-französischen Zusammenarbeit im Technologiebereich ist

unter anderem vorgesehen, einen technisch-wirtschaftlichen Vergleich von vier aktuellen Personenfernverkehrssystemen unter vereinbarten Randbedingungen vorzunehmen. Neben zwei unkonventionellen Systemen - Magnetbahn und Luftkissenbahn - werden auch ein französisches R/S-System vom Typ "TGV" und ein fortschrittliches deutsches System in den Vergleich einbezogen. Im Hinblick auf die vereinbarten Randbedingungen (siehe 3.2) waren für das deutsche R/S-System Konzeption und Technik neu festzulegen, wobei ausschließlich die vereinbarten Planungsgrundlagen als Vorgaben dienten.

### 3.2 Planungsgrundlagen

Als Planungsgrundlagen für den Entwurf eines Schnellbahnsystems sind angenommen:

- Artreiner Personenfernverkehr auf eigener Trasse (Euro-IC)
- Leichtbau - Einheitsfahrzeug
- Normalspurweite
- Auslegungsgeschwindigkeit 300 km/h
- Verknüpfung mit vorhandenen Knotenpunkten
- Planungsraum Paris - Frankfurt a.M.
- Fahrgastaufkommen 7,5 Mio. P/a (alternativ 15 Mio. P/a für Sensitivitätsuntersuchungen)
- Komfortmaßstab: 0,8 m<sup>2</sup> Grundflächen/Sitzplatz

#### 3.2.1 Artreiner Personenfernverkehr auf eigener Trasse

Im Hinblick auf den Systemvergleich ist die R/S-Schnellbahn wie ihre konkurrierenden Systeme als artreines Personenfernverkehrssystem auf eigener Hochgeschwindigkeitstrasse entworfen. Die Auswirkungen auf die Trassierung und die erforderlichen Investitionen werden im einzelnen noch dargestellt (siehe 4.1!). Im Rahmen der Entwurfselemente des Personenfernverkehrssystems (Infrastruktur und Fahrzeug) können auch Güter - etwa analog zur Luftfracht - befördert werden.

#### 3.2.2 Leichtbau - Einheitsfahrzeug

Für die Abwicklung des Fahrgastaufkommens ist ein Einheitsfahrzeug in Leichtbauweise mit einem Nutzlastfaktor > 10 % vorzusehen. Die Innenausstattung ist flexibel zu gestalten, um wechselnden Nachfragebedürfnissen angepaßt zu werden.

### 3.2.3 Normalspurweite

Um die Nutzung vorhandener Infrastrukturen insbesondere im Kern der Ballungsgebiete sicherzustellen und "das Herz der Städte" zu erreichen, ist die europäische Normalspurweite vorzusehen. Als Profilpaarung gilt die Schiene UIC 60 mit Einbauneigung 1:40 und das Radprofil UIC/ORE S 1002.

### 3.2.4 Auslegungsgeschwindigkeit 300 km/h

Die Auslegungsgeschwindigkeit der R/S-Schnellbahn wurde für den vereinbarten Planungsraum mit 300 km/h festgelegt. Sie liegt damit in einem durch frühere Untersuchungen bereits bestätigten optimalen Rahmen. Größere Betriebsgeschwindigkeiten führen bei den für mittel- und westeuropäischen Verhältnissen typischen Haltabständen von 80 ... 120 km zu keinen entscheidenden Fahrzeitgewinnen mehr, bringen jedoch für das R/S-System weit höhere Investitionen und Energieverbrauchswerte.

So steigt bei einer R/S-Schnellbahn bei Erhöhung der Geschwindigkeit von 300 km/h auf 400 km/h der Investitionsbedarf für die Trasse einschließlich Ausrüstung um etwa 100 % und der Energieverbrauch um etwa 70 %, während die Fahrzeit bei mittleren Halteabständen von 100 km um nur 8...12 % sinkt (je nach Lage der City-Anbindung).

Für größere Halteabstände können sich andere Optimalwerte ergeben. So wird in Frankreich für die Relation Calais-Paris-Marseille auch eine  $V_{max}$  bis zu 400 km/h für denkbar gehalten.

### 3.2.5 Verknüpfung mit vorhandenen Knotenpunkten

Die Schnellbahn bedient die vorhandenen Verkehrsschwerpunkte im Planungsraum. Dies sind die Citylagen der Endpunkte Paris und Frankfurt a.M., die Flughäfen Charles-de-Gaulle und Rhein-Main sowie die Städte Reims, Metz, Saarbrücken Kaiserslautern.

### 3.2.6 Planungsraum Paris - Frankfurt a.M.

Besonders im Hinblick auf ein europäisches Schnellbahnsystem wurde der Planungsraum grenzüberschreitend in der Achse Paris - Frankfurt a.M. festgelegt. Gleichzeitig werden hierdurch auch charakteristische topographische Verhältnisse zwischen Flachland und schwierigem Mittelgebirge vorgegeben, so daß repräsentative Investitionsaussagen erwartet werden können (ausgenommen sind Investitionen für ausgesprochene Flachlandstrecken).

### 3.2.7 Fahrgastaufkommen

Für das Fahrgastaufkommen werden 7,5 Mio. P/a in beiden Richtungen vereinbart. Die Leistungsfähigkeit des Systems ist zusätzlich für das doppelte Aufkommen nachzuweisen.

Die Teilstreckenbelastung sowie die angebotenen Zugleistungen gehen aus Bild 1 hervor; sie bilden die Grundlage für Fahrplan- und Fahrzeugentwurf.

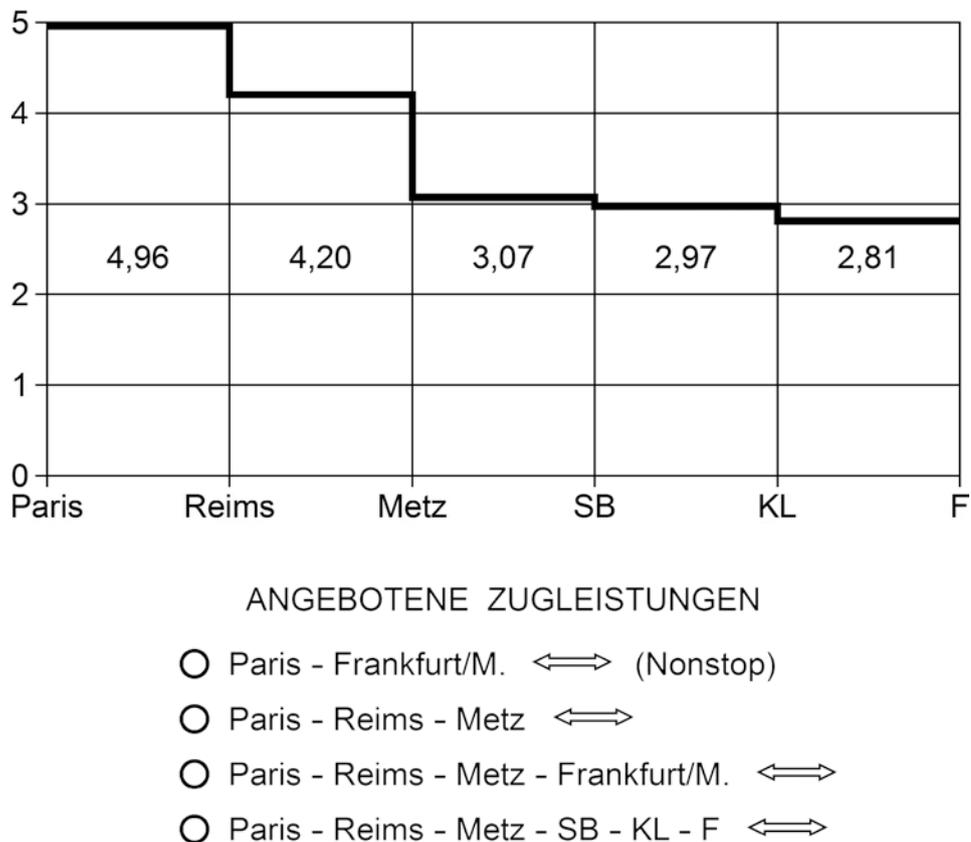


Bild 1:

Fahrgastaufkommen - Teilstreckenbelastung und angebotene Zugleistungen

### 3.2.8 Komfortmaßstab

Um für die einzelnen Systeme vergleichbare Fahrzeugentwürfe zu erhalten, ist eine Einheitsklasse mit einem Grundflächenbedarf von 0,8 m<sup>2</sup> je Sitzplatz vorgesehen. Der Platzkomfort liegt damit zwischen der heutigen 2. und 1. Wagenklasse.

Depot- und Serviceräume sind zusätzlich zu berücksichtigen.

## 4. Technische Ausführung einer Rad/Schiene-Schnellbahn

### 4.1 Trasse und Trasseninvestitionen

Der Aufwand für ein neues Schnellbahnsystem in europäischer Dimension wird entscheidend durch die Investition für den Fahrweg und seine Ausrüstung bestimmt; die Fahrzeuge erfordern nur einen vergleichsweise bescheidenen Aufwand von unter 10 % der Systeminvestition. Alle Anstrengungen müssen daher ganz wesentlich auf die Senkung des Fahrwegaufwandes konzentriert werden.

#### 4.1.1 Trassierungsparameter

Von ausgesprochenen Nebenbahnen abgesehen, hat sich bei der Eisenbahn ein breites Spektrum von Trassierungsdaten herausgebildet, das auf der freien Strecke bei Reibungsbetrieb zum Beispiel Neigungen bis 55 ‰ und Halbmesser bis herunter zu 250 m vorsieht. Die Auswahl der Daten richtet sich maßgeblich nach gewünschter Leistungsfähigkeit, Betriebskonzept, Investition und Betriebskosten.

Für das zu entwerfende Schnellbahnkonzept wurden folgende Trassierungsdaten zugrunde gelegt, die sich im Verlauf der Trassenauswahl und -optimierung als günstigste Werte herausstellten:

Auslegungsgeschwindigkeit	300 km/h
Größte Längsneigung	35 ‰
Größte freie Seitenbeschleunigung (stationär)	0,85 m/s <sup>2</sup>
Größte Überhöhung	200 mm
Kleinster Bogenhalbmesser (b = 0,85 m/s <sup>2</sup> )	3 250 m
Regelbogenhalbmesser (b = 0,65 m/s <sup>2</sup> )	3 500 m
Kleinster Vertikalhalbmesser Kuppe / Wanne	14 000 / 9 000 m
Regelvertikalhalbmesser Kuppe / Wanne	27 000 / 17 000 m
Querruck	0,5 m/s <sup>2</sup>
Übergangsbogen	sinus
Regel-Gleisabstand	4 400 mm

Der anzuwendende vertikale Ausrundungshalbmesser ist durch eine breite Spanne gekennzeichnet. Die Anwendung der unteren Grenzwerte erfordert eine sorgfältige dynamische Abstimmung der Sekundär- und Primärfederung des Fahrzeuges, um die auf den Fahrgast wirkende Vertikalbeschleunigung insbesondere bei Wannenfahrt in Grenzen zu halten. Bei Anwendung der oberen Grenzwerte liegt diese Beschleunigung deutlich unter 0,5 m/s<sup>2</sup>. Die Mehrkosten der größeren Verti-

kalhalbmesser betragen nur etwa 0,5 % der Gesamtinvestition, so daß sie kein gravierendes Kriterium darstellen.

Angesichts der Streckenneigung von 35 % könnte auch der Energieverbrauch der Züge den Charakter eines Trassierungsparameters annehmen. Für den untersuchten Planungsraum muß dies jedoch verneint werden, wie später noch im einzelnen dargelegt wird (Abschnitt 4.1.4).

#### 4.1.2 Regelquerschnitte

Die Fahrwegregelquerschnitte - ebenerdig, Damm, Einschnitt, Anschnitt mit Stützmauer, Tunnel, Aufständering - sind auf einem Gleisabstand von 4,40 m bei der Auslegungsgeschwindigkeit von 300 km/h aufgebaut. Dieser Abstand berücksichtigt bei einer Fahrzeugbreite von 3,2 m alle aerodynamischen Erfordernisse, die an das Fahrzeug im Hinblick auf Konstruktionsbeanspruchung und Fahrgastkomfort gestellt werden.

Zwei typische Querschnitte sind in Bild 2 und 3 dargestellt.

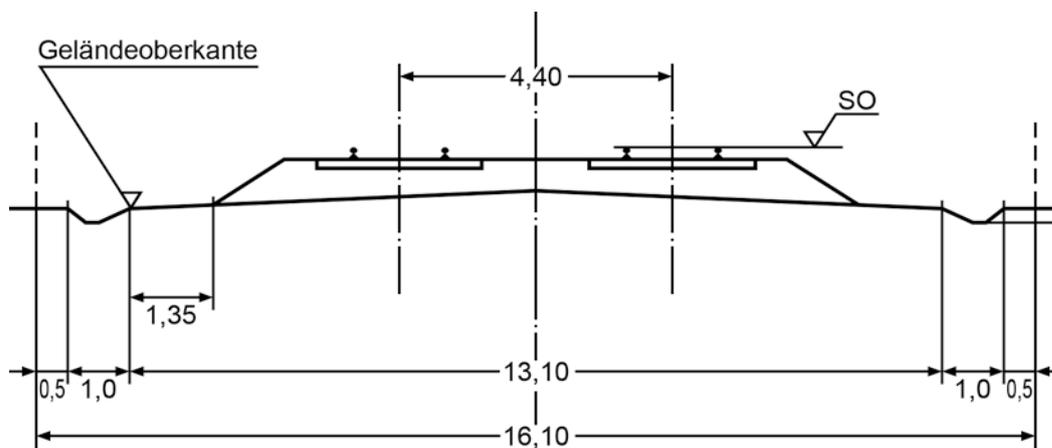


Bild 2:

Regelquerschnitt - ebenerdiger Fahrweg

Die Aufständering ist im R/S-System kein kostengünstiges Fahrwegelement. Bei durchgeführtem Schotterbett - im Interesse einer gleichmäßigen Fahrwegelastizität längs der Trasse erforderlich - werden die Dimensionierungslasten zu je 40 % vom Tragwerk und Überbau und zu nur 20 % von der Verkehrslast bestimmt. Ein gegenüber UIC abgeminderter Lastenzug - wie hier durch das Leicht-

baufahrzeug gegeben - führt somit zu keiner einschneidenden Kostensenkung bei der Aufständering. Dies kann nur bei einem mit dem Tragwerk integrierten Plattenoberbau erreicht werden, der jedoch angesichts der schon genannten homogenen Elastizität zweckmäßig auf der Gesamtstrecke eingebaut werden müßte.

Hierzu besteht bei dem artreinen Personenfernverkehrssystem jedoch weder ein technischer noch ein wirtschaftlicher Anlaß.

Die Aufständering wird daher nur in Sonderfällen eingesetzt, etwa bei direkt aufeinander folgenden Verkehrswegen, die die Schnellbahn in Hochlage kreuzt, oder auch aus ökologischen Gründen, um zum Beispiel bei Landschaftssenken Veränderungen des Kleinklimas zu vermeiden, die zum Beispiel ein Dammabschluß durch Schaffung eines "Kaltluftsees" hervorrufen kann.

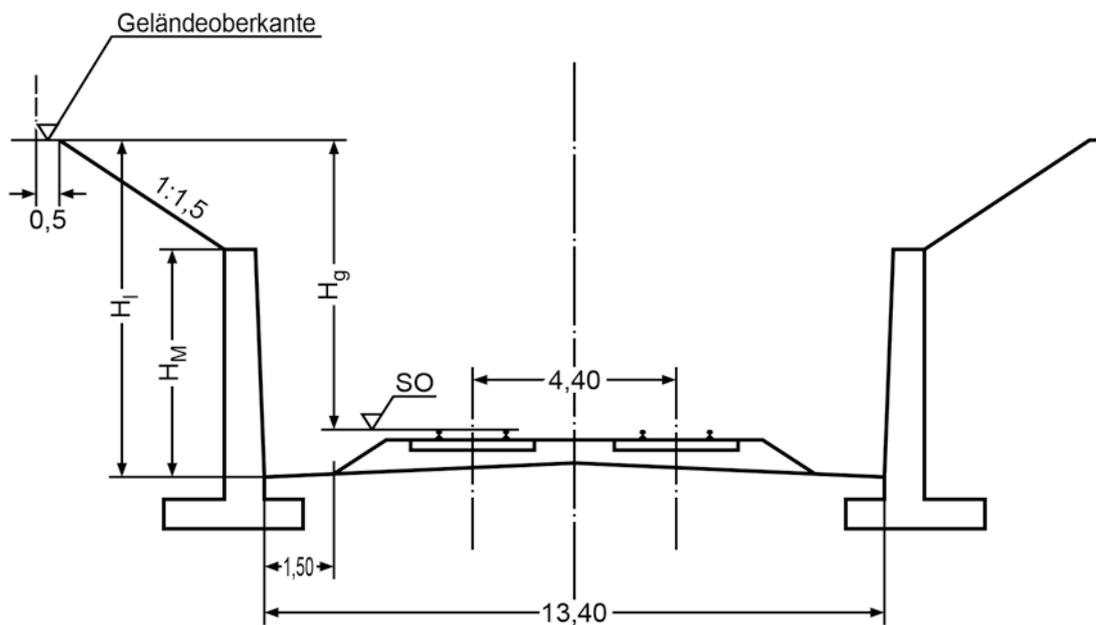


Bild 3:

Regelquerschnitt - Einschnitt mit Böschung und Stützmauer

#### 4.1.3 Energieversorgung

Die elektrische Traktion der R/S-Schnellbahn ist auf dem 25 kV- 50 Hz-System für Fahrzeug und Infrastruktur aufgebaut. Neben den Vorteilen für die Fahr-

zeugeinrichtung - weniger Gewichts- und Kostenaufwand zum Beispiel für Transformator und Glättungseinrichtungen - lassen sich erhebliche Vorteile bei der Infrastruktur erzielen, wenn auf die unmittelbare Einspeisung der Unterwerke aus der nächstgelegenen EVU-Leitung zurückgegriffen und auf die parallele Bahnstromversorgungsleitung verzichtet werden kann, wie sie bei anderen Systemen mit dem Beispiel abweichender Frequenz vielfach erforderlich ist.

Für das hier untersuchte Konzept der Speisung aus dem öffentlichen Netz ergibt sich bei unmittelbarer Unterwerkseinspeisung ein Investitionsminderaufwand von etwa 50 % gegenüber der Lösung mit Parallelleitung.

Soweit vorhandene Bahnanlagen an Knotenpunkten mitbenutzt werden, sind für die Energieeinspeisung Sondermaßnahmen vorzusehen. Hierfür stehen bewährte Lösungen zur Verfügung.

#### 4.1.4 Bewertungskriterien für die Trassenwahl

Im Zeitalter eines geschärften Umweltbewußtseins kann auch in einer konzeptionellen Studie nicht nach rein technisch-wirtschaftlichen Überlegungen trassiert werden, wenn die Durchsetzbarkeit der gefundenen Trasse nicht von vornherein in Frage gestellt sein soll.

Für die R/S-Schnellbahn wurden daher die möglichen Trassenvarianten nach folgenden Kriterien und Gewichtungen bewertet:

- Trasseninvestition	38 %
- Lärmimmission	24 %
- Schutz des ökologischen Umfeldes	11 %
- Erholungsflächennutzung	11 %
- Natur- und Landschaftsschutz	10 %
- Landwirtschaftliche Nutzung	6 %

(zum Beispiel Weinbauflächen, insbesondere in Frankreich)

Bei gleichwertigen oder nahezu gleichwertigen Trassen wurde als weitere Entscheidungshilfe die Flüssigkeit der Trassierung in Grund- und Aufriß herangezogen (zum Beispiel Vermeidung der Berg- und Tal-Bahn).

#### 4.1.5 Trasseninvestition

Die mit den Vorgaben nach 4.1.1 bis 4.1.4 durchgeführte Trassierung und Investitionsermittlung für Fahrweg und Ausrüstung führt zu den erwarteten günstigen Investitionswerten. Dabei sind die spezifischen Kosten etwa je m<sup>3</sup>

Erdbauwerk oder je m<sup>3</sup> Tunnelausbruch identisch mit den von anderen Bahnsystemen, zum Beispiel auch - soweit relevant - mit den Werten der Magnetbahn. Die niedrigen Investitionswerte ergeben sich vielmehr zum einen aus der Geometrie (zum Beispiel ausschließlich auf Personenverkehr zugeschnittener Gleisabstand) und entscheidend aus der Wahl der Trassierungsparameter, die eine flexible Trassierung mit weitgehender Anschmiegung der Gradienten an die Geländeoberkante möglich machen. Ursächlich für niedrige Investitionen sind somit konkret

- geringe Dammhöhe und geringe Einschnitttiefe
- geringer Grundflächenbedarf bei gegebenem Böschungswinkel
- niedriger Anteil von Aufständern mit nur geringer Durchschnittshöhe
- Vermeidung hoher Talbrücken
- Minimierung des Tunnelanteils auf unter 2 % der Streckenlänge
- flexible Umfahrung von Schutz- und Sperrgebieten sowie
- kostengünstige Energieversorgung gemäß 4.1.3

Am Beispiel der Trassierungsparameter Bogenhalbmesser und Längsneigung (Bild 4) sei noch auf einige Schlußfolgerungen hingewiesen (die Zahlenwerte des Bildes 4 gelten nur für den angegebenen Abschnitt Frankfurt a.M. - Kaiserslautern):

- der Bogenhalbmesser ist gegenüber der Längsneigung dominant,
- für den untersuchten Planungsraum ist das Parameterpaar 35 % / 3.250 m optimal, größere Neigungen führen zu keiner weiteren Kostensenkung.
- Bei festgehaltenem Halbmesser 3.250 m führt die zum Beispiel von 35 % auf 18 % ermäßigte Neigung zu einem Mehraufwand von 4 %, die betriebliche Nutzbarkeit der Trasse - zum Beispiel für Containerzüge - würde jedoch erheblich ausgeweitet. Würde man gleichzeitig den Bogenhalbmesser auf 4.000 m verändern, fällt der Kostensprung mit über 20 % deutlicher aus.

Die Investitionswerte des Bildes 4 gelten für den genannten Trassenabschnitt; sie sind für die Gesamtstrecke nicht repräsentativ. Den starken Einfluß der jeweils vorgefundenen Topographie mag folgender Vergleich aus einem aktuellen Streckenneubauprogramm verdeutlichen: die Investitionen in DM/km einer zweigleisigen Strecke liegen bei einfachen topographischen Verhältnissen nur etwa beim halben Wert einer schwierigen Mittelgebirgsstrecke mit hohem Tunnel-

und Brückenanteil. Schließlich ist zu berücksichtigen, daß die in Planungsstudien erzielten Investitionswerte - die für Systemvergleiche unter vereinbarten Randbedingungen ihre volle Aussagekraft haben - bei der Realisierung im allgemeinen überschritten werden, da Zusatzkosten wie Entschädigungsleistungen, Umweltschutzmaßnahmen zur verzögerungsfreien Durchsetzung und ähnlichem im Planungsstadium nicht voll berücksichtigt werden können.

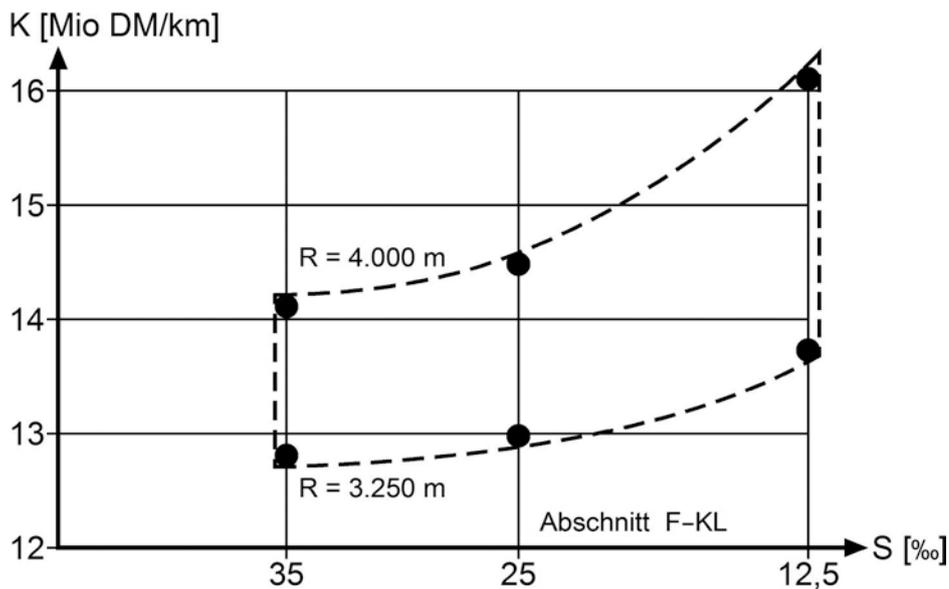
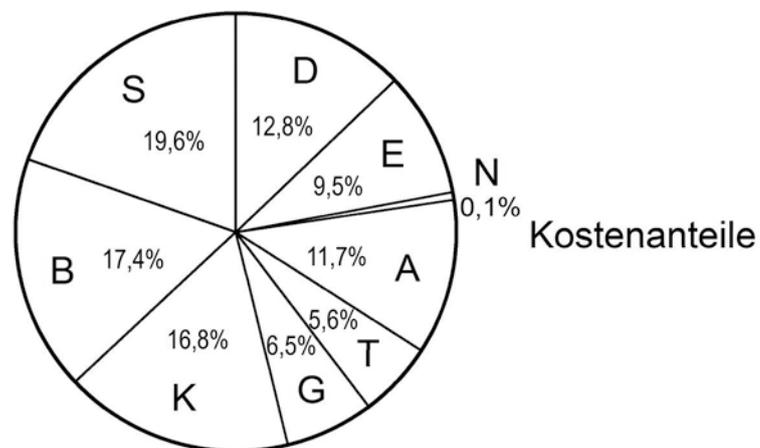
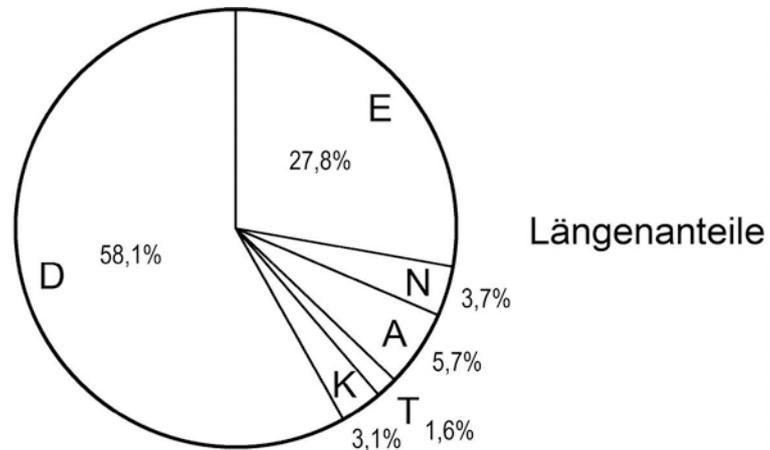


Bild 4:

Kostenwirksamkeit der Trassierungsparameter

Die Grenzwerte für die Bogenhalbmesser (3.250 m) beziehungsweise die Längsneigung (32,5 ... 35 %) werden nur auf etwa 5 % beziehungsweise 7 % der Strecke in Anspruch genommen. Die wenigen Streckenabschnitte mit der vollen Längsneigung von 35 % überschreiten dabei an keiner Stelle eine Länge von 5 km. Der größte zu überwindende Höhenunterschied beträgt somit 175 m. Dem steht bei 300 km/h Fahrgeschwindigkeit eine äquivalente Energie von 350 m geodätischem Höhenunterschied zur Verfügung (Umwandlungsverluste vernachlässigt), so daß eine im Hinblick auf die Streckenneigung etwa erforderliche

Überdimensionierung der Traktionsausrüstung unterbleiben kann sowie der Zusatzenergiebedarf für das Befahren der Steigungen zum erheblichen Teil aus der kinetischen Energie gedeckt wird. Die Fahrgeschwindigkeit sinkt bei dieser Betriebsweise um nur etwa 20 ... 25 km/h, hat also keinen gravierenden Einfluß auf die Gesamtreisezeit.



- |                   |                         |
|-------------------|-------------------------|
| D = Damm          | G = Grunderwerb         |
| E = Einschnitt    | K = Kreuzungsbauwerke   |
| N = Ebenerdig     | B = Betriebsleittechnik |
| A = Aufständigung | S = Energieversorgung   |
| T = Tunnel        |                         |

Bild 5:  
Aufteilung der Fahrweginvestition

Damit wird nochmals bestätigt, daß für R/S-Schnellbahnen der hier vorgestellten Konzeption der Energieverbrauch bei der Wahl der Trassenparameter und

der Trasse keinen gravierenden Einfluß ausübt.

Abschließend sei noch ein Überblick über die relative Investitions-Aufteilung der Fahrwegelemente einschließlich Ausrüstung für eine R/S-Schnellbahn im untersuchten Planungsraum gegeben (Bild 5).

## 4.2 Fahrzeug

Für die Bedienung des Fahrgastaufkommens hat sich ein symmetrischer Triebkopfzug mit 320 Sitzplätzen als zweckmäßig erwiesen. Als Traktionstechnik wird die Drehstromantriebstechnik mit Asynchronfahrmotoren und Nutzbremse vorgesehen. Die Zuführung der Traktionsenergie - 25 kV, 50 Hz - übernimmt eine Leichtbauoberleitung, die ein optimales Zusammenwirken von Überleitung und Stromabnehmer gewährleistet. Die Lichtbogendauer kann dabei auf weniger als 80 ms/km begrenzt werden.

### 4.2.1 Aerodynamik

Die hohe Fahrgeschwindigkeit von 300 km/h erfordert eine sorgfältige Ausbildung der Fahrzeugform beziehungsweise ihrer Oberfläche, um den Fahrwiderstand (das heißt auch den Energieverbrauch), die Bugwellen und Nachlaufströmung und die damit verbundenen Druckstöße bei Zugbegegnung, Vorbeifahrt an festen Hindernissen und Tunnelfahrt sowie die aeroakustische Störwirkung klein zu halten. Gerade der letztgenannte Effekt wird bei höheren Fahrgeschwindigkeiten bedeutsam; er fordert für das R/S-Fahrzeug, daß die ersten 7 m ab Bugspitze möglichst frei von störenden Aufbauten zu halten sind.

Von großer Bedeutung ist weiterhin der Unterflurbereich, von dem bei klassischen Zügen etwa 40 % des Luftwiderstandes ausgehen. Vollständige Unterbodenverkleidung ("Bodenwanne") und (Teil-) Verkleidungen am Laufwerk sind daher wichtige Forderungen für Schnellbahnfahrzeuge.

Die vorgenannten Einflüsse wurden in ihrer Auswirkung in theoretischen Untersuchungen, Wind- und Wasserkanalmessungen definiert und in eine optimale Form umgesetzt, die in Bild 6 dargestellt ist. Auf die niedrig angeordnete stumpfe Bugspitze wird besonders hingewiesen, die den größten Teil der anströmenden Luft nach oben ablenkt, während seitliche Ablenkung bei Zugbegegnung zu erhöhten Druckspitzen zwischen den sich begegnenden Fahrzeugen führen kann.

Die Fahrzeuge selbst sind druckdicht ausgeführt; der Innendruck bleibt damit auch bei äußeren Druckschwankungen weitgehend konstant. Die Fenster sind für

eine größte Belastung von  $4.000 \text{ N/m}^2$  dimensioniert.

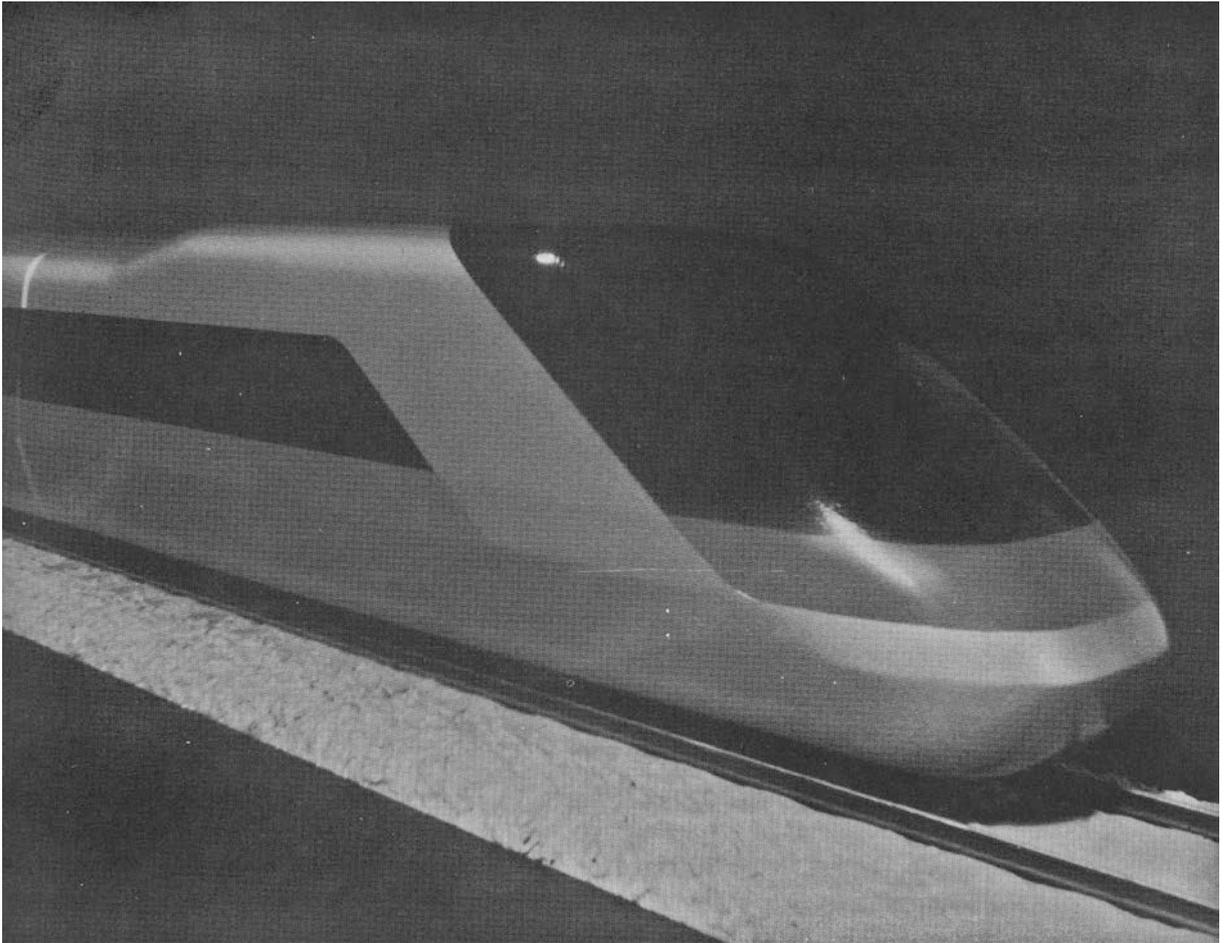


Bild 6:

Modellfoto des Triebkopfes eines R/S-Schnellfahrzeuges

#### 4.2.2 Fahrzeugquerschnitt

Fahrzeuge des grenzüberschreitenden Verkehrs sind heute im Fahrzeugprofil so ausgebildet, daß ein freizügiger Einsatz bei allen Bahnverwaltungen möglich ist. Für R/S-Schnellbahnsysteme mit neuer eigener Trasse kann die Frage des Fahrzeugquerschnitts erneut diskutiert werden, wenn andere Querschnittsformen Vorteile versprechen.

Für die Untersuchungen zur Abschätzung der möglichen Gewichts- und Energieverbrauchssenkung bei einem verbreiterten Fahrzeugquerschnitt wurde für einen Einheitszug mit den Daten gemäß Bild 7 die Fahrzeugbreite variiert und die relativen Gewichts-, Längen- und Energieverbrauchseinsparungen errechnet. Dabei ist für die konventionelle Fahrzeugbreite die Dreieranordnung gewählt;

Lösungen mit vier Plätzen bieten langfristig nicht den vom Fahrgast erwarteten Komfort einer modernen Schnellbahn (Auch dies beweist schon heute der TGV: die bisher in der Presse bekannt gewordenen Negativstimmen zum TGV kritisieren ausschließlich den zu niedrigen Breitenkomfort der Vierplatzanordnung bei konventioneller Wagenbreite von 2,8 m).

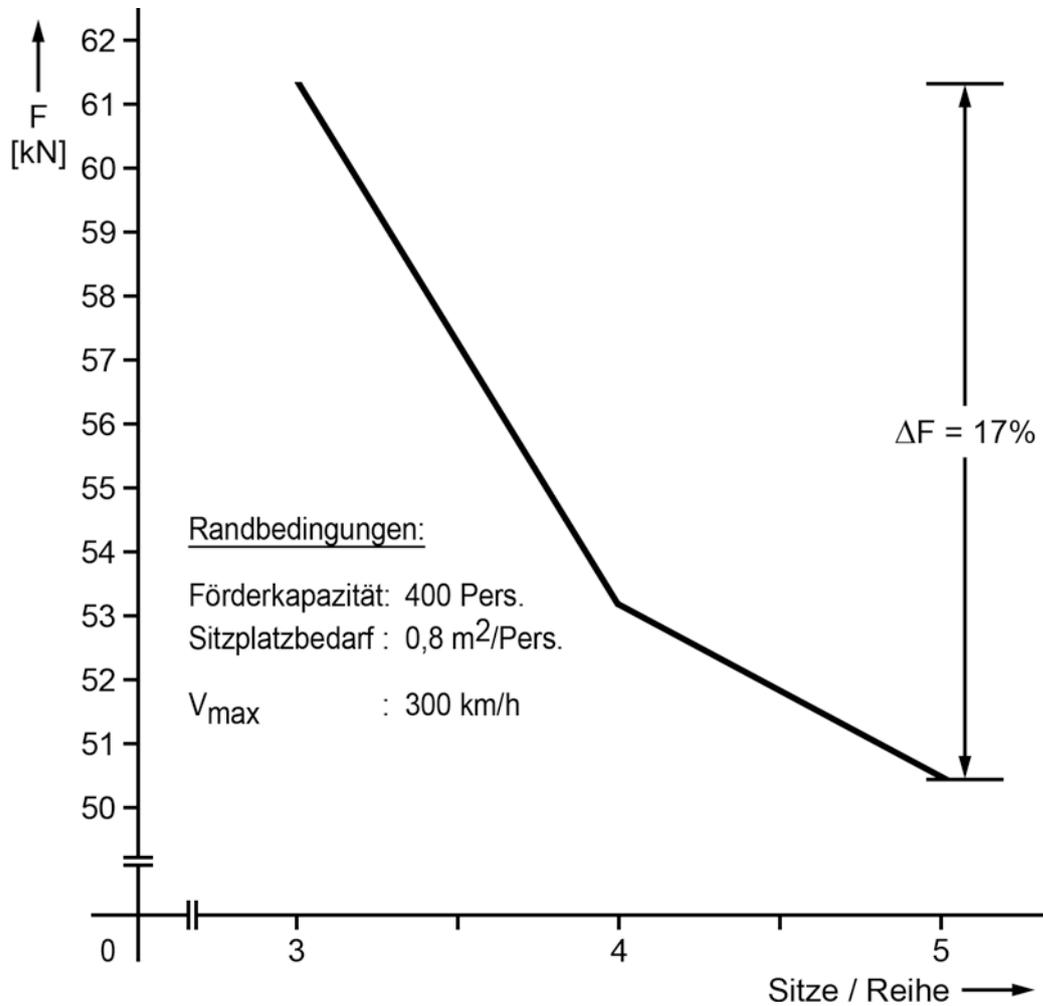


Bild 7:

Fahrwiderstand als Funktion der Sitzplatzzahl je Querreihe

Es ergeben sich folgende Verminderungen von Länge, Gewicht und Fahrwiderstand (Bild 7) gegenüber der Ausgangsbreite von 2,8 m:

Äußere Wagenbreite	3,2 m	3,7 m
Länge	- 25 %	- 37,5 %
Gewicht	- 22 %	- 33 %
Fahrwiderstand (≈ Energieverbrauch)	-13 %	- 17 %

Im Hinblick auf eine gewisse Minimalkompatibilität mit bestehenden Systemen (Spurweite, Nutzung der Knotenpunktinfrastruktur) erscheint die Realisierung eines 3,2 m breiten Fahrzeuges möglich.

Das Gesamtgewicht des Fahrzeuges erreicht bei 320 Sitzplätzen etwa 288 t, so daß sich ein Nutzlastfaktor von gut 11 % ergibt. Dabei bleiben die im Schienenfahrzeugbau üblichen hohen Sicherheitsstandards gewahrt; so ist das Fahrzeug beispielsweise für eine Längskraft von 1.500 kN in Untergurtebene dimensioniert.

Zur Wahrung des Fastgastkomforts sind die folgenden Beschleunigungsgrenzwerte im Fahrzeug auch bei außergewöhnlichen Betriebssituationen einzuhalten:

Längsrichtung	1,5 m/s <sup>2</sup>
Querrichtung	0,85 m/s <sup>2</sup>
Vertikalrichtung	0,5 m/s <sup>2</sup>

Der Ruck bleibt in allen Richtungen auf 0,5 m/s<sup>3</sup> begrenzt.

#### 4.3 Wirtschaftliche Aspekte der Rad/Schiene-Schnellbahn

Gegen das "Schnellfahren" auf der Schiene wird häufig der stark erhöhte Energiebedarf ins Feld geführt, der die beiden Aspekte des Ressourcenverbrauchs und des Preises zusammenfaßt. Dabei wird häufig übersehen, daß die bereits existierenden konkurrierenden Verkehrsträger einen - je nach Auslastung - drei- bis sechsfach höheren spezifischen Energieverbrauch als die Bahn aufweisen. Würde die durch kürzere Reisezeiten attraktivere "schnelle" Bahn zum Beispiel erhebliche Verkehrsanteile von anderen Verkehrsträgern abziehen, käme es insgesamt sogar zu einem volkswirtschaftlichen Energiespareffekt, da auch die schnellere Bahn den drei- bis sechsfachen Vorsprung von heute bei weitem nicht aufzehrt. Darüber hinaus ist der elektrische Bahnbetrieb unabhängig vom importierten Rohöl, sondern stützt sich weitgehend auf heimische Primärenergie, so daß die Leistungsbilanz von Ölimporten spürbar entlastet werden könnte.

Aus betriebswirtschaftlicher Sicht ist zunächst die Abhängigkeit des Fahrwiderstandes und damit des Energieverbrauchs maßgeblich vom Quadrat der Fahrgeschwindigkeit (Luftwiderstand!) festzustellen. Eine Steigerung der Geschwindigkeit von 200 auf 300 km/h würde zum Beispiel etwas mehr als die Verdoppelung des Energiebedarfs nach sich ziehen.

Bei der Ermittlung der absoluten Verbrauchswerte eines weiterentwickelten schnellen R/S-Zuges sind jedoch folgende Aspekte zu berücksichtigen, die sich in einer Senkung des Energiebedarfs auswirken:

- konsequente Anwendung der Forschungsergebnisse der Aerodynamik mit Übergang vom lokbespannten Zug zum Triebkopfbzug
- Einsatz der Nutzbremse
- Optimierung der Fahrzeugquerschnitte und -längen in Relation zur Zugkapazität.

Die aerodynamischen Bedingungen werden verbessert durch

- glatte Oberflächen mit bündigen Fenstern und Übergangseinrichtungen, optimalere Bug- und Heckformen, Entfall der Lücken zwischen Lok und Wagenzug, Minimierung der Dachaufbauten (Zahl und Größe)
- vollverkleidete Fahrzeugunterseite; teilverkleidete Laufwerke (circa 30 ... 40 % des Zugwiderstandes entstehen im Unterflurbereich)
- neuartige Stromabnehmer mit niedriger Bauhöhe durch Einsatz von Faserverbundwerkstoffen (Bauhöhe im abgesenkten Zustand circa 250 mm gegenüber heute 500 mm).

Durch die beschriebenen Maßnahmen, deren Wirksamkeit zunächst in Windkanaluntersuchungen bestätigt wurde, kann der Energiemehrbedarf des Triebkopfbzuges bei 300 km/h gegenüber dem Lok-Zug bei 200 km/h auf 56 % begrenzt werden.

Durch Nutzbremmung kann eine weitere Energieeinsparung für das Betriebssystem "Schnellbahn" in der Größenordnung von 10 % erreicht werden. Die Einsparungsmöglichkeit durch ein 3,2 m breites Fahrzeug mit entsprechend geringer Länge wurde bereits in Abschnitt 4.2.2 ausgeführt.

Insgesamt ergibt sich somit gegenüber dem Bezugspunkt (klassischer Lokzug mit 200 km/h) für den optimierten Triebkopfbzug bei 300 km/h ein Energiemehrbedarf von knapp 30 %. Anders ausgedrückt: mit dem heutigen Energiebedarf des Lokzuges kann der Triebkopfbzug mit etwa 260 km/h betrieben werden oder - bei Unterstellung eines Energiekostenanteils an der Zugförderung von 10 % - es müßte ein Mehrerlös von 3 % erreicht werden, um die höheren Energiekosten zu decken.

Derartige Erwartungen an die Zuwachsraten attraktiverer Reisezüge sind nicht unrealistisch, wie das japanische und englische Beispiel in der Vergangenheit und nunmehr auch das französische Beispiel zeigen.

# TRASSIERUNGSELEMENTE FÜR SCHNELLBAHNEN

von P. Mölzer und R. Stöckl

---

## 1. Sicherheits- und Komfortbedingungen

Von neuen Schnellverkehrssystemen werden neben Wirtschaftlichkeit und Umweltfreundlichkeit vor allem ein Höchstmaß an Sicherheit und Komfort gefordert.

Naturgemäß bieten schienengebundene Verkehrssysteme eine vergleichsweise außerordentlich hohe Sicherheit. Es ergeben sich zwar, begründet durch die spezifischen Eigenschaften des Elektromagnetischen Schnellbahnsystems (EMS) bzw. des Rad/Schiene Schnellbahnsystems (R/S), Unterschiede hinsichtlich der Kipp- und Entgleisungssicherheit, die Trassierungsparameter werden dadurch jedoch nicht beeinflusst, da die Komfortkriterien weitaus strenger sind als die Sicherheitsbedingungen.

Die Gewährleistung eines guten Fahrkomforts ist durch die Begrenzung der relevanten Beschleunigungen und deren stetigen Verlauf sowie durch die Festlegung der Überhöhung gegeben.

Die dem derzeitigen Stand der Technik entsprechenden wichtigsten Grenzwerte sind für beide Systeme nachfolgend zusammengestellt:

	<u>EMS</u>	<u>R/S</u>
$v$	400	300
$a_1$	1,0	0,85
$b_V$ - Kuppe	0,5	0,5
$b_V$ - Wanne	1,0	0,8
$\alpha$	12,0	7,5
$\ddot{u}$	0,31	0,20

Es bedeuten im Sinne maximal zulässiger Größen

$v$	=	Geschwindigkeit [km/h]
$a_1$	=	freie laterale Beschleunigung [ $m/s^2$ ]
$b_V$	=	Vertikalbeschleunigung [ $m/s^2$ ]
$\alpha$	=	Fahrwegquerneigung [ $^\circ$ ]
$\ddot{u}$	=	Fahrwegüberhöhung [m]

## 2. Trassierungselemente im Grundriß

Die geometrische Festlegung der Linienführung im Grundriß erfolgt durch die Elemente Kreis, Gerade und Übergangsbogen.

Bei R/S-Systemen ist hierbei die Einhaltung einer Mindestelementenlänge notwendig, die eine Mindestfahrzeit von 2 Sekunden bei der jeweiligen Auslegungsgeschwindigkeit sicherstellt. Bei EMS-Systemen ist keine Mindestlänge erforderlich.

### 2.1 Horizontalbogen

Aus dem Ansatz für die freie laterale Beschleunigung im überhöhten Bogen

$$a_1 = \frac{v^2 \cos \alpha}{R} - g \sin \alpha$$

ergibt sich der minimale Horizontalbogenhalbmesser zu

$$R_{H\min} = \frac{v^2 \cos \alpha}{a_L + g \sin \alpha}$$

mit

- $v$  = Entwurfsgeschwindigkeit [m/s]
- $g$  = Erdbeschleunigung [m/s<sup>2</sup>]
- $\alpha$  = Fahrwegquerneigung [°].

Mit den Maximalwerten aus Abschnitt 1 für die Lateralbeschleunigung, die Fahrwegquerneigung und die Geschwindigkeit errechnen sich die minimalen Bogenhalbmesser

	<u>EMS</u>	<u>R/S</u>
$R_{H\min}$ [m]	4000	3250

Die Mindestradien können ohne Einschränkung angewendet werden. In Bahnhofsbereichen gilt für beide Systeme ein Mindestradius von  $R = 500$  m.

### 2.2 Übergangsbogen

Die hohen Geschwindigkeiten erfordern Übergangsbögen hoher Qualität. Neben einer stetigen Zunahme der Krümmung sollte insbesondere ein stetiger Verlauf der Seitenbeschleunigungsänderung (Ruck) gewährleistet sein.

Diese Forderungen erfüllt nur der sinusförmige Übergangsbogen, wobei für beide Systeme folgender Ansatz für die Krümmung zur Anwendung kommt:

$$\frac{1}{R(s)} = \frac{1}{2R} \left[ \frac{2s}{L} - \frac{1}{\pi} \sin \frac{2\pi s}{L} \right]$$

mit  $L$  = Übergangsbogenlänge  
 $R$  = Bogenhalbmesser

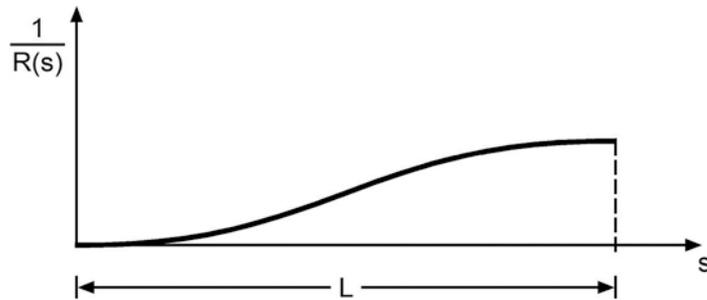


Abb. 1: Krümmungsverlauf des sinusförmigen Übergangsbogens

Für den Ruckverlauf bei konstanter Geschwindigkeit ergibt sich:

$$\dot{a}_1(s) = v \frac{a_1}{L} \left( 1 - \cos \frac{2\pi s}{L} \right)$$

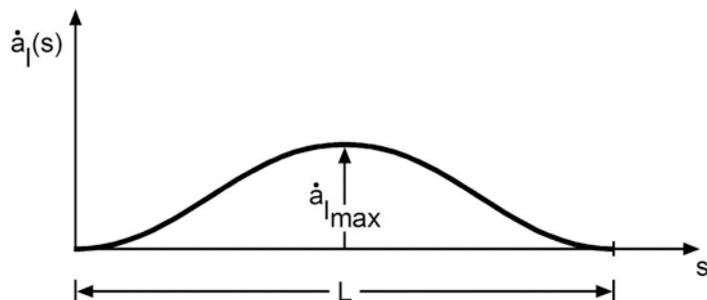


Abb. 2: Ruckverlauf des sinusförmigen Übergangsbogens

Der maximale Ruck tritt hierbei in der Übergangsbogenmitte auf. Sein Wert wird bei beiden Systemen auf  $\dot{a}_{1\max} = 0,5 \text{ m/s}^3$  begrenzt. Die Länge des Übergangsbogens wird nach der Formel

$$L \geq 2v \frac{a_L}{\dot{a}_{1\max}}$$

bestimmt, wobei für  $a_1$  der größte Wert für die freie Lateralbeschleunigung im Bogen einzusetzen ist. Der errechnete Wert für die Übergangsbogenlänge ist mit der notwendigen Rampenlänge (nach 2.4) zu vergleichen, der größere der beiden Werte bestimmt die Länge sowohl des Übergangsbogens als auch der Überhöhungsrampe.

Die Krümmungsverläufe bei Übergängen zwischen Kreisen werden ebenfalls sinusförmig gestaltet.

Im Falle gleichsinnig gekrümmter Kreise (Korbbogen) folgt die Krümmung des Übergangsbogens der Formel

$$\frac{1}{R(s)} = \frac{1}{R_1} + \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1}\right) \left(\frac{s}{L} - \frac{1}{2\pi} \sin \frac{2\pi s}{L}\right)$$

$$(R_1 > R_2) .$$

Für den Verlauf bei gegensinnig gekrümmten Kreisen (S-Schlag) ergibt sich nach den Entwicklungen von WEIGEND [3]

$$\frac{1}{R(s)} = \frac{1}{R} \left(1 - \frac{s}{l} + \frac{1}{\pi} \sin \frac{\pi s}{l}\right)$$

$l$  = Astlänge

$L$  =  $l_1 + l_2$

### 2.3 Überhöhung

Für beide Systeme gilt das Trassierungsprinzip der ausgleichenden Überhöhung, wonach die Überhöhung im Bogen in Abhängigkeit von der freien Lateralbeschleunigung bestimmt wird.

Die Überhöhung in Bögen  $R \geq R_{\min}$  bleibt daher konstant ( $\ddot{u} = \ddot{u}_{\max}$ ) bis zum völligen Abbau der freien lateralen Fliehbeschleunigung. Der Radius mit der ausgleichenden Überhöhung für  $\ddot{u} = \ddot{u}_{\max}$  in Abhängigkeit von der Entwurfsgel-

schwindigkeit  $v_T$  wird  $R_0$  genannt. Für Bögen  $R > R_0$  wird die ausgleichende Überhöhung eingebaut.

Bei EMS wird die Überhöhung erzeugt, indem die bogeninnere Schiene abgesenkt und die bogenäußere angehoben wird; im Gegensatz dazu wird bei R/S-Systemen lediglich die Außenschiene angehoben.

## 2.4 Überhöhungsrampe

Die Überhöhung in der Rampe nimmt in derselben sinusförmigen Weise zu wie die Krümmung

$$\ddot{u}(s) = \frac{\ddot{u}}{2} \left( \frac{2s}{L} - \frac{1}{\pi} \sin \frac{2\pi s}{L} \right) .$$

Daraus resultieren stetige Verläufe der Überhöhungszunahme bzw. der Hubbeschleunigung.

Die Überhöhungszunahme folgt der Beziehung

$$\ddot{u}'(s) = \frac{\ddot{u}}{L} \left( 1 - \cos \frac{2\pi s}{L} \right) .$$

Die Mindestrampenlänge errechnet sich nach der Formel

$$L \geq 2 \frac{\ddot{u}}{\ddot{u}'_{\max}} .$$

Die Überhöhungen in den Rampen bei Korbbogen und S-Schlag verlaufen analog zu den Krümmungen.

## 3. Trassierungselemente im Aufriß

Stärker als die Linienführung im Grundriß ist die Gradientenführung im Aufriß geprägt von den spezifischen Eigenschaften der jeweiligen Technologie.

Beispielsweise stehen die Maximalwerte für die Längsneigung und die Steigung in direktem Zusammenhang mit der Antriebs- bzw. Bremsleistung eines Systems.

Auch die Ausrundung der Neigungswechsel ist nicht allein von den nach Komfortkriterien festgelegten Werten der Vertikalbeschleunigung zu bestimmen, sondern muß auch aus fahrzeugtechnischer Sicht betrachtet werden. Dieser Zu-

sammenhang führt beim R/S-System zu einer Erhöhung der Mindestausrundungshalbmesser gegenüber den Werten, die nach dem Komfort gefordert werden.

Die Gegenüberstellung der Trassierungselemente beider Systeme für die Gradientenführung im Aufriß ergibt somit folgendes Bild

	<u>EMS</u>	<u>R/S</u>
$s_{max}$	50	35
$R_K$	25000	27000
$R_W$	12500	17000

mit

- $s_{max}$  = maximal zulässige Tangentenneigung (-steigung) [%]
- $R_K$  = minimal zulässiger Ausrundungshalbmesser Kuppe [m]
- $R_W$  = minimal zulässiger Ausrundungshalbmesser Wanne [m].

Hinsichtlich der Überlagerung von Horizontal- und Vertikalbögen bestehen bei beiden Systemen keine Einschränkungen.

#### 4. Querschnittsgestaltung

##### 4.1 Regelquerschnitte für EMS-Strecken

Die diversen Fahrwegformen eines EMS-Systems wurden bereits in [2] ausführlich beschrieben. Als EMS-typisches Fahrwegelement gilt die Aufständigung, die in der Trassierungsstudie mit 70 % Längenanteil weitaus am häufigsten vorkam und hier nochmals kurz aufgezeigt wird.

Der aufgeständerte Fahrweg ermöglicht Kreuzungen mit bereits vorhandenen Verkehrswegen, ohne daß deren Gradientenführung geändert werden muß. Dadurch werden unerwünschte Eingriffe in vorhandene Strukturen vermieden und dem Trassierungsingenieur die detaillierte Untersuchung der verschiedenen Kreuzungsprobleme erspart.

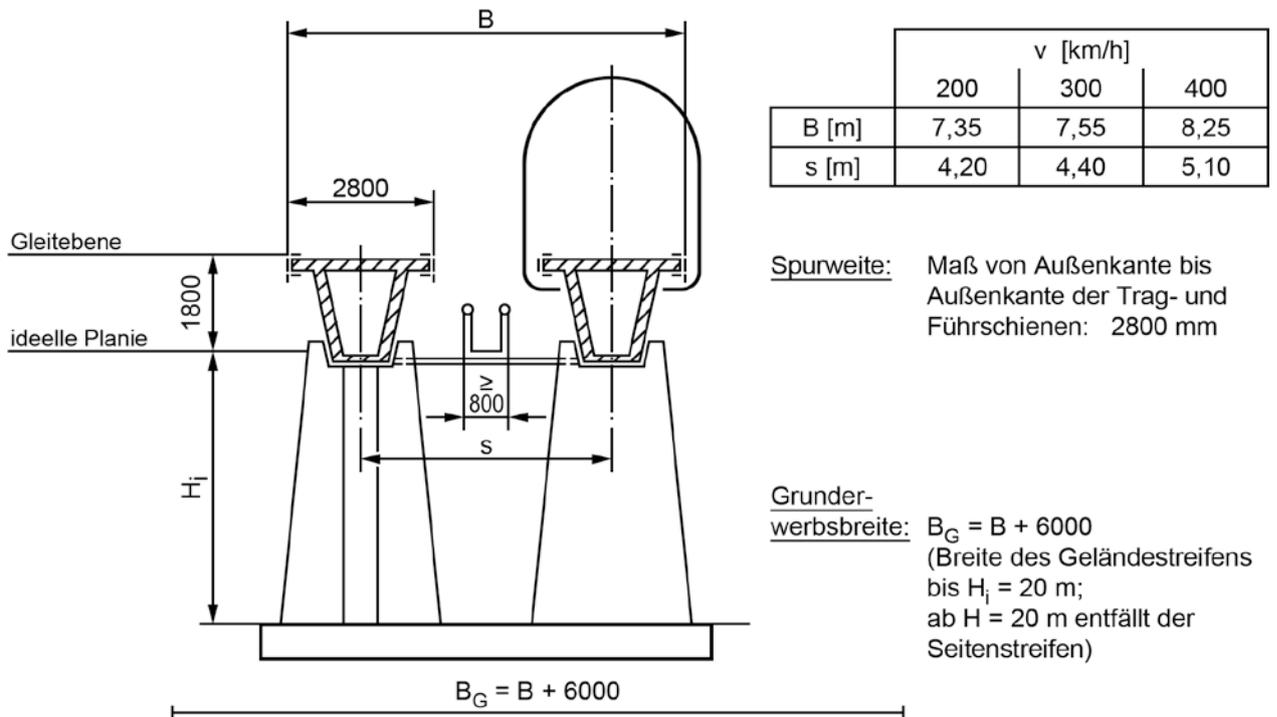


Abb. 3: Aufgeständerter EMS-Fahrweg

#### 4.2 Regelquerschnitte für R/S-Strecken

Die bestimmenden Fahrwegelemente einer R/S-Trasse sind der Damm und der Einschnitt, Aufständerungen werden nur in Ausnahmefällen ab einer Gradientenhöhe von 16 m realisiert. Aus diesem Grunde hat der Entwurfsingenieur bei einer R/S-Trassierung dem Problem des Massenausgleichs besondere Aufmerksamkeit zu schenken.

Die Regelquerschnitte Damm und Einschnitt sind nachfolgend skizziert:

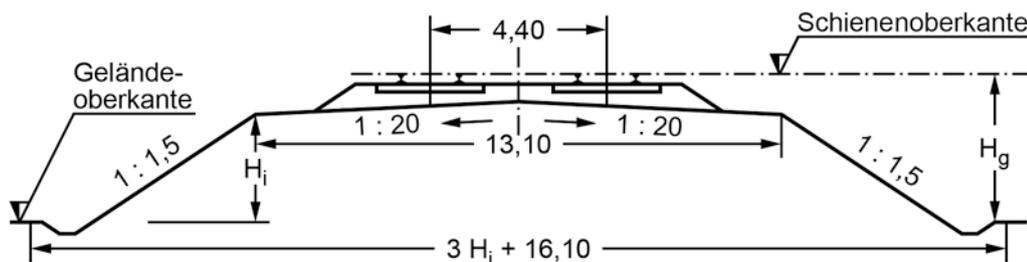


Abb. 4a: Fahrwegelement: Damm

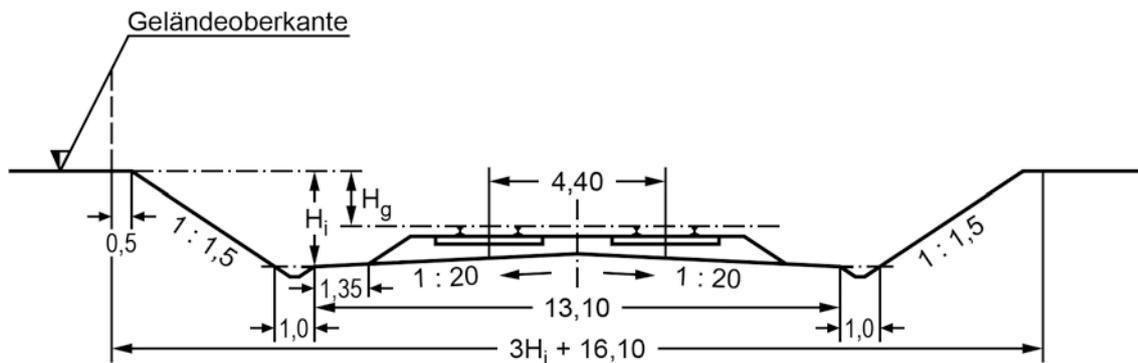


Abb. 4b: Fahrwegelement: Einschnitt

Spurweite: Die Normalspurweite beträgt 1435 mm.

Grunderwerbsbreite:

- Damm  $B_G = 16,10 + 3H_i$  [m]

- Einschnitt  $B_G = 16,10 + 3H_i$  [m]

#### Literatur

- 1 TRANSRAPID - EMS, Rahmenspezifikation, Trassierungsangaben für eine EMS-Schnellbahn Frankfurt-Paris, 23.05.1979
- 2 ZUREK, R., und MÖLZER, P., Trassierungselemente für Schnellbahnen mit elektromagnetischer Schwebetechnik, ETR, Heft 4 (1977), S. 197 - 206
- 3 WEIGEND, M., Übergangsbogen mit sinusförmiger Krümmungslinie bei Gegenbogen (Gleisschere), Eisenbahningenieur 26 (1975)
- 4 DB, BZA München, Trassierungsgrundlagen für eine R/S-Schnellbahn Paris-Frankfurt, 31.08.1979 (unveröffentlicht)
- 5 TRANSRAPID - EMS / KARNER, EMS - Planungsstudie Frankfurt-Paris München 1980
- 6 DB, BZA München / KARNER, R/S - Planungsstudie Frankfurt-Paris München 1981

## EINGANG RAUMPLANERISCHER UND ÖKOLOGISCHER DATEN IN DEN TRASSIERUNGSPROZESS

Silvia Kneißl Rabossi

---

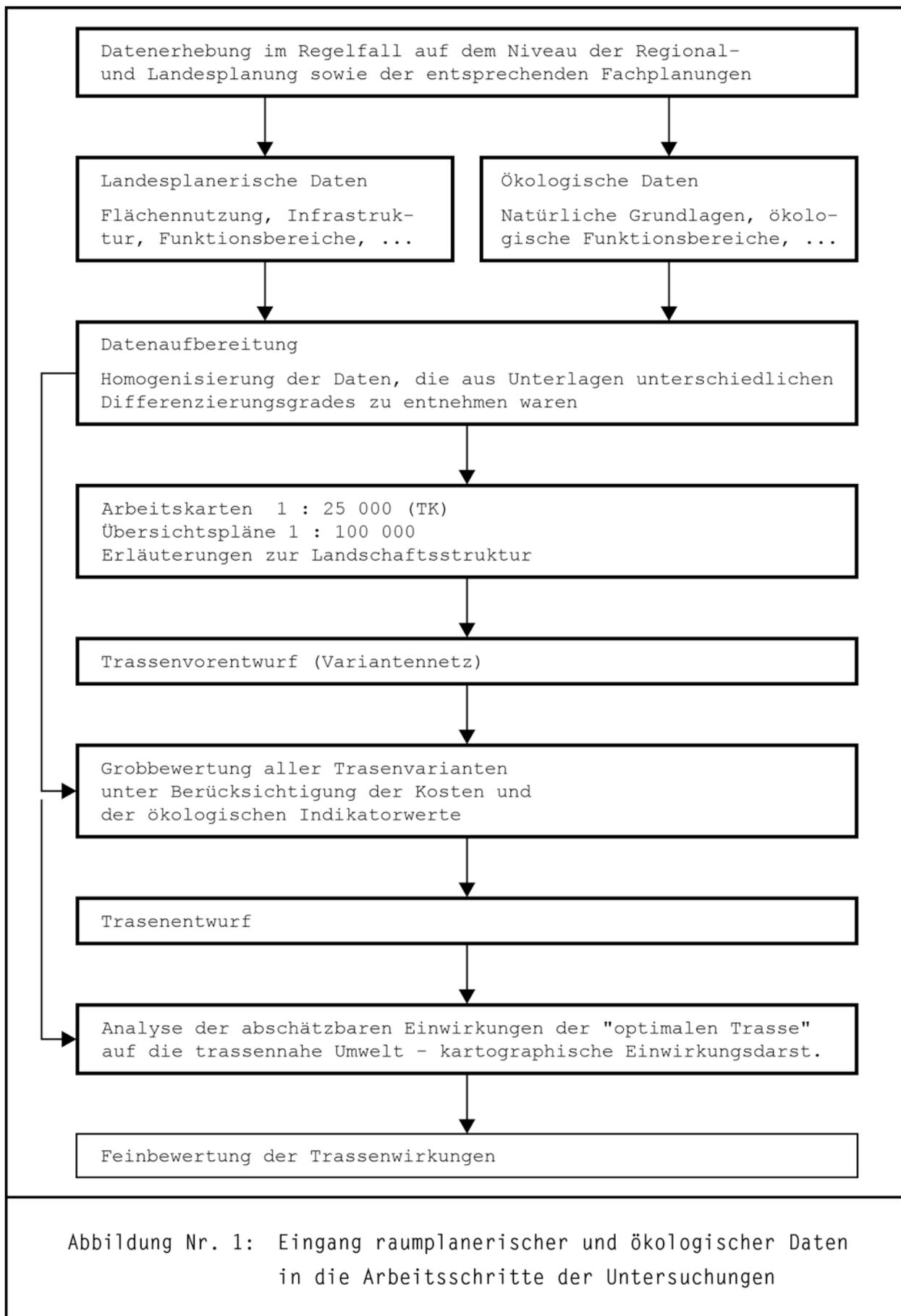
Mit fortschreitender Schärfung des Umweltbewußtseins erfahren heute, auch bei vorwiegend ingenieurtechnischen Planungen, die raumplanerischen und ökologischen Belange zunehmend stärkere Beachtung. Die Verfasserin hatte Gelegenheit, im Rahmen der Bearbeitung von zwei Planungsstudien über Schnellbahnsysteme weitere Erfahrungen über den Eingang umweltrelevanter Daten in den Planungsprozeß zu sammeln. In verallgemeinerter Form sollen hier die Aufbereitung und die Verarbeitung diesbezüglicher Daten dargelegt werden.

### 1. Erhebung und Aufbereitung raumplanerischer und ökologischer Daten

Da es sich bei den Untersuchungen um Planungsstudien und somit nicht um konkrete, auf reale Investitionen hin orientierte Planungsaufgaben handelte, erschien die Beschränkung der Datenerhebung auf das Niveau der Regional- bzw. Landesplanung sowie auf das Niveau der diesen Planungsebenen entsprechenden Fachplanungen als angezeigt.

Im Falle einer konkreten Planungsaufgabe wäre eine Erweiterung und Differenzierung des Dateneingangs bis auf die lokale Ebene unumgänglich, wobei die bei den Planungsstudien angewandte Methode beibehalten werden könnte, vorausgesetzt, daß weiterführende Differenzierungen vorgenommen würden, was sich insbesondere auf die Gewichtsverteilung bei der Einschätzung der Wertigkeit regionaler und lokaler Daten zu beziehen hätte. So müßten, um ein Beispiel zu nennen, etwa die Beurteilungen von Erholungsgebieten in Abhängigkeit von ihrer Häufigkeit und ihrer regionalen Verteilung erfolgen.

Vor der Darstellung der in die Untersuchungen eingegangenen Daten und ihrer Aufbereitung im Hinblick auf ihre Verwendung im Planungsprozeß soll anhand der Abbildung Nr. 1 der Eingang der raumplanerischen und ökologischen Daten in die einzelnen Arbeitsschritte der Studien veranschaulicht



werden.

Die verwendeten raumplanerischen Daten bezogen sich dabei auf die wesentlichen Flächennutzungen, Infrastruktureinrichtungen und Funktionsbereiche, die ökologischen Daten auf die natürlichen Grundlagen sowie ausgewiesene ökologische Funktionsbereiche. Bereits bestehende und geplante Nutzungen wurden jeweils zu einer Nutzungskategorie zusammengefaßt und folglich in gleicher Weise im Rahmen der Untersuchungen behandelt.

Zur Datenerhebung für die Flächennutzungen dienten vorrangig die regionalen Raumordnungspläne bzw. deren Entwürfe, Landesentwicklungspläne bzw. -programme sowie Fachpläne wie z.B. Straßenbedarfs- und -ausbaupläne. Zur Differenzierung der Daten im Bereich des Natur- und Landschaftsschutzes wurden, soweit vorhanden, Landschaftsrahmenpläne und landschaftsökologische Gutachten mit einbezogen. Die Datenerhebung wurde durch Ortsbesichtigungen und zahlreiche persönliche Auskünfte bei den zuständigen Planungsbehörden ergänzt.

Da sich das zur Verfügung stehende Datenmaterial im Differenzierungsgrad und in der Schwerpunktsetzung für die einzelnen Bereiche des Planungsraums, der vom Trassierer in Form eines Trassierungskorridors vorgegeben war, sehr unterschiedlich darstellte, war es zunächst notwendig, die Daten im Hinblick auf den Planungszweck auf einer durchgängigen Aggregationsebene zu homogenisieren. Dabei wurde einerseits auf die Erhaltung eines möglichst breiten Datenspektrums Wert gelegt und andererseits auf die Bereitstellung der für das zur Trassenauswahl im Rahmen des vorgesehenen Grobbewertungsverfahrens maßgeblichen Indikatorwerte geachtet. Um differenziertere Daten nicht auszusieben, wurden diese jeweils in die höhere durchgängige Aggregationsebene integriert.

Als Arbeitsgrundlage für den Trassenvorentwurf wurden dem Trassierer zunächst zur Übersicht die raumplanerischen und ökologischen Grunddaten in Karten des Maßstabs 1 : 100 000 zur Verfügung gestellt. Die Kartierung des homogenisierten Gesamtdatenmaterials erfolgte dann direkt in den Arbeitskarten des Trassierers, den topographischen Karten im Maßstab 1 : 25 000, wobei es sich im Wesentlichen um die folgenden Datengruppen handelte:

- forstwirtschaftliche Flächen  
mit Angabe der Waldfunktionen;
- landwirtschaftliche Flächen,  
Flächen mit Sonderkulturen (z.B. Obst- und Weinbau);
- aus dem Bereich des Siedlungswesens  
die Wohnsiedlungsflächen, die gewerblichen Siedlungsflächen, Abbau-  
und Rekultivierungsflächen sowie Sonderflächen wie Flughäfen und  
Militärgebiete, soweit Daten für letztere Kategorien zugänglich waren;
- aus dem Bereich der Infrastruktureinrichtungen  
Bundes- und Staatsstraßen, Kanäle, Öl- und Gasleitungen sowie  
großflächige Lagerstätten und Funkstationen;
- aus dem Bereich des Natur- und Landschaftsschutzes  
die gesetzlich festgelegten Gebiete des Natur- und Landschaftsschutzes  
(Naturschutzgebiete, Landschaftsschutzgebiete, Naturparke, Naturdenk-  
male, geschützte Landschaftsteile);  
Wasserschutzgebiete sowie sonstige schutzwürdige Bereiche wie z.B.  
landwirtschaftliche Vorrangflächen oder Flächen mit besonderer Schutz-  
funktion wie z.B. Immissionsschutzwälder, Erholungswälder;  
naturnahe Bereiche, die in der Landschaft Gliederungs- und Ausgleichs-  
funktionen wahrnehmen, soweit sie nicht bereits rechtlich sichergestellt  
sind wie z.B. Gewässerränder, Feuchtwiesen, Felsformationen u.ä.

Gewisse Schwierigkeiten ergaben sich bei der Aufbereitung der Daten aus der Tatsache, daß in den einzelnen regionalen Raumordnungsplänen und den sonstigen auf diesem Planungsniveau zur Verfügung stehenden Datenquellen z.T. sehr unterschiedliche Definitionen insbesondere für die nicht rechtlich festgelegten, jedoch schutzwürdigen Bereiche handelte. In den Fällen, in denen aufgrund zu stark ausgeprägter Heterogenität die Daten einer gewählten Kategorie nicht zugeordnet werden konnten, blieben sie in der Datenkartierung unberücksichtigt. Da diese Daten jedoch einen Beitrag zur Erreichung des Planungszieles, nämlich die Beeinträchtigungen bestehender Raumfunktionen durch das geplante Schnellbahnsystem möglichst gering zu halten, leisten können, gingen sie in jedem Fall in die Erläuterungen der einzelnen Landschaftsteile des Trassenkorridors ein. Diese Erläuterungen, die dem Trassierer als weitere Planungsgrundlage zur Verfügung gestellt wurden, sollen im folgenden Abschnitt näher vorgestellt werden. Dem vorangestellt sei noch das kartierte Grunddatenmaterial in den Abbildungen 2 und 3.

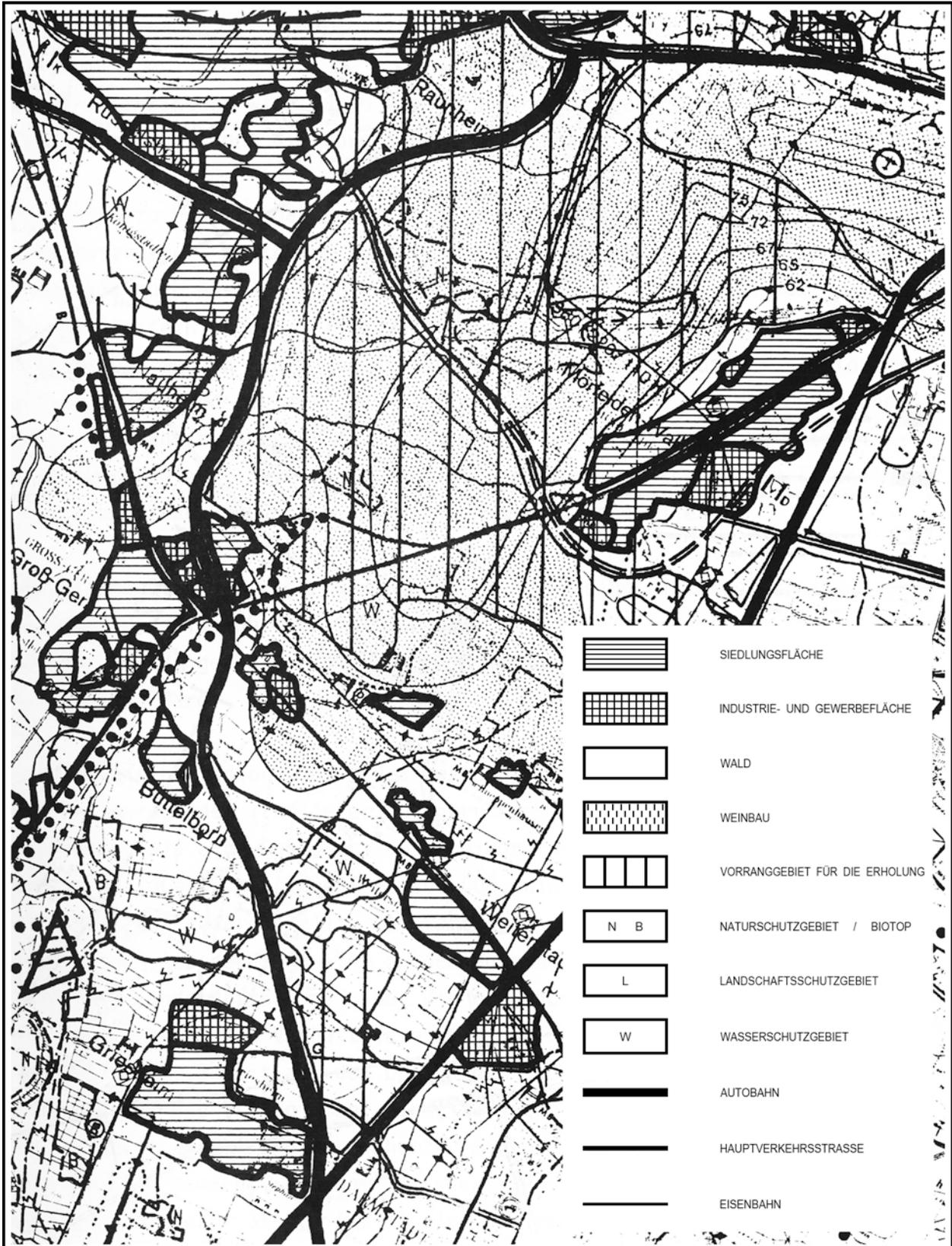


Abbildung Nr. 2: Darstellung der raumplanerischen und ökologischen Grunddaten in Übersichtskarten M 1 : 100 000 Ausschnitt

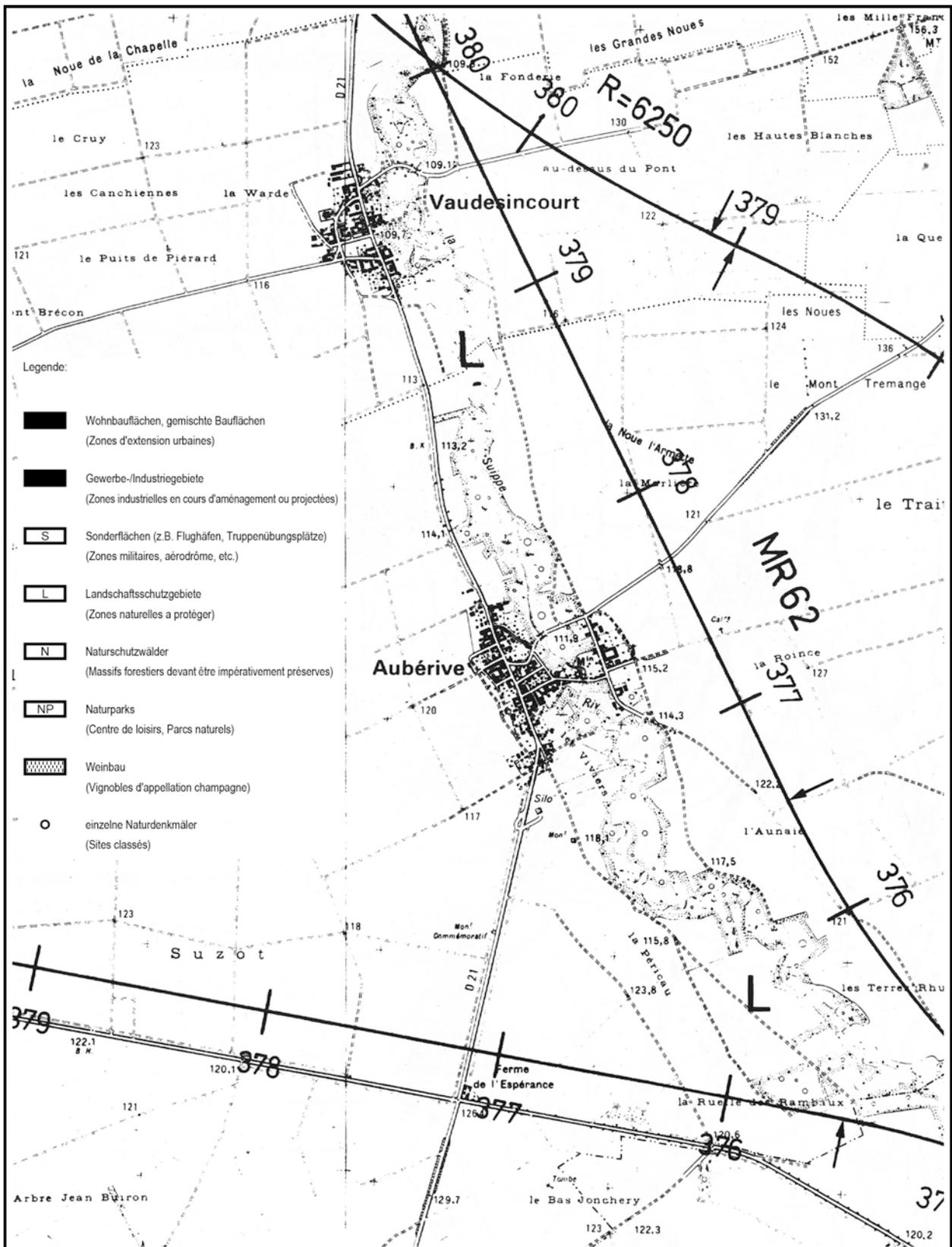


Abbildung Nr. 3: Darstellung der raumplanerischen und ökologischen Daten in Trassierungskarten TK 25, M 1 : 25 000 Ausschnitt

## 2. Erläuterungen zur Landschaftsstruktur und zum Landschaftshaushalt

Die Trassenfindung wird durch die wechselnden Eigenschaften des zu durchfahrenden Raumes und die vorgefundenen Nutzungen vielfältig beeinflusst.

Die dabei zu beachtenden Restriktionen ergeben sich sowohl aus der Landschaftsstruktur, bestehend aus Elementen wie etwa Wald, Gewässer oder Siedlung, als auch aus der Naturausstattung, die durch die Landschaftsfaktoren Relief, Gestein, Boden, Klima, Wasserhaushalt, Tierwelt und Pflanzendecke beschrieben werden kann. Die Wechselbeziehungen der Landschaftsfaktoren untereinander und die zwischen der Landschaft und der sie nutzenden und verändernden menschlichen Gesellschaft können den Begriff des Landschaftshaushalts umschreiben. Seine funktionalen Erfordernisse können der Trassenführung ökologisch begründete Restriktionen entgegenstellen.

Umweltfreundliche Trassierung erfordert daher eine differenzierte Bestandsaufnahme des Planungsraums als Grundlage für die planerischen Konzepte, wobei der jeweilige Spielraum für diese Konzepte im Rahmen der Bestandsanalyse zu umreißen wäre.

In den beiden Studien, deren Bearbeitungserfahrungen hiermit dargelegt werden, wurden dem Trassierer auf der Grundlage des vorher erläuterten Datenmaterials eine Übersichtsbeschreibung des Untersuchungskorridors anhand der Übersichtspläne M 1 : 100 000, wie in den Abbildungen Nr. 2 und 4 ausschnittsweise dargestellt, zur Verfügung gestellt. Die Erläuterungen enthielten insbesondere Hinweise zu den Nutzungen und Funktionsbereichen der einzelnen Landschaftsräume, über die großräumige Grundwassersituation sowie die geologischen Verhältnisse im Hinblick auf Gesteinsinhalt und Stratigraphie. Soweit aus den Unterlagen abschätzbar, wurden aus regionalplanerischer und ökologischer Sicht Aussagen zur Belastungsempfindlichkeit von Einzelbereichen und zur Schutzwürdigkeit ausgewählter Situationen im Planungsraum gemacht, die dem Trassierer als Orientierungshilfe dienen konnten. An dieser Stelle ist an die Schwierigkeit der Einbeziehung weiterreichender ökologischer Daten zu erinnern, die ihre Ursache im Fehlen eines flächendeckenden ökologischen Katasters hat, aus dem standortspezifische ökologische Daten und Belastungsempfindlichkeiten zu entnehmen wären, als Voraussetzung für präzise örtliche Konfliktbeurteilungen.

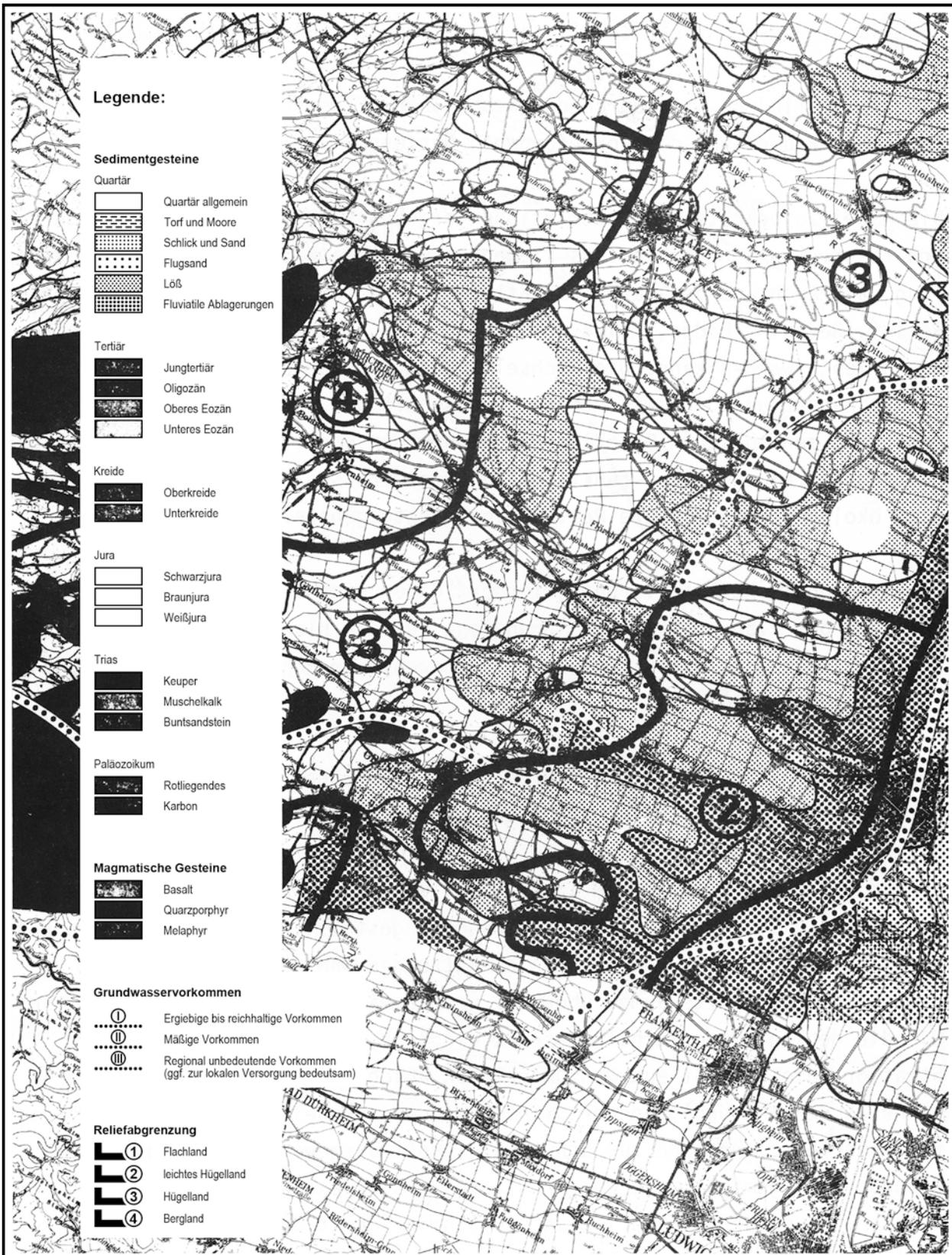


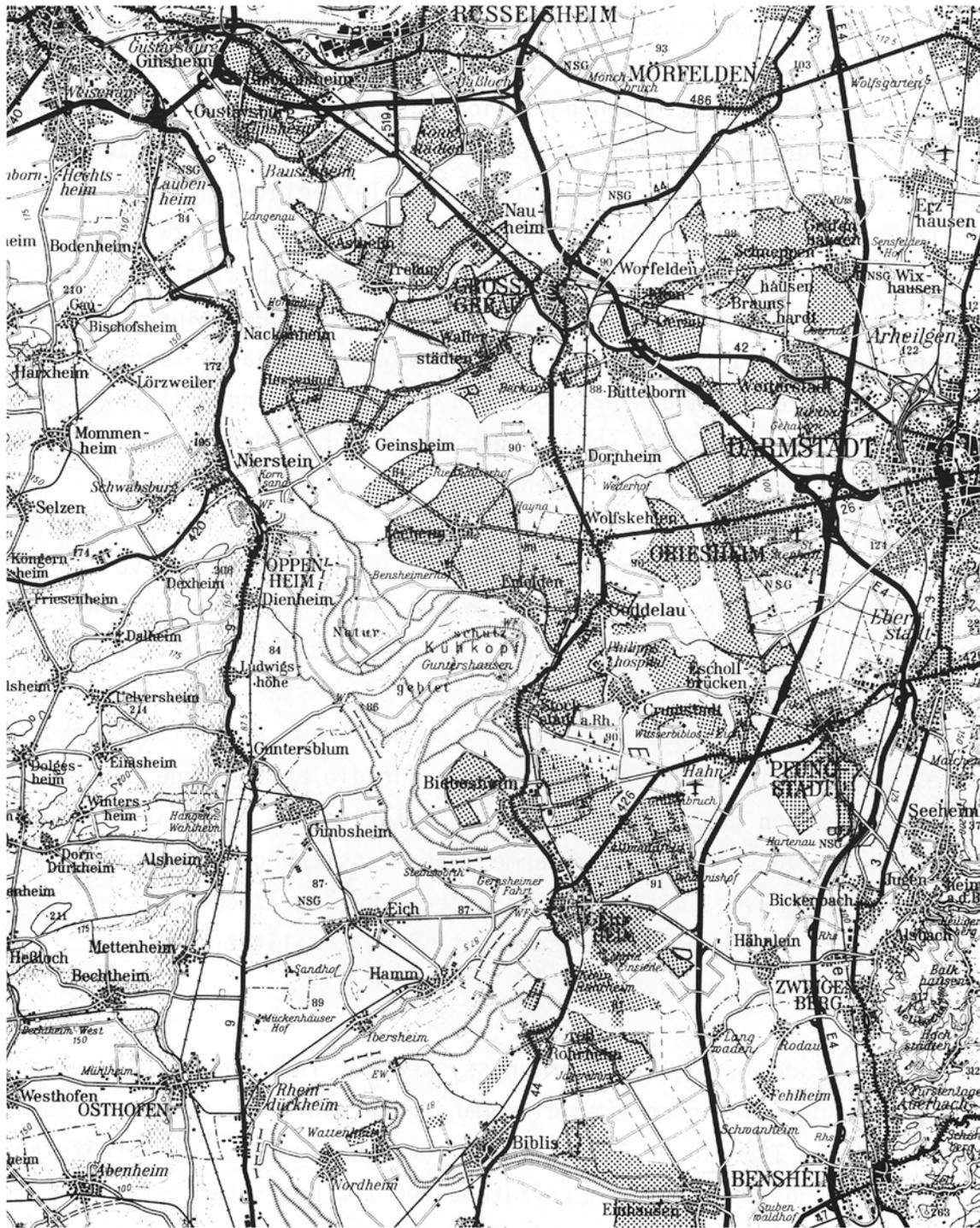
Abbildung Nr. 4: Geologischer Übersichtsplan mit Grundwasservorkommen und Reliefklassifizierung, M 1 : 100 000 Ausschnitt

Die Übersichtsbestandsanalyse des Planungsraumes erfolgte auf der Basis der naturräumlichen Gliederungseinheiten, da für diese Raumeinheiten auch eine gewisse Homogenität in Bezug auf die ökologischen Faktoren Gestein, Relief, Klima, Wasserhaushalt und Bodenvegetation unterstellt werden kann und somit auch generelle Aussagen zu typischen ökologischen Konfliktsituationen erlaubt erschienen. Besonders konnten eventuelle Beeinträchtigungen der wesentlichen Raumnutzungen, der Funktion von Immissionsschutzwäldern oder von Erholungsräumen im Bereich von Industrie-, Wohnsiedlungs- und Verkehrskonzentrationen angesprochen werden. Im direkten Gespräch mit dem Trassierer und anhand zusätzlicher kartierter Datenaussagen konnten im Einzelfall weitere Klärungen erfolgen und die Trassierung weitgehend umweltschonend erfolgen. Die Abbildungen Nr. 5 und 6 mögen hierzu beispielhaft als visuelle Information dienen.

In Abbildung Nr. 5 werden die landwirtschaftlich besonders wertvollen Nutzflächen kartographisch betont und so dem Trassierer als schonungsbedürftige Flächen verdeutlicht. Die in Abbildung 6 dargestellten schützenswerten Flächen in nächster Umgebung eines stark belasteten Verdichtungsraumes beziehen sich auf Frischluft- bzw. Kaltluftentstehungsgebiete, die für die Ventilation und somit für die Lufthygiene des Siedlungsraumes von großer Bedeutung sind; hier kam es z.B. darauf an, daß durch Reliefveränderungen im Rahmen der Trassierung in den empfindlichen Bereichen keine Luftstromstaus erzeugt würden. Zudem sollten die Flächen, die noch eine gute oder sehr gute Umweltqualität aufwiesen, möglichst nicht tangiert werden.

Im Hinblick auf das gewählte Bewertungssystem zur Trassenwahl, auf das im folgenden Abschnitt noch kurz eingegangen werden wird, wurden in Abstimmung mit dem Trassierer Empfehlungen zur Benutzung des aufbereiteten Datenmaterials, der zugehörigen Erläuterungen zur Landschaftsstruktur und zum Landschaftshaushalt und des kartierten Materials gegeben. Dabei wurde von einer gewissen Rangfolge in der Beachtung der Restriktionen ausgegangen:

- Wohnsiedlungsflächen, Wasserschutzgebiete I und Naturschutzgebiete sollten vom Trassenverlauf freigehalten werden;
- Landschaftsschutzgebiete, Wald- und sonstige Naherholungsgebiete sollten möglichst freigehalten werden;
- zu Siedlungsflächen sollte aus Lärmschutzgründen Abstand gehalten werden.



landwirtschaftlich besonders wertvolle Nutzflächen

Quelle: Flächenschutzkarte Hessen

Abbildung Nr. 5: Verteilung der landwirtschaftlich besonders wertvollen Nutzflächen (Beispiel Nördliche Oberrheinniederung)  
M 1 : 200 000, Ausschnitt

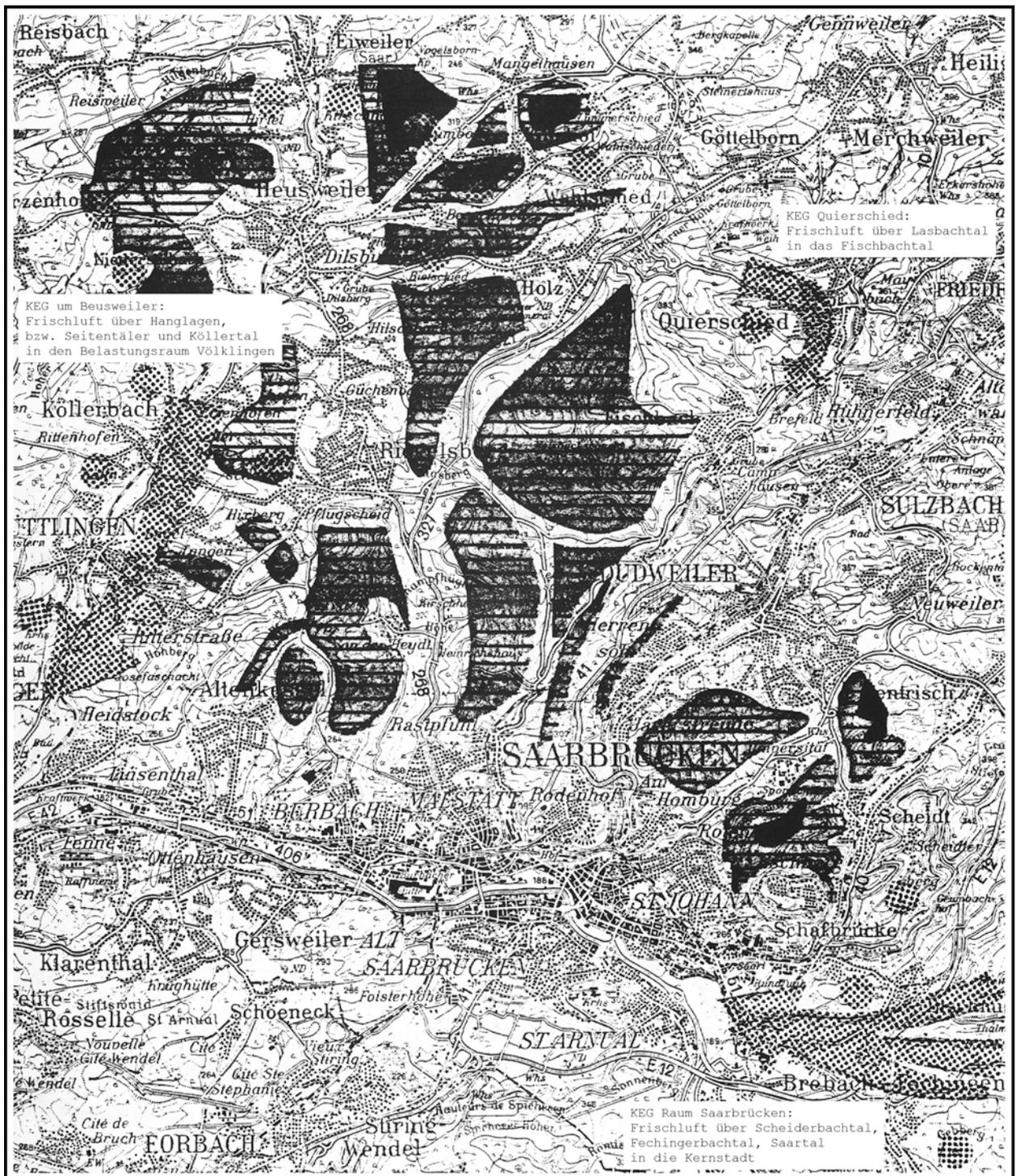


Abbildung Nr. 6: Geländeklimatische Verhältnisse  
(Beispiel Belastungsraum Saarbrücken)  
M 1 : 100 000, Ausschnitt

### 3. Weiterführende Datenaufbereitung für den Eingang in Trassenbewertungsverfahren

Nach der Erläuterung der Datenaufbereitung in kartographischen und textlichen Arbeitsunterlagen für den Trassierungsingenieur als Grundlage zum Entwurf eines Variantennetzes sei noch auf einige weiterführende Datenbereitstellungen im Laufe des Trassierungsprozesses eingegangen.

Datenaufbereitungen erfolgten im einzelnen

- für das Grobbewertungsverfahren zur Trassenauswahl im Vorentwurf
- für die Abschätzung der Wirkungen des Schnellbahnsystems ("optimale Trasse") auf die trassennahe Umwelt sowie
- für das Feinbewertungsverfahren ("optimale Trasse"), das zwar nicht Inhalt des Trassierungsarbeitspaketes war, jedoch im Rahmen der Studien durchgeführt wurde.

Zur Auswahl der "optimalen Trasse" aus dem Variantennetz des Trassenvorentwurfs kam ein vom Battelle-Institut e.V., Frankfurt am Main, zur Verfügung gestelltes Bewertungsverfahren zur Anwendung, das basierend auf einem linearen Nutzenfunktionsansatz, auf den hier nicht näher eingegangen werden soll, den Eingang der Indikatoren Lärmbelastung, Ökosystemschutz, Erholungsnutzung, Natur- und Landschaftsschutz sowie Landnutzung neben dem Indikator Kosten vorsah. Bemerkenswert ist dabei, daß den "ökologischen Indikatoren" ein deutliches Übergewicht gegenüber dem Kostenfaktor zugemessen wurde.

Im Rahmen des Verfahrens waren zunächst die Indikatorwerte (in ha) in verschiedenen Bandbreiten beidseits der Trasse für sämtliche Intervalle des Variantennetzes getrennt zu ermitteln, wobei die folgenden Vorgaben zu beachten waren:

- Lärmbelastung  
Fläche des besiedelten Gebietes innerhalb eines Trassenbandes von 500 m Breite;
- Ökosystemschutz (Fauna, Flora)  
Grunderwerbsfläche, incl. Baustraßen, außerhalb besiedelter Flächen;
- Erholungsnutzung  
Fläche der Erholungsgebiete, incl. landwirtschaftlicher und forstwirtschaftlicher

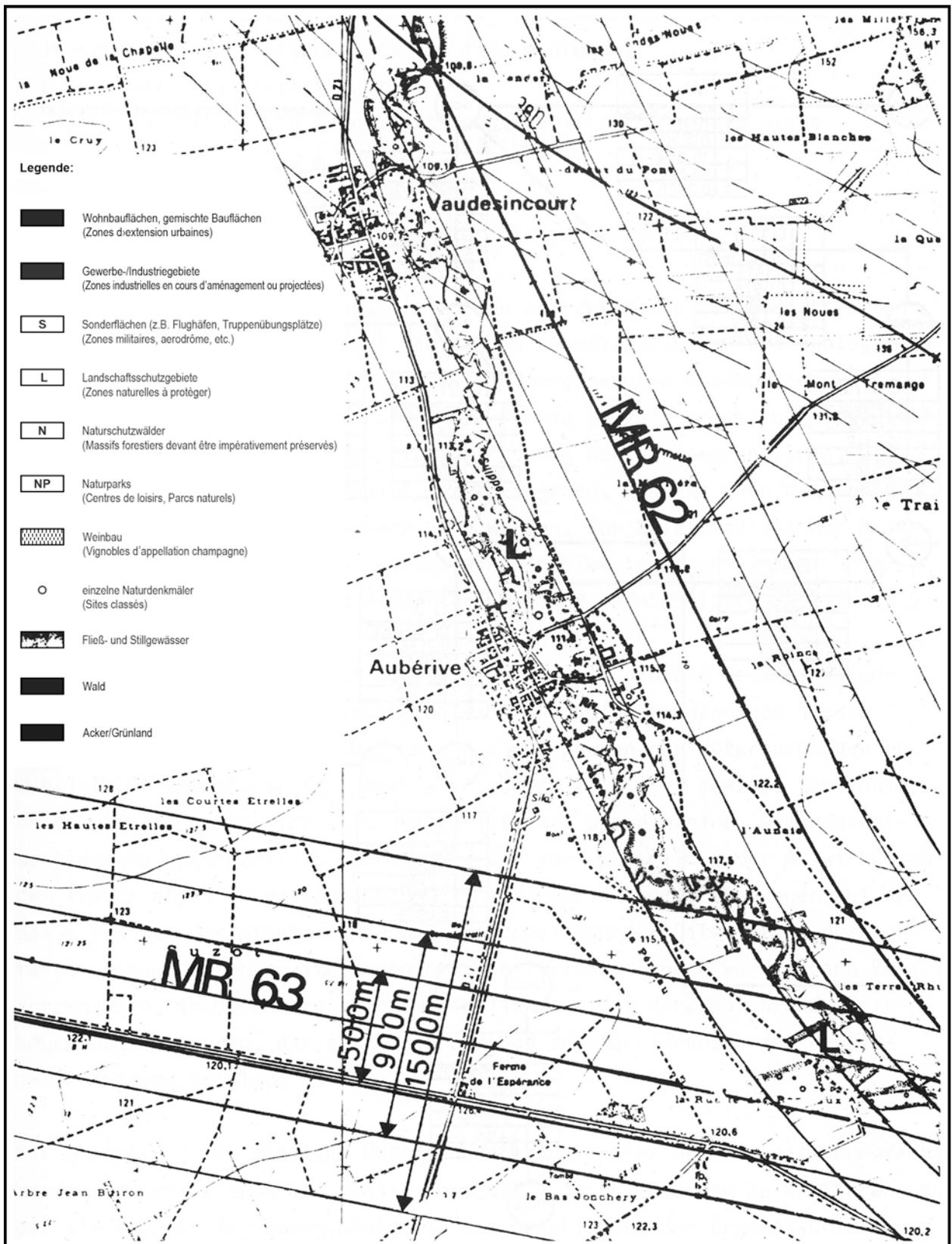


Abbildung Nr. 7: Kartierte Datengrundlage zur Indikatorwertermittlung für das Grobbewertungsverfahren (Trassenauswahl) Ausschnitt, M 1 : 25 000

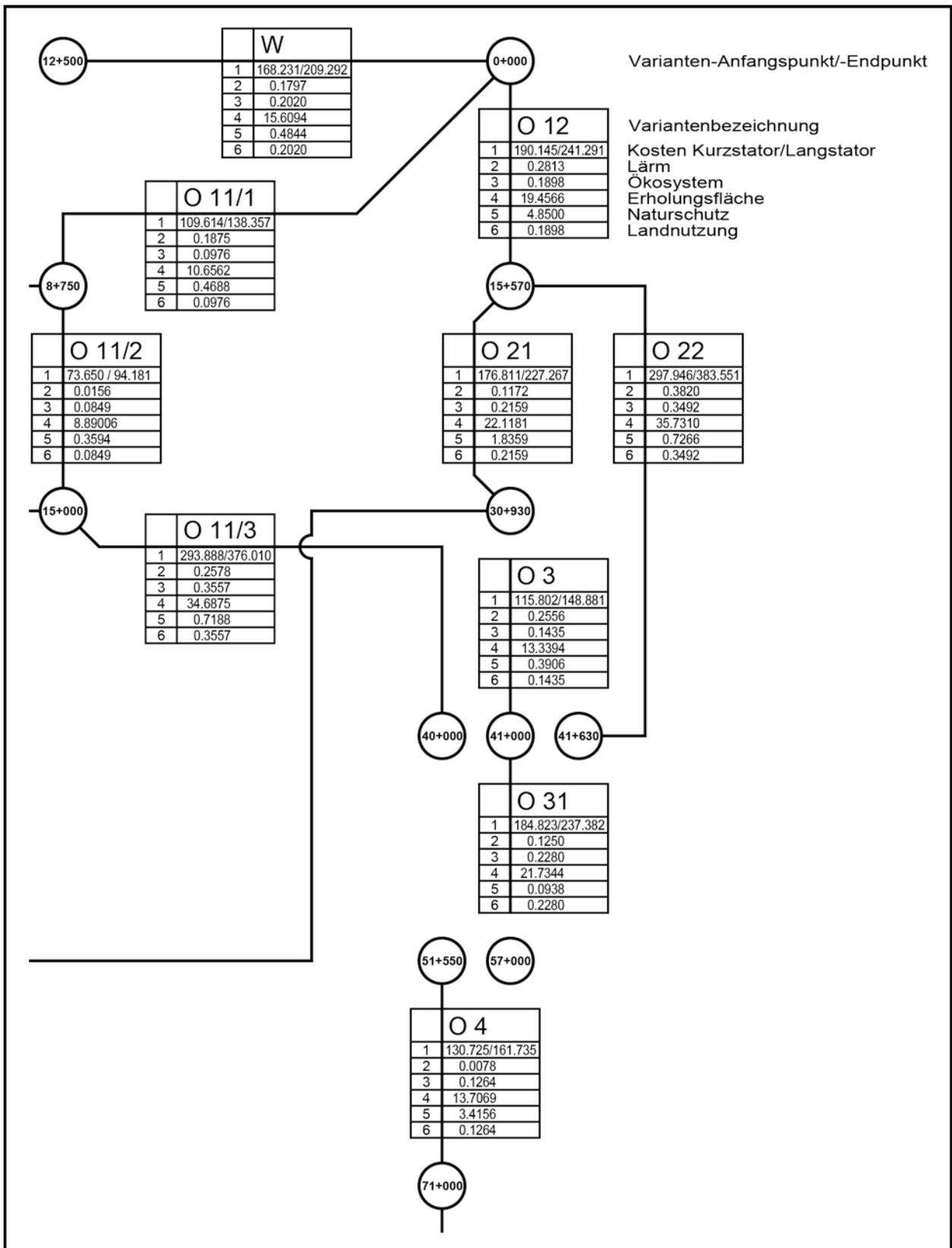


Abbildung Nr. 8: Schematischer Variantennetzplan mit Darstellung der Indikatorwerte des Grobbewertungsverfahrens  
Ausschnitt

- schafftlicher Flächen sowie der Natur- und Landschaftsschutzgebiete innerhalb eines Trassenbandes von 1500 m Breite;
- Natur- und Landschaftsschutz  
Fläche von Natur- und Landschaftsschutzgebieten innerhalb eines Trassenbandes von 900 m Breite;
- Landnutzung  
Grunderwerbsfläche wie bei Indikator Ökosystemschutz.

Zur Ermittlung der Indikatorwerte wurden auf der Basis der Arbeitskarten M 1 : 25 000, ausgestattet mit sämtlichen raumplanerischen und ökologischen Daten, wie in Abschnitt 1 dargelegt, die vorgenannten Bandbreiten kartiert, die interessierenden Flächenkategorien farbig gekennzeichnet und intervallweise zusammengestellt. Durch Planimetrierung der Kartengrundlagen, die in Abbildung Nr. 7 im Ausschnitt gezeigt werden, konnten dann die erforderlichen Indikatorwerte in ha berechnet werden. Zur Erleichterung der Datenübernahme in den Rechnerlauf wurden die Einzelwerte abschnittsweise in Netzschemadarstellungen dem Auswerter zur Hand gegeben (siehe Abbildung 8).

An dieser Stelle darf darauf hingewiesen werden, daß die gesamte Datenaufbereitung in der Weise erfolgte, daß eine auf durchgängigem Niveau mögliche Verwendung und Auswertung in allen Phasen der Untersuchungen gewährleistet werden konnte. Dadurch erscheint auch eine gewisse Kontinuität in der Bewertung der Trassierungsschritte und der einzelnen Planungsentscheidungen gesichert. So konnten für die zur Beurteilung der Auswirkungen der Trasse auf die trassennahe Umwelt erforderlichen Kartierungen auf der Basis des den Gesamtuntersuchungen zugrundeliegenden Datensatzes durchgeführt werden. Datenerweiterungen bzw. -differenzierungen wurden nach Bedarf vorgenommen, insbesondere auch im Hinblick auf das durchzuführende Feinbewertungsverfahren, das auf der Grundlage der Kartierungen zur Umweltbeeinflussung erfolgen sollte.

Als Empfehlung für ähnliche Untersuchungen darf hier der Hinweis angebracht werden, Daten so früh als möglich endgültig in Grundkarten zu kartieren, so daß sie von der Voruntersuchung bis zur Drucklegung der Ergebnisunterlagen Verwendung finden können und somit wiederholter kartographischer Arbeitsaufwand vermieden werden könnte.



## ZUR BEURTEILUNG VON SCHNELLBAHNWIRKUNGEN IM TRASSENAHEN UMWELTBEREICH

Silvia Kneißl Rabossi, Mac Kneißl

---

Im Rahmen von Planungsstudien über ein Elektromagnetisches Schnellbahnsystem (EMS) und ein Rad/Schiene-Schnellbahnsystem (RS) bearbeiteten die Verfasser die raumplanerischen und ökologischen Belange innerhalb des Arbeitspakets "Trassierung". Dabei wurden neben der Aufbereitung der planungsrelevanten Datengrundlagen für die technische Trassierung insbesondere auch die Abschätzung der zu erwartenden Wirkungen der schließlich ins Auge gefaßten Trassenverläufe auf die trassennahe Umwelt und die Analyse von Konfliktsituationen bearbeitet.

Im folgenden sollen nun primär die methodischen Ansätze dargelegt werden, die der Beurteilung der Umweltbeeinflussung zugrunde gelegt wurden, wobei auf die Darstellung der Untersuchungsergebnisse im Einzelnen verzichtet wird, da diese der Dokumentation der Studien entnommen werden können.

### 1. Aufgabenstellung und Untersuchungsmethode

Die Aufgabe, die Auswirkungen der untersuchten Schnellbahnsysteme im trassennahen Raum abzuschätzen, wurde jeweils auf die Wirkungen der ausgewählten Trassen beschränkt. Dem lag die Annahme zugrunde, daß es sich bei der schließlich aus einem dichten Variantennetz ermittelten Trasse, der sog. "optimalen Trasse" um eine Trasse handele, die unter den gegebenen Planungsbedingungen die trassennahe Umwelt geringstmöglichst beeinträchtigt. Diese Annahme darf durch den Hinweis gestützt werden, daß sowohl aufgrund der Beachtung umweltrelevanter Randbedingungen beim Entwurf des Variantennetzes, als auch aufgrund des angewandten umweltschutzorientierten Bewertungsverfahrens zur Trassenauswahl und zur Findung der "optimalen Trasse", die negative Umweltbeeinflussung möglichst niedrig gehalten wurde. So erfolgte bereits im Trassenvorentwurf sowie im gesamten Trassenfindungsprozeß auf der Grundlage der zur Verfügung gestellten raumplanerischen und ökologischen Daten mit den zugehörigen Erläuterungen zur Landschaftsstruktur und zum Landschaftshaushalt die weitgehende Schonung der hochwertigen land- und

forstwirtschaftlichen Flächen, der Siedlungs- und Erholungsflächen sowie der Natur-, Landschafts- und Wasserschutzflächen. Zudem wurde die "optimale Trasse" mit Hilfe eines Bewertungsverfahrens gewählt, das von deutlicher Dominanz umweltbezogener Indikatoren gekennzeichnet war.

Die Wirkungen, die von der "optimalen Trasse" ausgehen, dürften daher für den betrachteten Planungsraum als die in jedem Fall zu erwartenden Mindestwirkungen angenommen werden, wobei standörtliche Differenzierungen oder zusätzliche Schutzmaßnahmen die abgeschätzten Wirkungen allerdings noch modifizieren könnten.

Da sich bei den durchgeführten Planungsstudien die Untersuchungen auf die Datenebene der Regionalplanung in etwa bezogen, konnten keine näheren Aussagen über die standörtlichen Bedingungen und Wirkungen im Einzelfall gemacht werden. Im Falle einer konkreten Ausführungsplanung wäre es unumgänglich, unter Einbeziehung der Daten der lokalen Ebene, etwa im Maßstab 1 : 5000, die Gesamttrasse im Hinblick auf ihre Umweltbeeinflussung zu untersuchen und darzustellen.

Dem Umfang und Bearbeitungstiefgang einer Planungsstudie entsprechend wurden im Rahmen der genannten Studien die zu erwartenden Wirkungen der technischen Systeme auf die trassennahe Umwelt zunächst in genereller Weise durchleuchtet, indem die Wirkungen auf die natürlichen Ressourcen und in deren Folge auf die einzelnen Nutzungen betrachtet wurden.

In einer kartographischen Einwirkungsdarstellung im Maßstab 1 : 25 000 erfolgte dann eine Kartierung von Einflußbändern längs des gesamten Trassenverlaufs, in die alle wesentlichen zur Verfügung stehenden raumplanerischen und ökologischen Daten einfließen, ergänzt durch die Lärmwirkungen in Iso-phonendarstellung.

Schließlich konnten aus der kartierten Trasse - Umwelt - Situation beispielhaft Konfliktsituationen, die aus konkurrierenden Nutzungsansprüchen resultieren, ausgewählt und analysiert werden sowie Vorschläge für Schutzmaßnahmen und zur landschaftsästhetischen Trasseneinbindung vorgelegt werden.

## 2. Generelle Einwirkungen auf natürliche Ressourcen und Nutzungen

Verkehrssysteme verursachen als bauliche Anlagen und durch ihren Betrieb Folgewirkungen auf das ökologische Gefüge des betroffenen Landschaftsraums. Dabei sind die Faktoren des Landschaftshaushalts, wie z.B. Klima, Gestein, Boden, Wasser, Tierwelt und Pflanzendecke, als natürliche Ressourcen den Wirkungen des technischen Systems ausgesetzt, wobei sie sich mehr oder weniger verändern und somit die von ihnen abhängigen oder in Beziehung stehenden Nutzungen beeinflussen.

Beispiele zu erwartender Wirkungen von Schnellbahntrassen auf die natürlichen Faktoren und in der Folge auf die einzelnen Nutzungen sind der in Abbildung Nr. 1 dargestellten ökologischen Verflechtungsmatrix als systematisierter Überblick zu entnehmen. Dabei ist zu berücksichtigen, daß es sich häufig um Langzeitwirkungen handelt, deren Bedeutung, Verlauf und Zusammenwirkung mit anderen Wirkungen durch standortspezifische Einzeluntersuchungen näher geklärt werden müßten, wobei insbesondere auch die ökologische Belastbarkeit der jeweiligen Situation in die Betrachtung einzubeziehen wäre. Hierzu wären allerdings eine umfassende Bestandsaufnahme der jeweils gegebenen Umweltsituation und eine darauf aufgebaute Risikoanalyse vonnöten, Untersuchungen, die wie bereits angesprochen, den Rahmen einer Planungsstudie weit überschreiten würden.

Der hier gewählte Weg beschränkte sich daher auf die Darlegung der umweltrelevanten Folgewirkungen vorwiegend anhand nutzungsbedingter Kriterien zur Darstellung der Konflikte zwischen Trasse und Siedlungsflächen, Erholungsflächen, Schutzgebieten und Landbau, wobei zwischen anlagebedingten und betriebsbedingten Wirkungen unterschieden wurde.

Die anlagebedingten Wirkungen resultieren im wesentlichen aus den Landschaftsveränderungen, die vom Verkehrsbauwerk selbst, von der Gestaltung des Trassenverlaufs in Einschnitten, Hanganschnitten, Dammführungen oder Aufständierungen, Brücken- und Tunnelbauwerken sowie vom Baustellenbetrieb verursacht werden.

Zu den durch den Betrieb des Verkehrssystems bedingten Wirkungen auf die Umwelt sind vor allem Lärmbelastungen, Beeinträchtigungen durch Licht,

Betroffene Nutzungen  Auswirkungen der Trasse auf die Landschaftsfaktoren	SIEDLUNG			ERHOLUNG		LANDBAU					WASSER- WIRTSCH.		SCHUTZ- GEBIETE	
	Allgemeine Wohngebiete	Gewerbegebiete	Kleinsiedlungsgebiete	Schwerpunkterholung	Flächenerholung	Ackerbau	Grünland	Weinbau	Sonderstandorte	Wald- und Gehölzflächen	Wassergewinnung	Gewässer	Naturschutzgebiete	Landschafts- schutzgebiete
<b>KLIMA / SCHALL</b>														
Nebelbegünstigung						•	•	•	•					
Frostgefährdung						•	•	•	•					
Lärmbelastung	•	•	•	•	•									
<b>BODEN</b>														
Bodenverdichtung							•							
Bodenerosion						•		•	•					
<b>WASSER</b>														
Verunreinigung des Oberflächenwassers				•	•					•	•			
Verunreinigung des Grundwassers										•	•			
Grundwassersenkung bzw. -hebung							•		•			•	•	
<b>PFLANZENDECKE</b>														
Artendezimierung					•								•	•
Artenmassierung					•								•	•
<b>TIERWELT</b>														
Artendezimierung					•				•				•	•
Artenmassierung					•				•				•	•
Territoriale Beschränkungen									•					
<b>LANDSCHAFTSBILD</b>														
Visuelle Beeinträchtigung	•	•	•	•	•									
Durchschneidung von Landschaftselementen	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•

Abbildung Nr. 1: Ökologische Verflechtungsmatrix Bahntrasse/Landschaft  
(nach Bierhals, Kiemstedt, Scharpf 1974; Krause 1976)

Abwärme, Fahrtwind und Erschütterungen sowie Schädigungen der Fauna zu zählen.

Die wesentlichen Trassenwirkungen auf die natürlichen Ressourcen seien hier kurz zusammengefaßt:

- Gestein und Boden

Die Trassenführung erfordert in vielen Fällen eine trassengerechte Anpassung des Reliefs in Form von Einschnitten, Anschnitten, Dämmen, Aufständerungen oder Tunnels. Neben der Landschaftsveränderung bewirken solche Reliefveränderungen in der Regel aber auch zusätzlich Änderungen des Geländeklimas (z.B. Veränderung der Luftströmungsverhältnisse), des Wasserhaushalts (z.B. infolge von Grundwasseranschnitten) oder der Erosionsgefährdung.

- Wasserhaushalt

Gefährdungen können hier insbesondere durch Grundwasserabsenkungen und Grundwasserverunreinigungen entstehen.

- Klima

Temperaturveränderungen, wie z.B. Kaltluftstatus werden häufig von Reliefveränderungen oder Rodungen verursacht; daneben kann durch die aerodynamischen Wirkungen des Fahrtwinds die Bodenverdunstung erhöht werden.

- Pflanzendecke und Tierwelt

Die Hauptgefahren sind hier in der Zerstörung von Biotopen und in der Zerschneidung von Lebensräumen einzelner Tiergemeinschaften zu sehen.

Die trassenbedingten Einwirkungen auf die einzelnen Raumnutzungen sind in übersichtlicher Darstellung aus Abbildung Nr. 2 zu ersehen.

Zur Vermeidung eventueller Mißverständnisse darf darauf hingewiesen werden, daß im Rahmen der Abwägung planerischer Entscheidungen stets der Gesamtzusammenhang Beachtung finden müßte; d.h. der zu erwartende Gesamtnutzen ist jeweils den befürchteten Schäden gegenüberzustellen, wobei jedoch die bereits angesprochenen Langzeitwirkungen nicht unterschätzt werden dürfen.

Desweiteren spielt bei der Beurteilung von etwaigen Schädigungen die Frage eine entscheidende Rolle, ob es sich um wieder ausgleichbare, also zumindest in gewissem Grad reversible Vorgänge handelt oder um irreversible, die nicht wieder gutzumachenden Schaden anrichten können.

Betroffene Nutzungsbereiche	Landwirtschaft	Forstwirtschaft	Siedlungsbereiche	Erholungsgebiete	Wasserwirtschaft	Schutzgebiete
<p>Trassenbedingte, auslösende Ursache</p> <p>Anlagebedingte Flächenbeanspruchung Flächenzerschneidung Flächentangierung Reliefveränderungen (Damm, Einschnitt, Anschnitt) Baukörper (Brücken) Sonstige Eingriffe</p>	<p>Entzug von Produktionsfläche Entzug von Vegetationsfläche Beeinflussung der Luftzirkulation/Kaltluftstau Beeinflussung der Grundwasser-Verhältnisse/Ver-nässung bzw. Austrocknung benachbarter Flächen Beeinträchtigung/Zerstörung von Tier- und Pflanzenbiotopen Einschränkung der Begehrbarkeit durch zerschnittene landwirtschaftliche Fahr- und Feldwege</p>	<p>Entzug von Holzbodenfläche Entzug von Vegetationsfläche Beeinflussung der Luftzirkulation/Schaffung von Windwurfschneisen Beeinträchtigung/Zerstörung von Tier- und Pflanzenbiotopen Unterbrechung/Verlegung von Wildwechseln Einschränkung der Begehrbarkeit durch Wald- und Fahrwege</p>	<p>Verlust an Siedlungsfläche Verlust an freizeitrelevanten Grünräumen Verlust an ortsnaher Landschaft Einschränkung der Begehrbarkeit Verringerung der Luftzirkulation von Frischluftschneisen</p>	<p>Zerschneidung des Landschaftsgefüges und Veränderungen der Strukturelemente Veränderung der Sichtbeziehungen und der Gestaltungselemente des Landschaftsbildes Störung des Landschaftsbildes durch nicht angemessene Konstrastwirkung (z.B. Bauwerke) Veränderung der Proportionen der Landschaft durch Geländeeinschnitte etc. Trennung von Spazier- und Wanderwegen</p>	<p>Flächenentzug durch Bauwerke Störung der versickerungsfähigen Bodenoberfläche (während der Baumaßnahme) Verletzung der Boden- und Deckschicht Schaffung von Erdauflüssen bei Gründungsarbeiten Veränderung des Oberflächenabflusses (Verrohrung der Bäche) Beeinflussung der GW - Neubildungsrate Schadstoffeinträge (z.B. Schmierstoffe)</p>	<p>Beeinträchtigung Belastung, Zerstörung von Tier- und Pflanzenbiotopen Beeinflussung der Artenvielfalt Artenverschlebung, Zunahme an Kulturfolgern, Verlust an standort-spezialisierten Arten Biotopveränderung: Entwässerung, Strukturverarmung Zerstörung einzelner Naturdenkmäler Tierverluste Lärmmissionen, sonstige Beunruhigungen</p>
<p>Betreibende</p> <p>Lärm Licht Erschütterungen Fahrtwind Tierverluste</p>	<p>Lärmmissionen</p>	<p>Wildverluste Lärmmissionen</p>	<p>Verlärmung Erschütterung Funktionstrennung sozial-räumlicher Verflechtungen</p>	<p>Gebrauchswert-beinträchtigung der Landschaft für Erholung durch Lärmmissionen</p>	<p>Schadstoffeinträge (z.B. Schmierstoffe)</p>	<p>Tierverluste Lärmmissionen, sonstige Beunruhigungen</p>

Abbildung Nr. 2: Trassenbedingte Einwirkungen auf die Raumnutzungen (nach E. Krause in Handbuch für Planung, Gestaltung und Schutz der Umwelt, Bd. 3, S. 409 ff.)

### 3. Kartographische Einwirkungsdarstellung

Für den gesamten Bereich der gewählten "optimalen Trasse" wurden die Einwirkungen des technischen Systems Schnellbahn auf die trassennahe Umwelt auf der Grundlage des aufbereiteten raumplanerischen und ökologischen Datenmaterials in den topographischen Karten 1 : 25 000 graphisch ermittelt und dargestellt, ergänzt durch die Einzeichnung der Isophonenverläufe in Intervallen von 5 db (A).

In Abstimmung mit den beteiligten Planern wurde in Hinblick auf die im Rahmen der interdisziplinären Bearbeitung beider Planungsstudien vorgesehenen weiteren Feinbewertungsuntersuchungen der trassennahe Umweltbereich durch ein insgesamt 1600 m breites Band längs der Trasse definiert. Dabei erfolgte die Datenkartierung in der Weise, daß die Feinbewertungsindikatorwerte auf Rastereinheiten bezogen direkt erfaßt werden konnten.

So wurden z.B. die Daten bei der Bearbeitung der EMS-Planungsstudie auf die mit dem Batelle-Institut e.V. abgestimmten Feinbewertungsbögen "Umwelt" bezogen homogenisiert und kartiert, sodaß die Quantifizierung für die Bewertungsrechnung direkt anhand der kartographischen Einwirkungsdarstellung erfolgen konnte.

Wie aus Abbildung Nr. 3 zu ersehen ist, können der Kartierung neben den morphologischen Gegebenheiten der Kartengrundlage im Einzelnen die folgenden Hauptdaten entnommen werden:

- die Wohnsiedlungs-, Gewerbe- und Industrieflächen sowie Sonderflächen (z.B. Flughäfen) und Lagerstätten;
- die land- und forstwirtschaftlichen Flächen (Wald, Acker-/Grünland, Sonderkulturen wie z.B. Weinbau);
- die Schutzgebiete wie Naturschutzgebiete, Naturparks, Landschaftsschutzgebiete, sonstige schützenswerte Landschaftsteile;
- die wesentlichen Bandinfrastrukturelemente wie z.B. Autobahnen oder Wasserstraßen.

In den Trassenbändern konnten somit für den gesamten Trassenverlauf die wesentlichen Einwirkungen auf die hauptsächlichen Nutzungen und ökologischen Schutzflächen unmittelbar sichtbar gemacht werden.



#### 4. Analyse ausgewählter Konfliktsituationen

Um im Rahmen der Planungsstudien neben den generellen auch raumbezogene Aussagen zu den Wirkungen der Schnellbahnsysteme zu ermöglichen, wurden typische Konfliktsituationen ausgewählt und ausgewertet. Ausgehend von der im Verlauf der Datenaufbereitung erstellten Erläuterungen zu Landschaftsstruktur und Landschaftshaushalt, in die sowohl die ökologische Ausgangssituation als auch die von der Regionalplanung vorgegebenen Planungsziele eingeflossen waren, wurden für jeden naturräumlichen Gliederungsraum die empfindlichsten von der Trasse berührten Gebiete auf die abschätzbaren Trassenauswirkungen hin analysiert.

Hierzu wurden jeweils in einer für alle Beispielräume einheitlichen Verflechtungsmatrix die landschaftsrelevanten Merkmale der Trassenführung den betroffenen Funktions- und Nutzungsbereichen gegenübergestellt und auf die jeweils konkreten Raumsituationen bezogen, wie aus den Abbildungen Nr. 4 und 5 entnommen werden kann.

Die Darstellung erstreckte sich u.a. auf die Konfliktsituationen

- Trasse/Wald  
mit den Beeinträchtigungen der Klima-, Sicht- und Immissionsschutzfunktion, der Erholungsfunktion und der wasserwirtschaftlichen Funktion;
- Trasse/Landschaft  
mit den Nutzungsbeeinträchtigungen infolge von Flächenverbrauch und Flächenzerschneidung, erhöhter Erosionsgefährdung als Folge der eingetretenen Reliefveränderungen und infolge weiterer Geländeklimaveränderungen, wie z.B. der Zunahme von Frostlagen;
- Trasse/Schutzgebiete  
mit den Beeinträchtigungen von Natur- und Wasserschutzgebieten;
- Trasse/Erholungsgebiete  
mit den Beeinträchtigungen durch Verlärmungs- und Zerschneidungseffekte sowie Störungen des Landschaftsbildes;
- Trasse/Siedlung  
mit den Beeinträchtigungen durch Flächenzerschneidung, Reliefumbau und Verlärmung.

Anhand einiger Beispiele werden im folgenden Abschnitt planerische Vorschläge zur Verminderung der genannten Störungen erörtert.

Betroffene Nutzungs- und Landschaftsbereiche  Trassen- folgewardung	Nutzungen				Naturnahe, z.T. besonders schützenswerte Bereiche					Schutzgebiete
	Landwirtschaftlich wertvolle Bereiche	Forstwirtschaft	Erholungsgebiete	Wohngebiete	Waldgebiete	Bäche, Talauen	Steilhänge	Berg-/Hügelkuppen	Erosionsgefährdete Gebiete	Rechtlich geschützte Gebiete
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Flächenzerschneidung	●	●●	●●		●●●	●●				●●
Flächentangierung										
Reliefumbau							●			
Bauwerk										
Damm										
Ein-/Anschnitt							●			
Lärmbelästigung			●●	●●	●●●					
Funktionsbeeinträchtigung										
	km 71 - 78 und 96 - 97	Staatsforste Otterberg km 92 - 95 und Kaiserslautern West km 98 - 105 (Offline)	Kaiserwald Eselsbachtal	Erlenbach km 95,3 - 94,4 Wiesental km 98,2 - 99	Staatsforste Otterberg km 92 - 95 und Kaiserslautern West km 98 - 105 (Offline) sowie km 124 - 125	Eselsbachtal km 95,2 Glantal km 126,5 und 129	Eselsbachtal km 95,2			L km 95 - 95,9 und 99,3 - 101,4 (Offline) N km 118 - 123,3
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Abbildung Nr. 4: Verflechtungsmatrix  
Beispiel lokaler Auswirkungen der Trassenführung

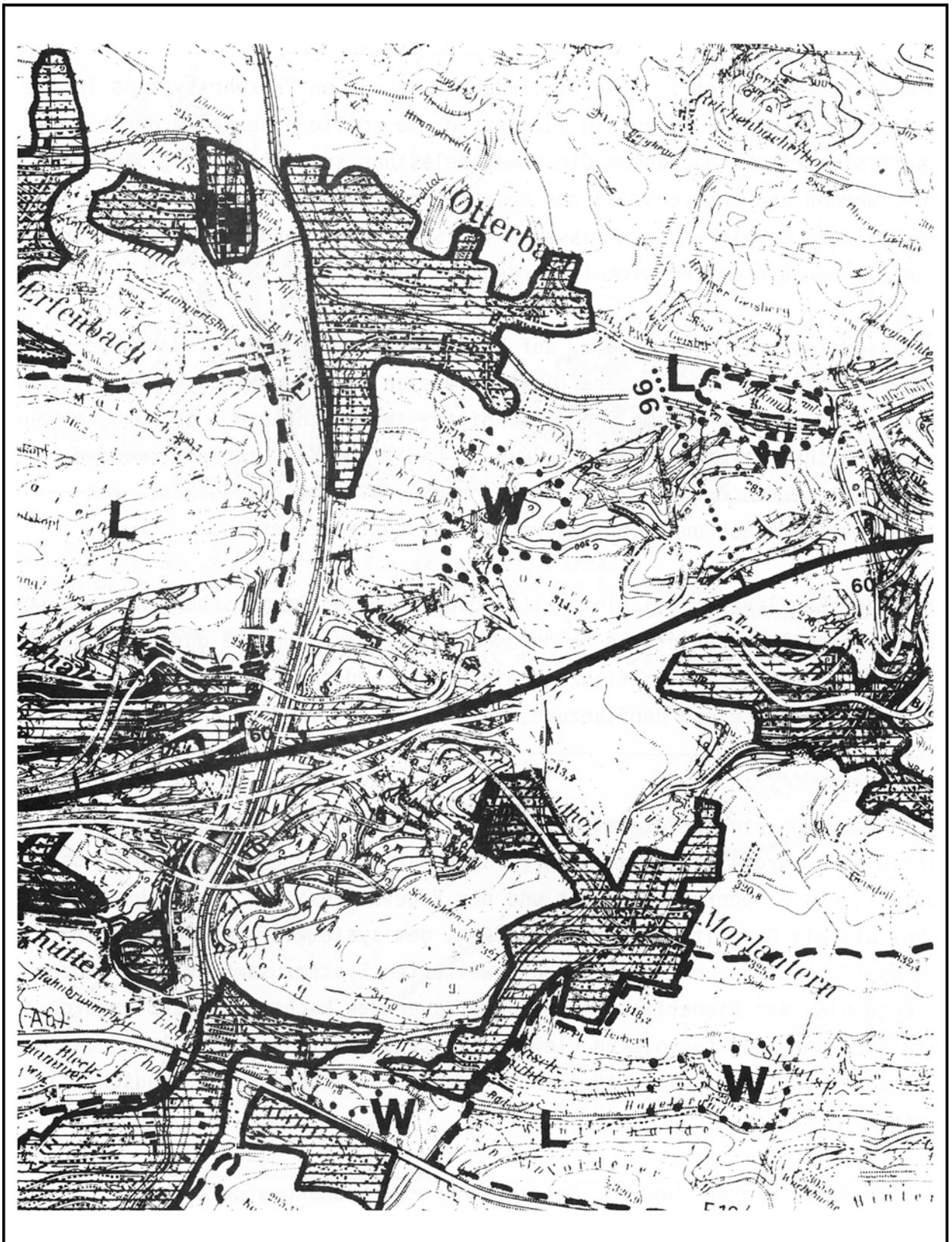


Abbildung Nr. 5: Konfliktsituation Trasse/Siedlung  
Kartenausschnitt M 1 : 25 000

## 5. Landschaftsästhetische Trasseneinbindung

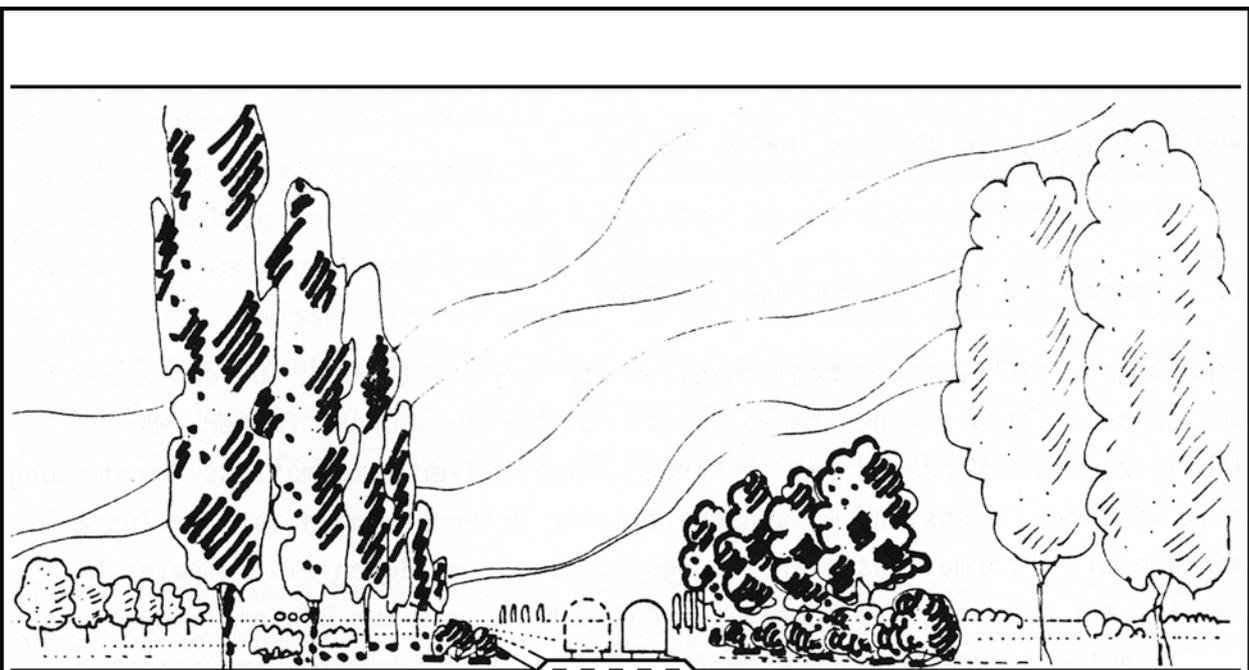
In doppelter Hinsicht ist der Einbindung eines neuen Verkehrssystems in die Landschaft besondere Bedeutung zuzumessen. So sollte einerseits durch landschaftsplanerische Maßnahmen die Umweltbelastung so weit als möglich reduziert werden und andererseits das neue technische System, zumindest in den wesentlichen Bereichen des Trassenverlaufs, zu einem landschaftsbereichernden ästhetischen Element entwickelt werden.

In diesem Zusammenhang ist u.a. auf Ingenieurbauwerke des 19. Jahrhunderts zu verweisen, wie z.B. Wasserstraßen, die sich im landschaftsgestalterischen Zusammenwirken ihrer Dämme und Einschnitte, ihrer Schleusen- und Brückenbauwerke und ihrer typischen Bepflanzung im Laufe der Zeit zu bestimmenden Landschaftswerten entwickelt haben und heute, allgemein geschätzt, verschiedentlich sogar unter besonderen Schutz gestellt werden.

Neben der Bepflanzung von Einschnittsböschungen und Dammböschungen sowie der Wiederherstellung verletzter Waldsäume sollte insbesondere durch trassenbegleitende, ortstypische Bepflanzung ein neues Landschaftselementpaar, bestehend aus Trasse und Bepflanzung, entwickelt und in die Landschaft somit integriert werden.

Wesentlich für eine erfolgreiche landschaftsästhetische Trasseneinbindung ist hierzu eine sorgfältige Analyse der landschaftsbestimmenden Elemente, des Reliefs, des Gliederungsmaßstabs und der Vegetationstypik. Landschaft ist dabei als ein Gestaltssystem zu begreifen, dem systemkonforme neue Elemente hinzugefügt werden und somit einen erweiterten Systemzusammenhang erlauben. Im Ergebnis, das sicherlich einen längerdauernden Wachstumsprozeß erfordert, wird sich dann das technische Element Bahntrasse mit seinen begleitenden typischen Landschaftselementen als integraler Bestandteil der Landschaft darstellen können.

Im Rahmen der Bearbeitung der beiden genannten Planungsstudien wurden durch Kombination der typischen Trassenverläufe Damm, Aufständigung, Einschnitt und Anschnitt mit den Reliefkategorien Flachland, leichtes Hügelland, Hügel-land und Bergland wesentliche Situationen des Trassenverlaufes ausgewählt. Ein Beispiel hierfür ist in Abbildung Nr. 6 wiedergegeben.



Die auf flachem Damm verlaufende Trasse im vorliegenden ebenen Gelände sollte von ortstypischen Baum- und Buschreihen, dem Maßstab der vorhandenen Landschaft angemessen, begleitet werden. Soweit Dämme oder Aufschüttungen in der Landschaft vorhanden sind, sollte der Bahndamm in Bezug auf die Gestalttypik weitgehend angepaßt werden.

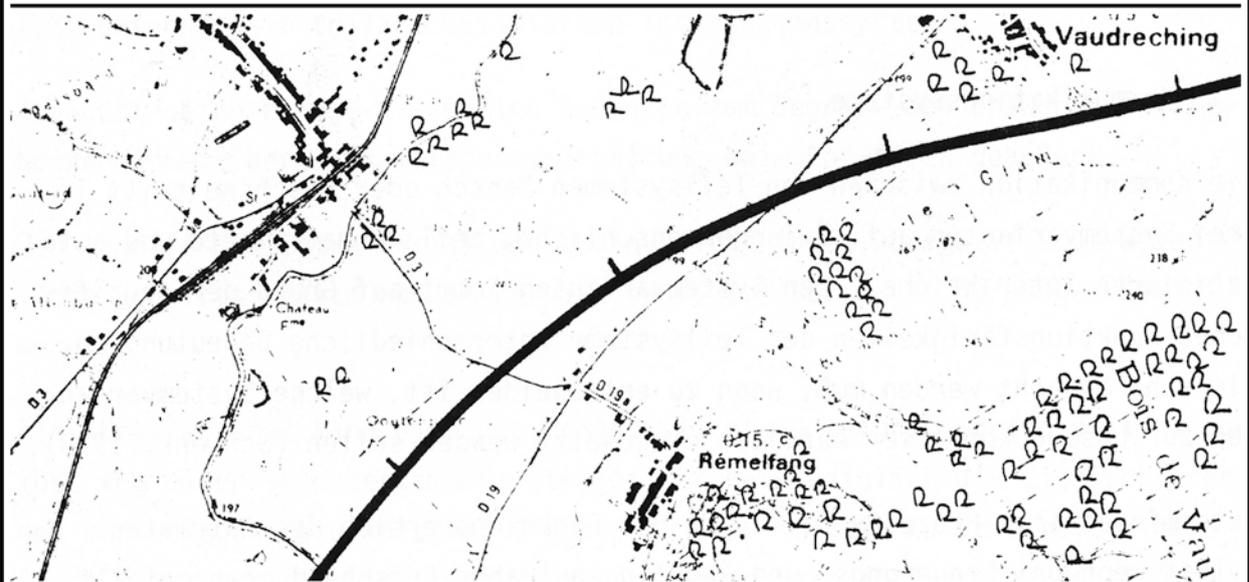


Abbildung Nr. 6: Landschaftsästhetische Trasseneinbindung

# 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, ebenerdiges 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 Zwangspunktdiagnose 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.

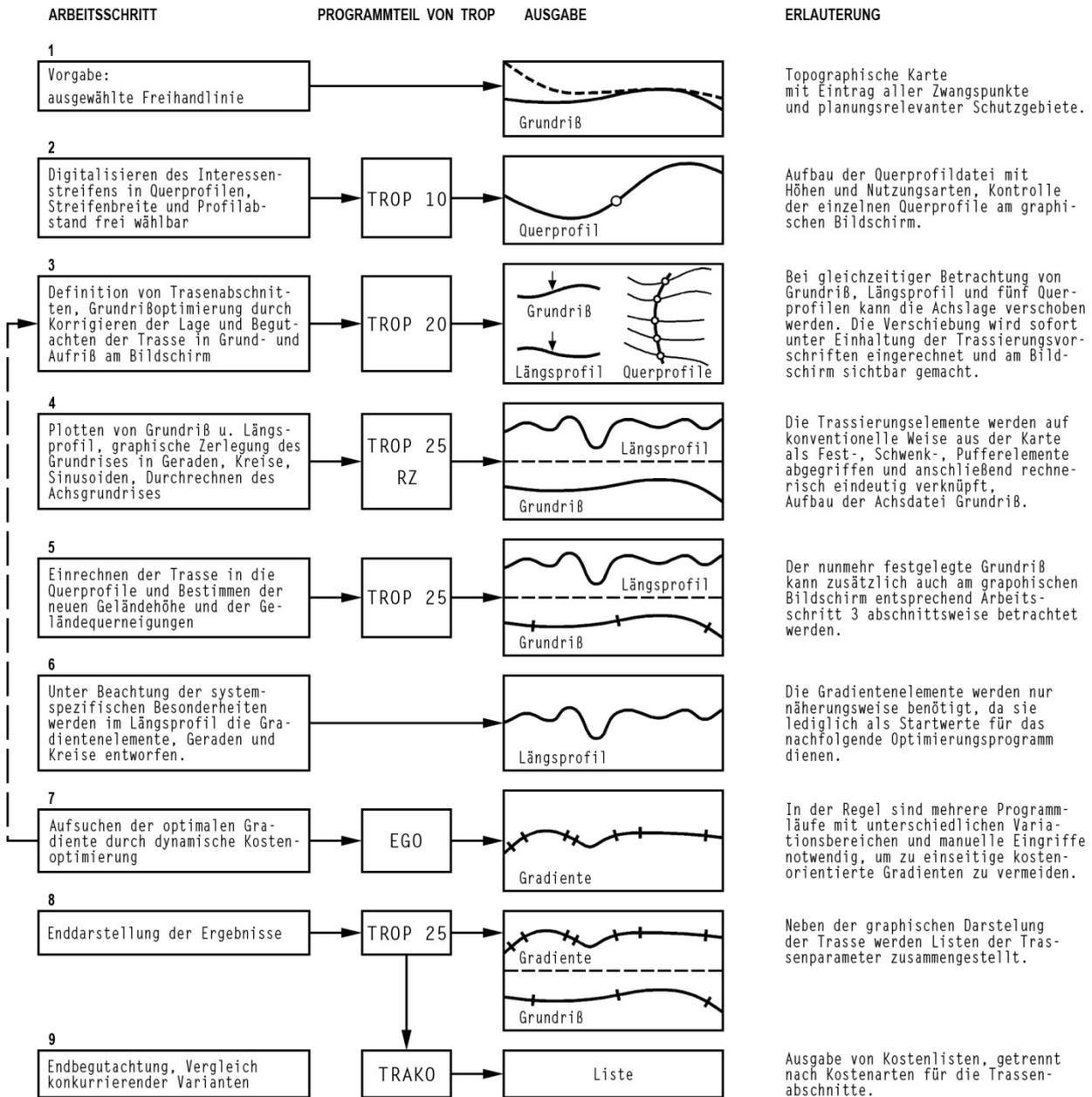
Die wesentlichen Systemkomponenten bestehen aus den Modulen für die Datenerhebung zur Erstellung des Informationsmodells (TROP 10), für die interaktive Grundrißbearbeitung (TROP 20) und geometrische Achseinrechnung nach Trassierungselementen (RZ), für die dynamische Gradientenoptimierung (EGO), für graphische 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 Straßenverkehrstechnik, 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

# DIE VORPLANUNG BEI GROSSRÄUMIGEN NEUTRASSIERUNGEN FÜR SCHIENENGEBUNDENE SCHNELLVERKEHRSSYSTEME

von R. Fischer und G. Karner

---

## 1. Vorbemerkung

Das Ing.Büro KARNER hatte in den Jahren 1979 - 1981 die Projektleitung von zwei großen Studien für großräumige Neutrassierungen schienengebundener Schnellbahnsysteme.

Während der Durchführung dieser Projekte entstand zwischen den beteiligten Parteien die Idee, die gewonnenen Erkenntnisse auch anderen interessierten Kreisen, welche sich mit Trassierungsproblemen im weitesten Sinne beschäftigen, insbesondere auch Studenten der Fachrichtungen Bauingenieur- und Vermessungswesen, zugänglich zu machen.

Nun ist ein solches Vorhaben für ein im Wettbewerb stehendes Büro wie das unsere nicht frei von Problemen.

Den wissenschaftlichen Leser interessieren naturgemäß nicht die allgemeinen Fähigkeiten von eigens für diesen Zweck entwickelten Programmsystemen, sondern vielmehr deren mathematische Grundlagen und die Art und Weise, wie verschiedene sowohl bekannte Bausteine als auch neue Entwicklungen zusammengesetzt wurden, um die gestellten Aufgaben lösen zu können.

Hier jedoch beginnen die Schwierigkeiten, wenn etwa die Grundlagen für Kostenmodelle oder für Bewertungsansätze in solcher Weise offengelegt werden, daß ein Nachvollzug der Arbeiten möglich wird.

Das von unserem Büro entwickelte Verfahren zur Bearbeitung großräumiger Neutrassierungen - nicht zuletzt auch deren Darstellungsformen - stellt in gewissem Sinne ein Betriebskapital dar, welches nicht notwendigerweise auch Wettbewerbern zur Verfügung steht.

Die Beschreibung der Arbeiten im Rahmen der Vorplanung kann sich daher nur auf den allgemeinen Verfahrensablauf und die Kenntlichmachung von Problem-  
punkten beziehen, nicht aber auf Lösungsansätze.

Dennoch können die nachfolgenden Erläuterungen vielleicht insofern von Interesse sein, als dadurch die nach unserem Wissen nicht gerade umfangreichen Unterlagen zum Thema "Trassierung und Umwelt" ergänzt werden.

Bei den Versuchen zur Verwirklichung technischer Planungen auf dem Verkehrswegesektor ist nämlich hinreichend deutlich geworden, daß auch die technisch noch so perfekte Trasse kaum eine Chance hat, wenn nicht die Einwirkungen auf die Umwelt in angemessener Weise berücksichtigt wurden.

Es ist daher schon bei vorbereitenden Projektstudien notwendig, den gesamten Planungsraum mit seinen Konfliktpotentialen darzustellen, um bei gravierenden Einwänden gegen eine Trassenführung jederzeit Alternativen aufzeigen zu können.

Das von uns gewählte und nachfolgend beschriebene Planungsverfahren kann bei einer solchen Gegebenheit jederzeit mit geringstmöglichem Aufwand reagieren.

## 2. Überblick über den Arbeitsablauf

Allgemein kann die Aufgabenstellung bei großräumigen Neutrassierungen - nicht nur für schienengebundene Schnellverkehrssysteme, sondern auch für andere Landverkehrswege - wie folgt definiert werden:

- Unter Berücksichtigung der topografischen, planungsrechtlichen und ökologischen Gegebenheiten soll zwischen den definierten Anbindungspunkten eine Trasse gefunden werden, welche einerseits den spezifischen Anforderungen der verschiedenen Systeme genügt und andererseits den Belangen des Natur- und Landschaftsschutzes sowie den von der Planung Betroffenen insoweit Rechnung trägt, daß eine Implementierung des Systems als "wahrscheinlich möglich" angenommen werden kann.

Einschränkungen in der Verfolgung des Ziels ergeben sich ausschließlich aus dem vorzugebenden Tiefgang der Untersuchung.

Der Begriff "großräumige Neutrassierungen" geht von einer Entfernung der anzubindenden Punkte - bei schienengebundenen Schnellverkehrssystemen entweder vorhandene Bahnhöfe oder aber verkehrsgünstig gelegene Neuanlagen, bei Autobahnen die erforderlichen Einbindungen in das vorhandene Fernverkehrsnetz - von 50 bis 150 km oder mehr aus.

Da die Zahl der technisch möglichen Varianten einer Verkehrsverbindung umso größer wird, je weiter die Anbindungspunkte voneinander entfernt liegen und je geringer die Anzahl der dazwischen liegenden "Sperrgebiete" - im weitesten Sinne - ist, gilt es, ein Verfahren zu entwickeln, durch welches sichergestellt werden kann, daß die letztlich ausgewählte Linienführung ein vorläufiges Optimum unter allen möglichen Trassierungen darstellt.

Vorläufig deshalb, weil in dem allgemein gültigen Verfahren der Trassierung, der Erarbeitung von verschiedenen Vorentwürfen mit bewertender Auswahl und anschließender vertiefter Bearbeitung, diese letztlich gewählte Trasse noch mehr oder weniger große Veränderungsmöglichkeiten im Grund- und Aufriß bietet.

Mit dieser Zielsetzung und der eingangs definierten Aufgabenstellung ergeben sich die notwendigen Elemente der Fernverkehrswegeplanung:

1. Auswahl möglicher Trassenkorridore - das sind Räume, in welchen eine Trassenführung technisch möglich und sinnvoll ist, durch besondere Hervorhebung der Sperrgebiete - Städte, großräumige Naturschutzgebiete etc. - in den Trassierungsgrundlagen, den topografischen Karten.
2. Vertiefende Erhebung topografischer, ökologischer und planungsrechtlicher Daten in den durch die Korridore gekennzeichneten Planungsräumen mit Aufbereitung und Darstellung in den Trassierungsgrundlagen.
3. Vorentwurf alternativer Linienführungen (Variantennetz) im Grund- und Aufriß einschließlich Kostenberechnung und Ermittlung der Qualitätsmerkmale "Umwelt".
4. Einbringung der erhobenen Daten in ein Bewertungsverfahren mit Trassenauswahl.
5. Vertiefte Bearbeitung der ausgewählten Trasse(n) durch Optimierung in Grund- und Aufriß.
6. Darstellung der Trassierungsergebnisse und Auswertung in einem zusammenfassenden Bericht.

Von diesen sechs Hauptelementen betreffen die ersten vier die sogenannte Vorplanung. Diesem Planungsabschnitt kommt deshalb eine so große Bedeutung zu, weil die einmal gefällte Entscheidung zugunsten der einen oder anderen Trasse nach vertiefter Bearbeitung nur mit zusätzlichen Planungskosten revi-

diert werden kann. Der Entwurfsingenieur sieht sich also vor die Aufgabe gestellt, einerseits keine mögliche Variante bei Kostenüberprüfung und Bewertung auszulassen, was ein Mengenproblem darstellt, andererseits aber die trassenspezifischen Möglichkeiten jeder Variante voll auszuschöpfen, um nicht eine sonst günstige Grundrißlinienführung durch Überlagerung mit einer suboptimalen Gradienten gegenüber anderen Varianten zu benachteiligen. Dies wiederum ist ein Qualitätsproblem, welches in gleichem Maße zu berücksichtigen ist wie das Mengenproblem.

In dieser Situation kommt dem zur Rationalisierung der umfangreichen Arbeiten zu wählenden Programmsystem für den notwendigen Rechneinsatz entscheidende Bedeutung zu:

Während bei kleinräumigen Trassierungen je nach Umfang der durchzuführenden Planung unter Umständen auch Verfahren verwendet werden können, bei denen der neue Verkehrsweg nach Digitalisierung aller Daten eines Planungsraumes mehr oder weniger automatisch gefunden wird, erscheint bei großräumigen Neutrassierungen die manuelle - gleichwohl rechnerunterstützte - Trassensuche als einzige wirtschaftliche Alternative.

Die Qualität einer solchen Planung hängt damit zum großen Teil von dem Geschick und dem geschulten Auge des Entwurfsingenieurs ab, denn ein nicht geringer Anteil der Gründe, die zur Festlegung einer Trassenalternative führen, beruhen auf eben diesen Fähigkeiten, verbunden mit einer durch Erfahrung gewonnenen Beurteilungssicherheit.

Die Rechnerunterstützung in dieser Planungsphase kann nur darin liegen, den Entwurfsingenieur von allen Rechen- und insbesondere Zeichenarbeiten zu befreien, so daß er sich voll auf seine eigentliche Aufgabe, die Beurteilung des Geländes und der Randbedingungen auf ihre Eignung für die Trasse, konzentrieren kann.

Die Festlegung einer Hauptlinienführung im Grundriß unter Beachtung aller Restriktionsflächen ist durch die Beschränkung der Trassierungselemente auf Gerade und Kreisbogen in dem für den Vorentwurf geeigneten Maßstab von 1 : 25 000 schnell und ohne Rechnerunterstützung durchführbar. Nicht so die Herstellung des zu einer Variante gehörenden Höhenplans und die Abschätzung der Investitionskosten für eine dem Gelände angepaßte Gradienten.

Hier wird die Unterstützung durch automatisch ablaufende Zeichen- und Rechenprogramme unentbehrlich:

- Je schneller dem Entwurfingenieur der Höhenplan der Trasse vorliegt, umso eher kann er den gewählten Variantenverlauf bestätigen, ändern oder aber gänzlich verwerfen.
- Verspricht die Geländeformation eine technisch machbare Gradienten, so entscheiden die notwendigen Fahrweegelemente und deren Kosten über die Weiterverfolgung dieses Versuchs.

Das aus einer Vielzahl solcher Versuche entstehende "Variantennetz" muß nun an den Knotenpunkten in Grund- und Aufrißgeometrie zusammengeführt werden, um alle Einzelvarianten zu durchgehenden Trassen miteinander verknüpfen zu können.

Je nach Vielfalt der Trassierungen bestehen in einem solchen Variantennetz die unterschiedlichsten Verbindungsmöglichkeiten.

Um alle möglichen Wege miteinander vergleichen zu können, müssen jedem Abschnitt trassenspezifische Kennzahlen zugeordnet werden, deren Aneinanderreihung und Summation über eine Werttransformationsfunktion zu einer Rangordnung der Wege führt.

Auch hier ist Rechnerunterstützung unentbehrlich.

Ergebnis dieses Planungsabschnitts ist eine Trasse, welche in der Schar der technisch machbaren Trassen die gestellten Anforderungen hinsichtlich der eingangs formulierten Aufgabenstellung am besten erfüllt.

Die weitere Bearbeitung dieser Trasse gemäß den Punkten 5 und 6 des Arbeitsablaufs wurde in dem diesem Aufsatz zugrunde liegenden konkreten Planungsfall aus Gründen der Eliminierung von Fehlerquellen sowohl hinsichtlich der Person des Entwurfingenieurs als auch seiner ihn unterstützenden Programmsysteme von der Vorplanungsbearbeitung getrennt.

Nicht zuletzt spielt natürlich auch die Wirtschaftlichkeit der Aufgabenlösung dabei eine Rolle. Während für die bisher beschriebenen Tätigkeiten arbeitsplatznahe Rechnersysteme, sogenannte Microcomputer, einzusetzen waren und die Berechnungen wegen des noch geringen Tiefgangs unter Verwendung vereinfachender Annahmen durchgeführt werden konnten, wird die Lösung von Opti-

mierungsproblemen sowie die exakte Kostenberechnung unter Verwendung verfeinerter Kostenmodelle, nicht zuletzt auch die Achseinrechnung in die Koordinatensysteme, besser dem Großrechner mit seinen ungleich größeren Speicherungs- und Rechenkapazitäten überlassen.

Die Einzelheiten der vorstehend nur allgemein beschriebenen Tätigkeiten im Rahmen der Vorplanung von großräumigen Neutrassierungen für Landverkehrssysteme sollen nachfolgend erläutert werden.

### 3. Topografische Grundlagen

Einen genügenden Genauigkeitsgrad für eine erste Untersuchung des Planungsraumes auf "Möglichkeits- und Unmöglichkeitsbereiche" bietet die topografische Karte 1 : 50 000.

Die optisch wirkungsvolle Heraushebung der aus dieser Karte hervorgehenden Daten, vornehmlich die Kenntlichmachung von Siedlungsbereichen, geschlossenen Waldgebieten, Naturschutzgebieten etc., läßt dann die Entwicklung der noch systemlos zusammenliegenden "weißen Flächen" zu Trassenkorridoren zu.

Für diesen Trassenkorridor sind sodann die eigentlichen Trassierungsgrundkarten, die topografischen Karten 1 : 25 000 (TK 25), für die Trassierungsarbeit vorzubereiten. Je nach Aufgabenstellung - Planungsstudie oder echte Investitionsentscheidungsgrundlage - kann sich die Erhebung der nicht aus den Karten hervorgehenden Informationen landesplanerischer oder ökologischer Art auf das Niveau der Regional- bzw. Landesplanung sowie der dieser Planungsebene entsprechenden Planungsbehörden konzentrieren, oder aber auch die Planungen der kommunalen Ebene - etwa der Gemeinden - einbeziehen.

Einzelheiten zu diesem wichtigen Planungsabschnitt, welcher den technischen Arbeiten vorausgeht, sind dem Beitrag "Eingang raumplanerischer und ökologischer Daten in den Trassierungsprozeß" von S. Kneißl Rabossi in diesem Heft zu entnehmen.

### 4. Entwurf des Variantennetzes

Die Ausarbeitung der Einzeltrassen in den Korridoren erfolgt auf der Grundlage der nach 2. erhobenen und kartierten Daten.

Folgende Grundsätze können unter bewertender Berücksichtigung der Bedeutung der einzelnen Restriktionsflächen als allgemeine Regeln für großräumige Neutrassierungen benannt werden:

- Naturschutzgebiete sollen von Trassierungen freigehalten werden. Gleiches gilt für Landschaften mit charakteristischer Erscheinungsform, wenn die Aufgabenstellung dies in irgendeiner vertretbaren Weise zuläßt.
- Landschaftsschutzgebiete, größere zusammenhängende Waldgebiete und Naherholungsgebiete sind soweit als möglich zu meiden, können jedoch aufgrund ihrer teilweise raumbedeckenden Ausdehnung keinen absoluten Zwang darstellen.
- Die Berücksichtigung militärischer Sperrgebiete sowie von Bergbau bzw. Abbau beeinflusster Bereiche hängt vom Planungstiefgang ab.
- Zu bebauten Gebieten (auch geplanten) ist ein aus Lärmschutzgründen ausreichend bemessener Abstand einzuhalten.
- Bei Trassierungen in der Nähe von vorhandenen Verkehrsachsen kann das Prinzip der Nutzung "bereits gestörter Bereiche" bisweilen von Vorteil sein.

Bis zu diesem Stand der Untersuchungen für Neutrassierungen gelten unabhängig von der Art des Verkehrsweges die gleichen allgemeinen Grundsätze und Verfahren.

Nun aber kommt es ganz entscheidend darauf an, für welches Landverkehrssystem die Trassierung durchgeführt wird.

Schienengebundene Schnellbahnen wie das elektromagnetische Schnellbahnsystem - ein noch in der Entwicklung befindliches System - oder das altbewährte Rad/Schiene-System - sei es das der Neubaustreckenplanung zugrunde liegende System oder das ebenfalls noch in der Entwicklung befindliche fortschrittliche R/S-System für reinen Personenfernverkehr - haben neben allen Gemeinsamkeiten nämlich grundlegend andere Trassierungsvoraussetzungen, welche sich vornehmlich in den zu verwendenden Trassierungsparametern für die Linienführung niederschlagen, aber auch in grundverschiedenen "Trassierungsphilosophien".

Während die R/S-Systeme als sogenannte erdgebundene Verkehrsmittel gelten, für welche nach wie vor in der Gradientenführung das Prinzip des annähern-

den Massenausgleichs gilt, nimmt das EMS-System wegen seiner typischen Fahrwegform "Aufständerung" (siehe Mölzer/Zurek "Elektromagnetische Schnellbahnsysteme (EMS)" in diesem Heft) hier eine Sonderstellung ein, welche auch Auswirkungen auf Grundriß- und Gradientenführung hat.

Als gravierendes Beispiel sei hier die Problematik der Kreuzungen mit vorhandenen Verkehrswegen genannt.

Im Gegensatz zum EMS-Fahrweg, bei welchem Kreuzungsprobleme bei genügend hoher Gradientenführung nicht auftreten, sind sie beim Rad/Schiene-System im selben Bereich, da der Damm das bevorzugt verwendete Fahrwegelement ist, häufig gegeben.

Die Gradientenführung wird also in hohem Maße davon abhängen, welche Bedeutung man den einzelnen Kreuzungen beimißt:

Entweder ist die Gradientenlage des kreuzenden Verkehrsweges änderbar, in diesem Falle wird man die für die R/S-Trasse günstigste Gradientenhöhe wählen, oder sie ist es nicht; dann muß unter Umständen auch eine sehr ungünstige Gradientenlage als R/S-Fahrweg in Kauf genommen werden.

Besonders nachteilig wirkt sich dieser Zwang im Bereich mittlerer Gradientenhöhen zwischen  $H_g = 5$  und  $H_g = 10$  m aus.

Hingegen unterscheiden sich die Regeln für die Grundrißgeometrie der beiden neuen Technologien - EMS und fortschrittliches R/S-System - nicht so wesentlich voneinander, daß gravierende Unterschiede in der Wahl der Linienführungen oder gar bei der Wahl der Trassenkorridore auftreten.

Demgegenüber können aber bei Systemen, bei denen aufgrund der Transportkonzeption größere Halbmesser und geringere maximale Längsneigungen erforderlich sind, im dichtbesiedelten und topografisch abwechslungsreichen Raum Mitteleuropa bestimmte Landschaften für Trassierungsversuche ausfallen.

Muß in solchen Landschaften dennoch eine Trasse gefunden werden, hat die geringe Flexibilität der Linienführung tiefgreifende Auswirkungen auf die Höhen der zur Verfügung stehenden Fahrwegelemente (hohe Dämme bzw. sogar Aufständerungen, tiefe Einschnitte sowie lange Tunnels) und damit auch auf die Kosten.

Das so unter Beachtung der trassierungstechnischen und ökologischen Zwänge entstehende Variantennetz bildet die Grundmenge aller Wege zwischen den Anbindungspunkten.

Allein mit dem Wissen um die Kosten jeder Trasse sowie deren technischer Machbarkeit und um die Einhaltung aller allgemeinen Trassierungsgrundsätze ist aber im Hinblick auf das Ziel, den Nachweis einer möglichst hohen Wahrscheinlichkeit der Implementierung des Systems, nicht weiterzukommen.

Es gilt daher, weitere Daten für jede Trasse zu erheben, aus welchen einerseits die Verträglichkeit des Entwurfs mit zum Teil divergierenden Forderungen des Umweltschutzes abgelesen, andererseits aber auch eine Wertigkeit der Trassenalternativen untereinander hergestellt werden kann.

## 5. Bewertungskriterien und Bewertungsverfahren

Die Kriterien, nach denen ein Trassenentwurf beurteilt werden kann, sind mindestens so zahlreich wie die Artenvielfalt der Pflanzenwelt.

Der Vergleich ist deshalb nicht ganz so spaßhaft, wie es zunächst den Anschein hat, weil sich der Trassierer bzw. der ihn unterstützende Ökologe tatsächlich vor die Aufgabe gestellt sieht, Äpfel und Birnen miteinander vergleichen zu müssen.

Ein Beispiel soll hier wieder auf das eigentliche, den Trassenentwurf von Schnellverkehrssystemen, zurückführen:

Die Länge einer Trasse, gemessen in Kilometer, soll zusammen mit den Kosten, ermittelt in D-Mark, und den z.B. in einem Abstand von 500 m befindlichen Naturschutzgebieten, gemessen in Quadratkilometer, sowie der Anzahl der gegensinnigen Krümmungswechsel der Trasse, gemessen in Stück, eine Wertzahl ergeben, welche die Qualität der Trasse beschreibt.

Alle möglichen Wege, eine solche Wertzahl zu ermitteln, unterliegen berechtigter Kritik.

Davon kann auch das im Folgenden näher erläuterte Verfahren, welches bei großräumigen Neutrassierungen für ein EMS-System und ein fortschrittliches R/S-System zur Anwendung kam, nicht ausgenommen werden.

Hauptbestandteile des bei den genannten Trassierungen verwendeten Bewertungsverfahrens sind

- die Ermittlung von Indikatoren ökologischer und systemspezifischer Art zur Beschreibung der Eigenschaften einer gewählten Linienführung,
- die Ermittlung eines "Nutzenbeitrags" aus den Indikatorsummen über eine Werttransformationfunktion sowie
- die Gewichtung der Nutzenbeiträge und die Ermittlung der sich daraus ergebenden Rangfolge von alternativen Linienführungen.

Die Wahl der Indikatoren hängt von den zur Verfügung stehenden Daten gemäß Abschnitt 2. ab.

In dem konkreten Planungsfall wurden z.B. Bänder von unterschiedlicher Breite zwischen 500 m und 1500 m in die Trassenachsen gelegt, in welchen der Einfluß der Trasse hinsichtlich

- der Lärmbelästigung (2)
- des ökologischen Systems (3)
- der Erholungsnutzung (4)
- des Natur- und Landschaftsschutzes sowie (5)
- der Landnutzung (des Landverbrauchs) (6)

untersucht wurde.

Diese Indikatorenauswahl geschah im Hinblick auf die begrenzten Möglichkeiten der Datenerhebung in dem zugrunde gelegten recht großen Planungsmaßstab, welche sich im wesentlichen in der Klassifizierung ökologisch und planungsrechtlich unterschiedlich zu bewertender Flächen niederschlug.

Aufgrund der prognostizierten Schallabstrahlung der technologisch neuartigen Verkehrssysteme konnte z.B. hinsichtlich des Indikators 2 - Lärmbelastung - davon ausgegangen werden, daß eine solche im wesentlichen nur in bebauten Gebieten innerhalb eines relativ schmalen Bandes von 500 m auftreten würde, während ein Einfluß auf Natur- und Landschaftsschutzgebiete noch in einem Band von 900 m Breite dezidiert würde. Beeinträchtigungen bezüglich der Erholungsnutzung wurden sogar noch in einer Entfernung von 750 m zur Trasse, mithin in einem Band von 1500 m Breite angenommen. Als für die Erholung nutzbare Fläche wurden dabei alle Flächen mit Ausnahme schon bebauter bzw. sonstiger für die Erholung aufgrund der Gegebenheiten nicht

nutzbarer Flächen, wie großflächige Verkehrsanlagen (Autobahnkreuz, Gleisanlagen) und neben anderen z.B. auch Einrichtungen der Ver- und Entsorgung, angesehen.

Je nach den landschaftlichen Gegebenheiten der Trassenvarianten ergeben sich so Einflußkennzahlen, welche dann zusammen mit dem Indikator "Investitionskosten" die Wertigkeit einer Trasse bestimmen.

Aber selbst zwei in Grund- und Aufriß völlig identische Trassenalternativen können je nach Art des für sie vorgesehenen Verkehrsmittels unterschiedliche Wertigkeiten aufweisen, da ja auch z.B. der Landverbrauch in das Verfahren mit einbezogen wird.

Ein EMS-System mit häufig aufgeständerter Talwegform wird wesentlich weniger Grund und Boden in Anspruch nehmen, als ein R/S-System mit Dammfahrtweg.

Hier wird die eingangs erwähnte Kritikfähigkeit jedes Bewertungssystems deutlich:

Bei Beachtung nur bestimmter Indikatoren würde im Extremfall einmal die Variante A und ein anderes Mal die Variante B bevorzugt.

Nicht berücksichtigt werden hier jedoch Gegebenheiten, welche je nach Beobachtungsstandpunkt die Vorzugswürdigkeit einer Alternative erhöhen, die der anderen wiederum verringern würde; wären sie in die Bewertung mit einbezogen worden:

Gemeint sind hier in Zahlen schlecht erfaßbare, in der Realität jedoch oft ausschlaggebende Faktoren, z.B. die "Durchlässigkeit" bzw. "Riegelwirkung" der Trassen. Beiden, für sich genommen stichhaltigen Argumenten können Gegenargumente wie "Betonarchitektur" bzw. "Landschaftseinpassung" gegenübergestellt werden.

Jede aus einem Bewertungsverfahren hervorgegangene Trasse für das eine oder das andere System kann sich so bei dem Versuch der Umsetzung in die Realität als nicht durchsetzbar erweisen.

Nun gibt es wie immer mehrere Möglichkeiten, einer solchen "Planungskatastrophe" zu begegnen:

- Die erste, aber nach unserer Ansicht schlechteste Möglichkeit besteht darin, die Planung zu politisieren und auch gegen alle Widerstände durch-

zusetzen. Beispiele auch von dieser Vorgehensweise sind bekannt.

- Die zweite Möglichkeit bietet sich in der schnell und einfach durchzuführenden kleinräumlichen Trassenverschiebung, wie sie im Beitrag CASPARY/HEISTER/WELSCH "Bearbeitung des Vorentwurfs für ausgewählte Varianten mit dem Programmsystem TROP" in diesem Heft beschrieben wird.
- Genügt auch eine solche Verschiebung nicht, weil z.B. ein ganzes Tal aufgrund neuerer Entwicklungen nicht mehr "verplanbar" ist, bleibt nur noch die Möglichkeit, die neuen Indikatoren in das Bewertungssystem einzuführen und das gesamte Variantennetz neu zu bewerten, wobei sich unter Umständen eine völlig andere Hauptlinienführung ergibt.

Damit ist das Hauptproblem der bewertenden Trassenauswahl hinreichend genau definiert:

Jede Planung muß neueren, vom Trassierer oder auch vom Auftraggeber nicht unbedingt vorhersehbaren Entwicklungen angepaßt werden können.

Vielfach wird bei solchen Gegebenheiten das Kostenargument ins Feld geführt, mit welchem sich bei entsprechender wirtschaftlicher Lage in der Tat vieles durchsetzen läßt.

Das gesamte Bewertungssystem wurde daher modular aufgebaut; es können ohne großen Kostenaufwand sowohl neue Indikatoren zur Beurteilung dieser Trasse eingebracht werden, wie dies bei der R/S-Studie durch die Bewertung der "Flüssigkeit" der Trassierung in Grund- und Aufriß geschehen ist, es können aber auch die bestehenden Indikatoren in ihrer Wertigkeit verändert werden, um so die Sensibilität eines Bewertungsergebnisses zu überprüfen.

Es wird durch dieses rechnergestützte Verfahren somit sichergestellt, daß bei großräumigen Neutrassierungen jedem ernstzunehmenden Einwand sofort eine andere technische Lösung gegenübergestellt werden kann, was im Hinblick auf die eingangs formulierte Aufgabenstellung einer "möglichst hohen Wahrscheinlichkeit" der Implementierbarkeit unverzichtbar erscheint.

Bei anderen als technisch-sachlichen bzw. ökologischen Einwänden, welche es bei allem Verständnis für Umweltschutz in immer mehr zunehmendem Maße gibt, bleibt die Beantwortung nach wie vor der Politik überlassen.

Obwohl die Höhe der Kosten nicht mehr das allein entscheidende Kriterium für die Wahl eines bestimmten Schnellbahnsystems oder einer bestimmten Trassenvariante darstellt, ist eine genaue Kenntnis der zu erwartenden Gesamtkosten für die Realisierung von ausschlaggebender Bedeutung. Auch in der Diskussion auf dem Weg zur Entscheidung liefert der Kostenvergleich zumindest vordergründig als objektiver Maßstab einen wichtigen Beitrag. Die Arbeiten für den Vorentwurf optimaler Trassierungen müssen daher die Ermittlung der Investitionskosten für die ausgearbeitete Trassenführung beinhalten. Unter Investitionskosten werden hier alle Kosten für die technische Ausführung des Verkehrsweges unter Einschluß der Grunderwerbskosten verstanden.

Das hier beschriebene detaillierte Kostenmodell bezieht sich auf die Kostenberechnungen im Rahmen der Arbeiten zum Vorentwurf. Für die Vorplanung kann von einem stark vereinfachten Kostenmodell ausgegangen werden, in dem die Kosten als alleinige Funktion eines Parameters, etwa des Höhenunterschieds zwischen Fahrweg und Gelände, angesehen werden.

## 1. Fahrwegspezifikationen

Um die Investitionskosten eines Verkehrsweges zu ermitteln, wird dieser zweckmäßigerweise in einzelne Fahrwegelemente ausgegliedert.

Der bestimmende Parameter sowohl für die Festlegung der Fahrwegform als auch für die Berechnung der Investitionskosten ist die Höhe der Trasse über der Geländeoberkante.

Die diversen Fahrwegformen sind durch ihren Regelquerschnitt und die zugehörigen spezifischen Kosten in den technischen Vorgaben (Fahrwegspezifikationen) eines Systems (TRANSRAPID EMS, 1979; KARNER (STÖCKL), 1980) festgelegt, wodurch bereits ein grobes Kostenmodell vorgegeben ist.

Die Fahrwegelemente des Elektromagnetischen Schnellbahnsystems (EMS) und des Rad/Schiene Schnellbahnsystems (R/S) weisen zwar systembedingte Unter-

schiede auf, die Form des Kostenmodells bzw. die Methodik der Kostenberechnung wird dadurch aber nicht beeinträchtigt. Man kann sich daher begnügen, die Gliederung des Fahrweges in Elemente in Abhängigkeit von der Trassenhöhe nur am Beispiel des R/S-Systems aufzuzeigen.

## 1.1 Anwendungskriterien

Als Bezugshöhe  $h$ [m] für die Fahrwegelemente wird die Differenz zwischen der Höhe der ideellen Planie und der Höhe der Geländeoberkante eingeführt. Für die verschiedenen Höhenbereiche sind die Regelquerschnitte entsprechend den technischen Vorgaben wie folgt festgelegt:

- Damm

$$0 \text{ m} \leq h \leq + 15 \text{ m}$$

- Einschnitt

$$0 \text{ m} \geq h \geq - 50 \text{ m}$$

(siehe auch Tunnelkriterium)

- Aufständering

$$+ 7,5 \text{ m} \leq h \leq + 50 \text{ m}$$

Die Aufständering beginnt in der Regel erst ab einer Höhe  $h \geq + 15 \text{ m}$ , jedoch kann in begründeten Einzelfällen, etwa ein kurzes Dammstück zwischen zwei Aufständeringsbereichen, der aufgeständerte Fahrweg bei einer Höhe  $h \geq + 7,5 \text{ m}$  beginnen.

- Tunnel

Befindet sich die Trasse auf einer Länge von mehr als 250 m mit einer Höhe  $h \leq - 30 \text{ m}$  in der Einschnittlage, so sind Tunnelbaumaßen zu ergreifen. Der Tunnelanfang liegt dann bei  $h = - 20 \text{ m}$ .

- Stützmauer

$$- 6 \text{ m} \geq h \geq - 50 \text{ m}$$

Stützmauern sind in der Regel unwirtschaftlicher als Einschnitte und werden daher nur in Ausnahmefällen, z.B. nicht ausreichender Geländebreite, angewendet.

- Sonderbauwerke

$$h > 7,5 \text{ m}$$

Sonderbauwerke werden nur zur Überquerung großer Flüssen, die mit der

Regelaufständerung nicht bewerkstelligt werden kann, eingesetzt.

## 2. Kostenarten und Kostenquerschnitte

Wie eingangs bereits kurz dargestellt, ist durch die Fahrwegspezifikation bereits ein Kostenmodell definiert. Die spezifischen Kosten  $K_{Sp}$ [DM/m] eines Elements ergeben sich danach aus einem funktionalen Zusammenhang mit der Trassenhöhe  $h$  über dem Gelände

$$K_{Sp} = f(h) .$$

Diese Darstellung läßt jedoch die Geländequerneigung unberücksichtigt, wodurch es vor allem bei der Massenberechnung zu systematischen Fehlern kommen kann.

Aus diesem Grund ergibt sich die Notwendigkeit einer Erweiterung der Berechnungsformeln für die einzelnen Kostenelemente durch Einbeziehung der Querneigung  $m$ . Der funktionale Zusammenhang für die spezifischen Kosten lautet dann

$$K_{Sp} = f(h,m) .$$

Unter Berücksichtigung dieses Zusammenhangs und des Aufbaus des Informationsmodells aus Geländequerprofilen sind daher für jedes Fahrwegelement die Querschnittsformeln aufzustellen.

Beim R/S-System werden die Gesamtinvestitionskosten dazu folgendermaßen aufgegliedert:

Gesamtkosten = Grunderwerbskosten +  
Damm bzw. Einschnittskosten (Kosten für Erdarbeiten) +  
Bauwerkskosten +  
Kosten für den Oberbau

Diese Kostenarten werden nachfolgend an Beispielen erläutert, wobei die auftretenden Abkürzungen folgende Bedeutung haben:

1 : m = Geländequerneigung  
1 : n = Böschungsneigung  
 $H_G$  = Geländehöhe  
 $H_T$  = Trassenhöhe

S = Gleismittenabstand  
 S ist in Abhängigkeit vom Radius zu bestimmen (Verbreiterung  
 Dammkrone bzw. der Einschnittsohle durch Gleisquerneigung  
 im Radius):

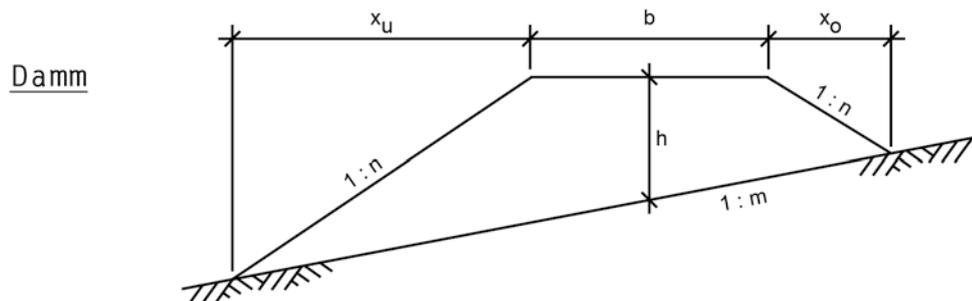
S[m]	R[m]
4,4	10 000 ( $\hat{=}$ Gerade)
4,9	3 250 ( $R_{\min}$ )

## 2.1 Grunderwerbskosten

Mit der Grunderwerbsbreite  $B_G$  und dem Quadratmeterpreis für den Grunderwerb  $K_Q$  erhält man die Grunderwerbskosten im Querschnitt zu

$$K_G = B_G \cdot K_Q \cdot$$

Am Beispiel Damm wird die Bestimmung der Grunderwerbsbreite aufgezeigt:



$$h = H_T - H_G - 1,0 \text{ m} ; \quad b/2 = 4,35 \text{ m} + s/2$$

a)  $m \cdot h \geq b/2$  (Normalfall)

$$B_G = 8,70 \text{ m} + 3,0 \text{ m} + x_u + x_o + s$$

$$x_u = \frac{m \cdot h + b/2}{m - n} \cdot n ; \quad x_o = \frac{m \cdot h - b/2}{m + n} \cdot n$$

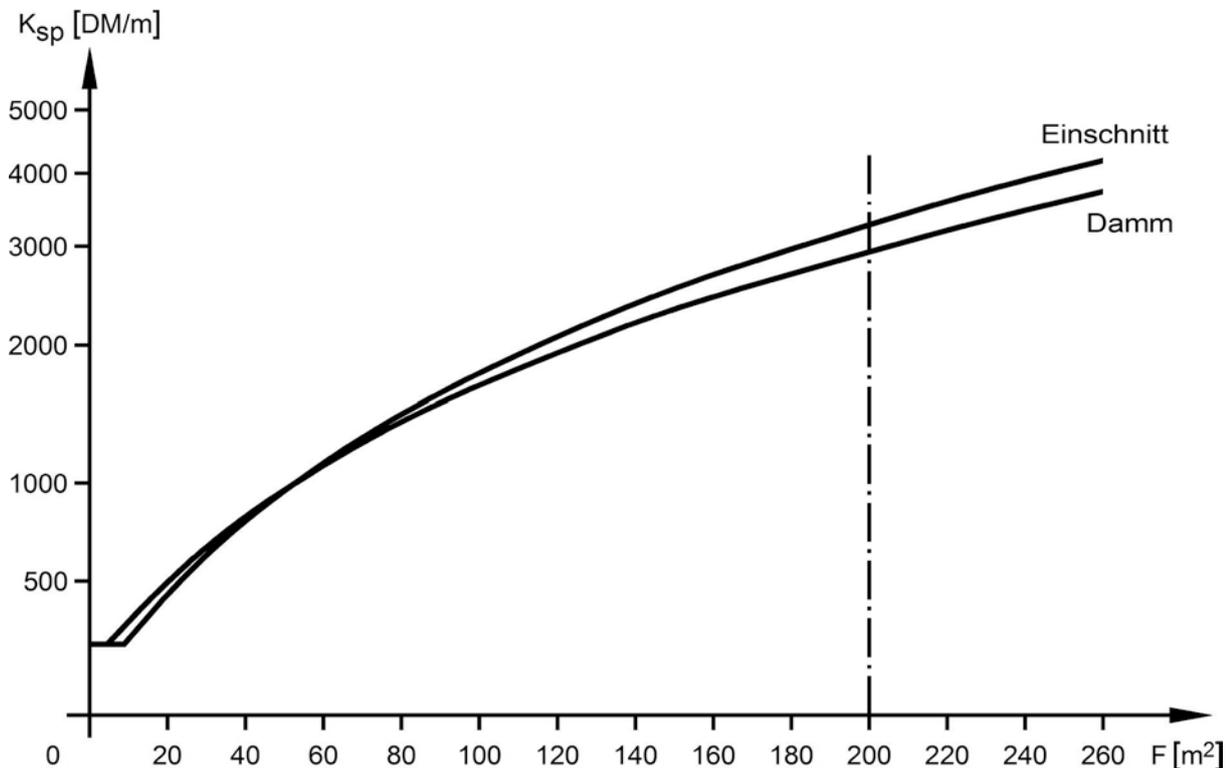
b)  $m \cdot h < b/2$  (Damm + Einschnitt)

$$B_G = 8,70 \text{ m} + 3,0 \text{ m} + x_u + \bar{x}_0$$

$$\bar{x}_0 = \frac{b/2 + 1 - m \cdot h}{m - n} \cdot n \quad ; \quad x_u \text{ wie a)}$$

## 2.2 Kosten für Damm- bzw. Einschnitterstellung (Kosten für Erdarbeiten)

Der Kubikmeterpreis für Erdarbeiten ist nach den technischen Vorgaben abhängig von dem Flächeninhalt der Querschnittsflächen für den Einschnitt (Abtrag) bzw. Damm (Auftrag). Die zu bestimmten Flächen  $F(h)$  gehörenden Kosten  $K_{Sp}$  lassen sich in einem Diagramm auftragen.



Eine Approximation der Kurven durch kubische Parabeln über eine Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen liefert flächenabhängige Kostenfunktionen, die für eine automatische Kostenberechnung mit einem Rechenprogramm geeignet sind.

Die Querschnittskosten  $K$  ergeben sich dann aus den Kostenfunktionen  $K_E$  und  $K_D$  für den Einschnitt und den Damm zu

$$K = K_E (F_E) \quad \text{bzw.} \quad K = K_D (F_D)$$

mit  $F_E =$  Querschnittsfläche im Einschnitt

und  $F_D =$  Querschnittsfläche beim Damm .

Die Berechnung der Querschnittsflächen wird am Beispiel Damm demonstriert:

a)  $m \cdot h \geq b/2$  (Normalfall)

$$F_D = b \cdot h + n \cdot h^2 + (b/2 + n \cdot h)^2 \cdot \frac{n}{m^2 - n^2}$$

$h, b$  wie unter 2.1 a)

b)  $m \cdot h < b/2$  (Damm + Einschnitt)

$$F_D = \frac{c^2}{2(m - n)} \quad c = b/2 + m \cdot h$$

$$F_E = \frac{(b/2 + 1 - m \cdot h)}{2(m - n)}$$

### 2.3 Bauwerkskosten

Unter dem Begriff Bauwerkskosten sind die Elemente Aufständering, Tunnel, Sonderbauwerke, Stützmauer und Kreuzungsbauwerke zusammengefaßt.

Die Kosten für Aufständering, Stützmauer und Kreuzungsbauwerke werden durch Interpolation aus Matrizen entnommen, die die Kosten in Abhängigkeit von der Höhe darstellen. Tunnel und Sonderbauwerke haben konstante Querschnittskosten.

### 2.4 Oberbau

Die Kosten für den Oberbau werden durch einen konstanten, kilometerbezogenen Zuschlag berücksichtigt.

### 3. Rechenprogramm: Investitionskosten

An das Kostenberechnungsprogramm sind die folgenden Anforderungen zu stellen:

- Genauigkeit: Es ist ein Kostenmodell aufzustellen, das die Summation systematischer Fehler infolge von Vereinfachungen weitgehend vermeidet.
- hoher Automationsgrad: Um eine zügige Bearbeitung zu gewährleisten, muß das Programm in der Lage sein, an den Berechnungsstellen aus den vorhandenen Angaben zur Gradientenabhängigkeit von den jeweiligen Geländeparametern der erforderlichen Regelquerschnitt selbständig zu bestimmen. Eine Eingabemöglichkeit durch den Bearbeiter muß alternativ gegeben sein.
- hoher Informationsgrad: Für die Beurteilung einer Trasse ist die Aufstellung einer Statistik über die wichtigsten Streckencharakteristika wertvoll, so daß die Gesamtkosten nach den Anteilen der einzelnen Kosten- und Fahrwegarten aufzuschlüsseln sind. Außerdem müssen dem Ergebnisprotokoll an jeder Berechnungsstelle die Querschnittskosten und die bis dahin angelaufenen Gesamtkosten entnommen werden können.

Aus Anlaß der EMS-Planungsstudie (1980) und der R/S-Planungsstudie (1981) ist ein Kostenprogramm für die Berechnung der Investitionskosten entsprechend der aufgeführten Anforderungen entwickelt worden.

Die den Berechnungen zugrunde liegenden Ausgangskosten, z.B. die Durchschnittswerte für einen Quadratmeter Grunderwerb, für einen Kubikmeter Erdbewegung oder für die Baukosten, sind wegen zeitlicher und örtlicher Schwankungen mit einer großen Unsicherheit behaftet. Die Änderungen wirken sich aber ähnlich einem Skalierungsfaktor auf alle Berechnungen gleich aus, so daß die zur Beurteilung unterschiedlicher Varianten wichtigen relativen Kostenunterschiede bestehen bleiben.

### 3.1 Methodik der Kostenberechnung

Die technischen Vorgaben und die beschriebenen Fahrwegspezifikationen legen die Querschnittsformen des Fahrwegs mit den zugehörigen Grundkosten und die Kosten für die Kreuzungsbauwerke fest. Der Verlauf der Trasse ist in den genannten Studien an diskreten Stationspunkten durch Querprofile mit einem mittleren Abstand von  $\sim 120$  m festgelegt. Diese Stationspunkte wurden so gewählt, daß das Gelände zwischen zwei Stationen linear interpoliert werden kann. Die Methodik der Kostenberechnung unterscheidet sich für beide Studien nur unerheblich. Unterschiede in der Programmstruktur ergaben sich hauptsächlich dadurch, daß für das Rad-Schiene Schnellbahnsystem neben den Regelquerschnitten Einschnitt/Anschnitt und Aufständigung zusätzlich der Regelquerschnitt Damm zu berücksichtigen und eine genaue Massenbilanz aufzustellen war. Die Problematik der Kostenberechnung soll daher am Beispiel für das Rad-Schiene System aufgezeigt werden.

Der Ablauf der Berechnungen folgt aus dem gewählten Informationsmodell (Darstellung der Trasse durch Querprofile), aus dem die für die Kostenberechnung entscheidenden Angaben zur Gradienten für jedes in den Berechnungsabschnitt fallende Querprofil, nämlich die Höhe der Trasse, die Geländehöhe und die Geländequerneigung, entnommen werden. Aus einem weiteren Speicher werden die Kennziffern für die in den Berechnungsabschnitt fallenden Kreuzungen mit anderen Verkehrswegen und der jedem Querprofil zugeordnete Kurvenradius der Trasse gelesen. Diese Angaben werden über ein spezielles Programm in einen gemeinsamen Datensatz eingeordnet, der ohne weitere manuelle Modifikationen als Eingabedatei für eine automatische Investitionskostenberechnung mit dem Kostenprogramm geeignet ist. Wie Voruntersuchungen ergeben haben, führt die Vernachlässigung der Geländequerneigung bei der Kostenberechnung zu systematischen Fehlern, vor allem bei der Berechnung der Grunderwerbsbreite und bei der Massenberechnung. Das Programm berücksichtigt daher bei der Berechnung der Querschnittsflächen und der Grunderwerbsbreite die Geländequerneigung.

In Abhängigkeit von der Differenz zwischen Trassen- und Geländehöhe wird für jeden Stationspunkt, an dem ein Querprofil ausgemessen worden ist, automatisch der geforderte Regelquerschnitt festgelegt. Dabei wählt das Programm zwischen Aufständigung, Damm, Einschnitt/Anschnitt und Einschnitt mit Stützmauern. Von den letzten beiden Alternativen wird die jeweils wirtschaftli-

chere Lösung gewählt. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, durch Eingabe entsprechender Kennziffern in die Eingabedatei die automatische Wahl auszu-schalten und einen bestimmten Ausbauquerschnitt, der aus anderen als wirt-schaftlichen Gründen erforderlich ist, fest vorzugeben. Anfang und Ende von Talbrücken und Tunnelstrecken sind ebenfalls durch Kennziffern in der Ein-gabedatei festzulegen. Für einen so bestimmten Regelquerschnitt werden dann die Gesamtkosten pro Meter, die sich aus den Kostenarten Erdbau-, Grunder-berbs-, Bauwerk- und Oberbaukosten zusammensetzen, berechnet. Als bestimm-ende Parameter gehen dabei neben dem Höhenunterschied zwischen Fahrbahn und Gelände die Geländequerneigung und der Ausbauradius in die Berechnung ein. Aus den so gewonnenen Querschnittskosten zweier benachbarter Stationen wer-den dann durch geeignete Interpolation (siehe Abschnitt 3.2) und durch Mul-tiplikation mit dem Stationsabstand die Investitionskosten für die Strecke zwischen den beiden Stationen bestimmt. Zu den Ausbaurkosten zwischen zwei Stationen werden die in diesem Bereich zusätzlich anfallenden Kosten für eventuelle Kreuzungsbauwerke addiert. Die Summe über alle Stationsabstände im Berechnungsabschnitt ergibt dann die Gesamtinvestitionskosten.

In zusätzlichen Vektoren werden die bei der Kostenabrechnung anfallenden Teilsummen der einzelnen Kostenarten und die Weglängenanteile der Fahrweg-arten für eine später aufzustellende Kosten- und Längenstatistik der Trasse gebildet. Da bei der Rad-Schiene Studie Massenausgleich angestrebt wird, werden die für die Ermittlung der Erdbaukosten durchzuführenden genauen Mas-senerhebungen für Auf- bzw. Abtrag laufend aufsummiert und zur Erstellung einer Massenbilanz genutzt.

Die exakte Masse zwischen zwei verschieden großen parallelen Flächen  $F_1$  und  $F_2$  im Abstand  $L$  ergibt die Simpson'sche Formel

$$V = \frac{L}{6} (F_1 + 4F_m + F_2)$$

mit  $F_m$  als Querschnittsfläche, die bei  $\frac{L}{2}$  zu berechnen ist. Als Näherungsfor-mel wird üblicherweise die Formel

$$V = L \cdot \frac{F_1 + F_2}{2}$$

benutzt, die wie in OSTERLOH (1974) nachzulesen ist, für langgestreckte Kör-per völlig ausreichend genau ist. Der Fehler ist prinzipiell positiv, be-

trägt aber normalerweise im Schlußergebnis weniger als 1 %. Diese herkömmliche Methode der Massenberechnung wird auch in den Richtlinien für die elektronische Bauabrechnung, Ausgabe 1972 (REB, 1972), empfohlen. Aus diesen Gründen wurde die Massenberechnung nach der Näherungsformel auch für dieses Programmsystem beibehalten.

### 3.2 Interpolationsverfahren für den zwischen zwei Stationen liegenden Streckenabschnitt

Die vorgegebenen Stationspunkte längs der Achse sind so gewählt, daß das dazwischenliegende Gelände linear interpoliert werden kann. Das bedeutet jedoch nicht, daß auch die Kostenfunktion einen entsprechenden linearen Verlauf zeigt. Diese weist dagegen an den Übergangsstellen von den Regelquerschnitten Aufständigung nach Damm, Damm nach Einschnitt und Einschnitt nach Einschnitt mit Stützmauern erhebliche Unstetigkeitsstellen auf. Darüber hinaus ändert sich im aufgeständerten Bereich bei einer Fahrbahnhöhe von 20 m über dem Gelände die Grunderwerbsbreite sprunghaft. Lediglich für den Fall, daß sich der Regelquerschnitt zwischen zwei Stationen nicht ändert, ist eine lineare Interpolation gerechtfertigt, d.h. die Kosten für den Streckenabschnitt berechnen sich durch Multiplikation des Stationsabstandes mit dem Mittel aus den beiden benachbarten Querschnittskosten. In allen anderen Fällen werden die Übergangsstellen als Zwischenquerprofile durch lineare Interpolation der Höhenunterschiede der Geländequerneigungen und der Ausbauradien programmintern bestimmt. Zu beiden Seiten dieser Zwischenquerprofile werden die Kosten dann nach unterschiedlichen Kostenfunktionen berechnet. Die Konstruktion von Zwischenquerprofilen ist auch für die Massenberechnungen und für die Aufstellung der Längenstatistik notwendig.

Angangs- und Endpunkte von Tunnel- bzw. Brückenbauwerken müssen vom Programm her mit Querprofilen zusammenfallen. Gegebenenfalls sind fingierte Querprofile in die Eingabedatei für das Kostenberechnungsprogramm einzufügen. Die Kosten in diesen Bereichen sind eine alleinige Funktion der Streckenlänge.

Die Kosten für Kreuzungsbauwerke hängen von der Gradientenhöhe und von Größe und Art des zu kreuzenden Objekts ab. Die Gradientenhöhe an der Kreuzungsstelle wird durch lineare Interpolation der benachbarten bekannten Höhen gewonnen. Für die Länge des Kreuzungsbereichs wird die normale Kosten- und Massenberechnung unterbrochen. Alle anfallenden Kostenarten sind bereits

in den Kostenvorgaben für die Kreuzungsbauwerke enthalten.

Die Berechnung der Achslängen erfolgt über die gradlinige Verbindung zwischen den Querprofilen, wodurch ein Bogenelement bei einem durchschnittlichen Abstand von 120 m zwischen zwei Stationen um ca. 2 mm verkürzt wird. Bei einer Gesamtplanungslänge von etwa 190 km bei den angesprochenen Studien ist ein systematischer Einfluß auf die Kostenrechnung nicht zu befürchten.

### 3.3 Aufschlüsselung der Berechnungsergebnisse

In einer Ergebnisübersicht druckt das Programm neben der Höhe der Gesamtinvestitionskosten und der Gesamtlänge des Berechnungsabschnitts eine Kosten- und Längenstatistik aus. Bei der Kostenstatistik werden in einer Matrix mit den Eingangsgrößen Kostenart (Bauwerks-, Grunderwerbs-, Erdbau- und Oberbaukosten) und Fahrwegart (Aufständigung, Brücken, Damm, Einschnitt, Kreuzungsbauwerke, Stützmauer und Tunnel) die Anteile an den Gesamtkosten sowohl in Absolutbeträgen als auch in Prozent ausgewiesen.

Die Gesamtlänge des Berechnungsabschnitts wird ebenfalls in die einzelnen Fahrwegarten aufgeschlüsselt. Die ausgewiesene Anzahl der Kreuzungsbauwerke berücksichtigt nur die kostenwirksamen Kreuzungen.

In der Massenbilanz sind die Gesamtmassen für den Aushub bzw. für die Deponie und die Differenz aufgeführt. Den Abschluß der Ergebnisübersicht bildet die Angabe zum Gesamtflächenverbrauch, der aus den Grunderwerbskosten berechnet wird.

An diese Übersicht schließen sich die Ergebnisse der Einzelberechnungen für jedes Querprofil an. Neben den eingelesenen Trassen- und Geländedaten werden von Station zu Station die Kennziffern für den gewählten Regelquerschnitt, die daraus resultierenden Querschnittskosten, die Kosten für den Abschnitt zur davorliegenden Station einschließlich eventueller Kreuzungskosten und die laufende Summe der Investitionskosten bis zur jeweiligen Station ausgedruckt.

Die folgenden Seiten zeigen den Ergebnisausdruck für eine Kostenberechnung.

Einzelheiten hinsichtlich der Benutzung des hier beschriebenen Programmsystems zur Investitionskostenberechnung findet man in STÖCKL, R. u. G. EITEL (1981).

KOSTENBERECHNUNG FUER DIE R/S-STUDIE FRANKFURT-PARIS  
(PREISSTAND: MITTE 1979)

DIE ANGABEN ENTHALTEN: KOSTEN FUER DEN FAHRWEG  
KOSTEN FUER DEN GRUNDERWERB 200M/M\*\*2)  
KOSTEN FUER ERDMASSENBEWEGUNGEN  
KOSTEN FUER STUETZMAUERN  
KOSTEN FUER TUNNELBAUWERKE  
KOSTEN FUER BRUECKENBAUWERKE  
KOSTEN FUER KREUZUNGSBAUWERKE

DIE VERWENDETEN ABKUEERZUNGEN HABEN FOLGENDE BEDEUTUNG:

QP.....QUERPROFILNR.  
STAT.....STATION  
DQP.....QUERPROFILABSTAND  
HOEHE...HOEHE DER IDEELLEN PLANIE UEBER GELAENDE  
STW.....GELAENDEQUERNEIGUNG IN ALTGRAD  
R.....KURVENRADIUS  
K1.....KENNZAHL FUER DEN REGELQUERSCHNITT  
K2.....KENNZAHL FUER TUNNEL- BZW. BRUECKENBAUWERK  
D.....ABSTAND DES QUERPROFILS VOM LETZTEN KREUZUNGSBAUWERK  
SKL.....KLASSIFIZIERUNG DES KREUZUNGSOBJEKTES  
QKO.....QUERSCHNITTSKOSTEN  
STKO.....KOSTEN ZWISCHEN 2 QUERPROFILIEN  
SSKO.....LAUFENDE SUMME DER KOSTEN

GESAMTLAENGE: 12.2 KM

88.762 MIO DM

-GESAMTABSCHNITTSKOSTEN:

-ZUSAMMENSTELLUNG DER KOSTEN (IN MIO DM):

FAHRWEG	I	BAUWERK	ERDBAU	GRUNDERWERB	OBERBAU	I	SUMME	%ANTEIL
AUFSTAENDERUNG	I	8.704	*	0.159	0.370	I	9.233	10.4
BRUECKEN (R/S)	I	21.927	*	*	0.481	I	22.408	25.2
DAMM	I	*	19.105	5.147	5.863	I	30.115	33.9
EINSCHNITT	I	*	12.793	2.780	3.087	I	18.660	21.0
KREUZUNGSBAUWERKE	I	8.346	*	*	*	I	8.346	9.4
STUETZMAUER	I	0.000	0.000	0.000	0.000	I	0.000	0.0
TUNNEL	I	0.000	*	*	0.000	I	0.000	0.0
SUMME	I	38.976	31.898	8.086	9.801	I	88.762	100.0
%ANTEIL	I	43.9	35.9	9.1	11.0	I	100.0	0.0

-ZUSAMMENSTELLUNG DER LAENGENANTEILE (IN KM):

FAHRWEG	I	[KM]	%ANTEIL	ANZAHL
AUFSTAENDERUNG	I	0.460	3.8	*
BRUECKEN (R/S)	I	0.598	4.9	19.
DAMM	I	7.283	59.8	*
EINSCHNITT	I	3.835	31.5	*
KREUZUNGSBAUWERKE	I	*	*	13.
STUETZMAUER	I	0.000	0.0	*
TUNNEL	I	0.000	0.0	*
SUMME	I	12.176	100.0	32.

-MASSENBILANZ:

IN [TSD. M**3]	AUSHUB	DEPONIE	MASSENUEBERSCHUSS
792.9	1277.1	-484.2	

-FLAECHEVERBRAUCH: 40.43 HA

K1: 1...AUFSTAENDERUNG 2...EINSCHNITT/ANSCHNITT 3...STUETZMAUERN  
 4...DAMM 6...TUNNEL- 7...BRUECKENZWISCHENPUNKT  
 K2: 1...TUNNELANFANG 2...TUNNELENDE 3...BRUECKENANFANG 4...BRUECKENENDE  
 KREUZ. MIT STRASSEN SKL: 1...BAB 2...B=13.6 M 3...B=11.5 M 4...B=6.0 M 5...B=4.0 M  
 KREUZ. MIT GEWAESERN SKL: 6...BACH 7...B=10.0 M 8...B=18.0 M 9...B=33.0 M  
 KREUZ. MIT EISENBAHN SKL: 10

-TRASSENABSCHNITT: VON STATION..... 26+ 60 BIS STATION..... 38+237 ; SEITE: 2

QP	STAT	DQP [M]	HOEHE [M]	STW [GRD]	R [M]	K1	K2	D [M]	SKL	QKO [DM]	STKO [MIO DM]	SSKO [MIO DM]
1320	26+ 60	0.	12.2	0.0	10000.	4	0	0.	0	7053.	0.000	0.000
1330	26+290	230.	9.7	-0.0	10000.	4	0	130.	4	5472.	3.329	3.329
1340	26+556	266.	6.5	0.0	10000.	4	0	85.	4	3811.	1.576	4.906
1350	26+830	274.	4.8	-0.1	10000.	4	0	130.	6	3027.	1.743	6.649
1360	27+241	411.	8.7	0.0	10000.	4	0	210.	4	4954.	1.977	8.626
1370	27+722	481.	12.5	0.2	10000.	4	0	90.	6	7216.	5.379	14.005
1380	27+786	64.	10.0	-6.6	10000.	4	0	260.	10	5835.	0.419	14.424
1390	27+847	62.	6.1	-4.7	10000.	4	0	175.	2	3658.	0.293	14.717
1400	27+890	43.	4.1	-3.8	10000.	4	0	0.	0	2722.	0.136	14.853
1410	28+ 36	146.	3.3	-3.6	10000.	4	0	0.	0	2400.	0.373	15.226
1420	28+160	124.	0.1	-0.4	10000.	4	0	45.	4	1360.	1.575	16.801
1430	28+288	129.	-3.4	-1.5	10000.	2	0	0.	0	2573.	0.229	17.031
1440	28+327	39.	-5.6	-3.8	10000.	2	0	0.	0	3714.	0.123	17.153
1450	28+405	78.	-7.0	-2.9	10000.	2	0	0.	0	4506.	0.319	17.473
1460	28+497	92.	-8.3	-3.6	10000.	2	0	0.	0	5387.	0.456	17.928
1470	28+557	60.	-10.4	-5.7	10000.	2	0	0.	0	6874.	0.356	18.294
1480	28+681	124.	-11.3	-2.9	10000.	2	0	70.	4	7476.	1.518	19.812
1490	28+758	77.	-12.3	-4.0	10000.	2	0	0.	0	8256.	0.602	20.414
1500	28+817	59.	-8.1	-4.7	10000.	2	0	0.	0	5255.	0.399	20.813
1510	28+859	42.	-1.7	-2.6	10000.	2	0	0.	0	1844.	0.150	20.964
1520	29+ 25	165.	12.1	-6.9	10000.	4	0	0.	0	7131.	0.621	21.585
1530	29+135	109.	10.8	-5.8	10000.	4	0	0.	0	6262.	0.733	22.318
1540	29+234	99.	12.7	-3.0	10000.	4	0	0.	0	7379.	0.674	22.992

### 3.4 Genauigkeitsabschätzung der Berechnungsergebnisse

Bestimmende Einflußgröße für die Kostenberechnung ist die Höhe der Trasse in Bezug zur Geländehöhe. Die Genauigkeit der Kostenangaben hängt damit von der Genauigkeit ab, mit der die Geländehöhen aus der Digitalisierungsvorlage, der Topographischen Karte im Maßstab 1 : 25 000 (TK 25), entnommen werden können.

#### 3.4.1 Höhengenaugkeit der TK 25

Für die Genauigkeit von aus Höhenlinien abgeleiteten Geländehöhen der TK 25 gilt die "Koppe'sche Formel" mit den Konstanten 1 und 7, d.h. die Standardabweichung beträgt

$$s_H[m] = \pm (1 + 7 \tan \alpha) ,$$

wenn  $\alpha$  die Geländeneigung bedeutet. Die Geländeneigung bleibt im überwiegenden Teil der Trasse unter 1 : 25, so daß eine Höhengenaugkeit von

$$s_H = \pm 1,2 \text{ m}$$

realistisch ist. Da die Digitalisierung der Höheninformation praktisch fehlerfrei erfolgt, gilt dieser Wert auch für die Höhen im digitalen Geländemodell.

Die Geländehöhe, die in einem Querprofil zum Achspunkt gehört, muß aus den umliegenden Höhenpunkten interpoliert werden; dies geschieht durch Spline-Interpolation. Die Stützpunkte für die Interpolation bilden die Schnittpunkte des Querprofils mit den Höhenlinien. Wegen der günstigen Eigenschaft der Spline-Interpolation dürfte die Standardabweichung der im Querprofil interpolierten Höhen nur um max. 10 % höher liegen als die der Stützpunkthöhen. Für die im Querprofil enthaltene Höheninformation wird den folgenden Berechnungen deshalb eine Standardabweichung von

$$s_Q = \pm 1,3 \text{ m}$$

zugrunde gelegt.

Die Interpolation von Zwischenhöhen auf der Strecke zwischen zwei Querprofilen wird nötig, um die Übergänge zwischen den verschiedenen Ausbauarten des

Verkehrsweges festzulegen (z.B. Damm-Einschnitt) und um die Geländehöhe an Kreuzungspunkten mit anderen Verkehrslinien zu ermitteln. Die Berechnung dieser Zwischenhöhen in Längsrichtung der Trasse erfolgt durch lineare Interpolation zwischen den Querprofilhöhen. Dieses Verfahren ist deshalb gerechtfertigt, da bei der Auswahl der Querprofile versucht wurde, diese mit den in der Karte feststellbaren Wechsellinien in der Geländeneigung in Achsrichtung zusammenfallen zu lassen.

Der aus der linearen Interpolation resultierende zusätzliche Fehler wird wegen der natürlichen nicht erfaßbaren Oberflächenrauigkeit mit  $\pm 0,5$  m und wegen der Abweichung des tatsächlichen Geländeprofiles von der unterstellten Gradlinigkeit mit  $\pm 1,5$  m abgeschätzt, so daß sich als Gesamtstandardabweichung für interpolierte Höhen zwischen den Querprofilen

$$S_I = \pm 2,2 \text{ m}$$

ergibt. Für interpolierte Höhen gilt dann die "Koppe'sche Formel" in der Form  $S_I = \pm (1,9 + 7 \tan \alpha)$ .

Für die Festlegung der Übergangsstellen von einem Regelquerschnitt zum anderen ist die Lageunsicherheit ein entscheidender Faktor, mit der ein Punkt vorgegebener Höhe aufgrund der Höhenunsicherheit behaftet ist. Diese Lageunsicherheit errechnet sich durch Division der "Koppe'schen Formel" durch  $\tan \alpha$  :

$$s_L[\text{m}] = \pm (7 + 1,9 \cot \alpha) .$$

Je nach Geländeneigung erhält man sehr unterschiedliche Werte. Der Lagefehler reicht von  $s_L = \pm 16$  m für steiles Gelände ( $\tan \alpha = 1 : 5$ ) über  $s_L = \pm 26$  m für mittleres Gelände ( $\tan \alpha = 1 : 10$ ) bis zu  $s_L = \pm 100$  m für flaches Gelände ( $\tan \alpha = 1 : 50$ ).

Für die aus der Karte entnommenen Höheninformationen gilt allgemein, daß die Abweichungen von der tatsächlichen Geländehöhe im lokalen Bereich stark korreliert sind, also bei benachbarten Punkten gleiches Vorzeichen und die gleiche Größenordnung haben. Auf kleineren Streckenabschnitten wirkt der Höhenfehler sich daher wie ein systematischer Fehler aus, und erst bei großräumiger Betrachtung nimmt er die Eigenschaften eines zufälligen Fehlers

an, für den die Gesetze der Statistik gelten.

Die Höhe der Gradienten kann im Gegensatz zur Geländehöhe als fehlerfrei betrachtet werden, da sie in einem einheitlichen Höhensystem widerspruchsfrei berechnet und stetig aus den zulässigen Trassenparametern zusammengesetzt ist.

### 3.4.2 Auswirkungen auf die Genauigkeit der Berechnungsergebnisse

Die folgenden Abschätzungen werden exemplarisch für die Rad-Schiene-Studie durchgeführt. Die Vorgehensweise behält jedoch auch für den Vorentwurf zum schwebenden Schnellbahnsystem ihre Gültigkeit. Auf einer Gesamtlänge von ~ 190 km wurden die Investitionskosten zu 1803,0 Mio. DM berechnet. Diese setzen sich aus den Kosten für Grunderwerb (145,1 Mio. DM  $\hat{=}$  8 %), den Kosten für Erdarbeiten (537,7 Mio. DM  $\hat{=}$  30 %), den Bauwerkskosten (994,3 Mio. DM  $\hat{=}$  52 %) und den Oberbaukosten (175,9 Mio. DM  $\hat{=}$  10 %) zusammen, wobei zu den Bauwerkskosten auch die Kosten für Kreuzungen, Brücken und Tunnel zählen. Die Kosten für den Oberbau sind höhenunabhängig und können daher aus der Fehlerbetrachtung ausgeklammert werden. Der Einfluß der Geländequerneigung kann für die Fehlerbetrachtung ebenfalls vernachlässigt werden.

#### 3.4.2.1 Auswirkungen auf die Berechnung der Grunderwerbskosten

Die Grunderwerbsbreite für den Regelquerschnitt Damm wird nach der Formel  $B = \text{const.} + 2n \cdot h$  berechnet, mit  $n = 1,5$  als Maß für die Böschungsneigung. Für jede Berechnung ergibt sich eine Standardabweichung von

$$\begin{aligned} s_B &= \pm 3 \cdot s_I & (s_I &= \pm 2,2 \text{ m}) \\ s_B &= \pm 6,6 \text{ m} . \end{aligned}$$

Bei einem durchschnittlichen Stationsabstand von 120 m beträgt der Fehler, bezogen auf einen Abschnitt

$$\begin{aligned} s_G &= \pm 6,6 \cdot 120 \text{ m} \\ s_G &= \pm 792 \text{ m} . \end{aligned}$$

Dieser Fehler pflanzt sich mit der Wurzel aus der Anzahl  $n$  der entsprechenden Abschnitte fort, so daß sich mit ~ 900 Abschnitten Damm die Standardab-

weichung bei der Berechnung des Grunderwerbs für den Bereich Damm zu

$$s = \pm 792 \text{ m}^2 \cdot \sqrt{n}$$

$$s = \pm 2,4 \text{ ha}$$

ergibt bzw. kapitalisiert mit 20 DM/m<sup>2</sup>

$$\underline{\bar{s}_{G_1}} = \pm 480 \text{ Tsd. DM} .$$

Auf gleichem Wege errechnen sich die Standardabweichungen für die Bereiche Einschnitt und Einschnitt mit Stützmauern zu

$$\underline{\bar{s}_{G_2}} = \pm 404 \text{ Tsd. DM}$$

$$\text{und } \underline{\bar{s}_{G_3}} = \pm 57 \text{ Tsd. DM} .$$

An jeder Übergangsstelle von Regelquerschnitt Damm zu Regelquerschnitt Aufständerung ändert sich die Grunderwerbsbreite sprunghaft um  $\sim 40$  m. Die Lageunsicherheit bei der Interpolation der Übergangsstelle aus den benachbarten Querprofilen beträgt für steiles Gelände (wo diese Übergänge hauptsächlich vorkommen)

$$s_L = \pm 16 \text{ m} .$$

Damit berechnet sich die Standardabweichung für die Grunderwerbsbreite an jeder Übergangsstelle zu

$$s = \pm 40 \cdot 16 \text{ m}^2$$

$$s = \pm 640 \text{ m}^2 .$$

Der Fehler pflanzt sich mit der Wurzel aus der Anzahl  $n$  der im Berechnungsbereich liegenden Übergänge fort. Mit  $n = 71$  und multipliziert mit 20 DM/m<sup>2</sup> erhält man einen Fehlereinfluß von insgesamt

$$\underline{\bar{s}_{G_4}} = \pm 108 \text{ Tsd. DM} .$$

Ähnliche Berechnungen lassen sich für die Übergänge Einschnitt zu Einschnitt mit Stützmauern oder für Aufständerung mit  $h \leq 20$  m zu Aufständerung mit  $h > 20$  m anstellen. Diese Beträge erweisen sich aber als vernachlässigbar

gering.

Die Einzelstandardabweichungen werden nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz zum Gesamtfehler zusammengefaßt

$$\bar{s}_G = \sqrt{\sum_{i=1}^4 \bar{s}_{G_i}^2} ,$$

so daß die ausgewiesenen Grunderwerbskosten mit einer Unsicherheit von

$$\bar{s}_G = \pm 640 \text{ Tsd. DM}$$

behaftet sind, das sind ± 0,5 % der gesamten Grunderwerbskosten oder ± 0,04 % der gesamten Investitionskosten. Die Standardabweichung ± 0,5 % gilt auch für den berechneten Gesamtflächenverbrauch.

#### 3.4.2.2 Auswirkungen auf die Berechnung der Bauwerkskosten

Die Baukosten für die Stützmauern an einem Querprofil errechnen sich genähert nach der Formel  $K_B \sim 100 \cdot h^2 \text{ DM}$ . Die Standardabweichung aufgrund der Höhenunsicherheit beträgt damit an jeder Berechnungsstelle

$$\bar{s}_B = \pm 200 \cdot h \cdot s_I \quad (s_I = \pm 2,2 \text{ m})$$

Bei einer durchschnittlichen Einschnitttiefe von  $h = 16 \text{ m}$  erhält man, bezogen auf eine Station

$$\bar{s}_B = \pm 7040 \text{ DM} .$$

Bei einem mittleren Stationsabstand von 120 m und insgesamt 13 Stützmauerabschnitten beträgt die Standardabweichung für diese Fahrwegart

$$\bar{s}_{B_1} = \pm 7040 \cdot 120 \cdot \sqrt{13} \text{ DM}$$

$$\bar{s}_{B_1} = \pm 3046 \cdot \text{Tsd. DM} .$$

Für die Bereiche Aufständering erhält man bei entsprechender Rechnung einen Betrag von

$$\bar{s}_{B_2} = \pm 673 \cdot \text{Tsd. DM} .$$

An den Übergangsstellen Damm-Aufständering bei  $h = 15 \text{ m}$  tritt ein Kosten-  
sprung von ca. 9000 DM/m auf, der in steilem Gelände (Lageunsicherheit  
 $s_L = \pm 16 \text{ m}$ ) zu einer Unsicherheit in der Kostenberechnung von

$$\bar{s}_B = \pm 144 \cdot \text{Tsd. DM}$$

führt. Dieser Fehler pflanzt sich mit der Wurzel aller im Berechnungsbe-  
reich liegenden Übergangsstellen ( $n = 71$ ) auf die Gesamtkostenrechnung mit

$$\underline{\bar{s}_{B_3}} = \pm 1213 \cdot \text{Tsd. DM}$$

fort.

Die Baukosten für Aufständering in einer Höhe  $h = 15 \text{ m}$  betragen 16500 DM/m,  
so daß sich für die ausgewiesene Gesamtsumme der Baukosten aufgrund der Un-  
sicherheit in der Lagezuweisung für den Übergang ein Fehleranteil von

$$\underline{\bar{s}_{B_3}} = \pm 2225 \cdot \text{Tsd. DM}$$

ergibt.

Ähnliche Überlegungen führen für die Übergänge Einschnitt nach Tunnel zu  
Standardabweichungen von

$$\underline{\bar{s}_{B_4}} = \pm 961 \cdot \text{Tsd. DM}$$

$$\text{und } \underline{\bar{s}_{B_4}} = \pm 1720 \cdot \text{Tsd. DM} \quad ,$$

und für die Übergänge Einschnitt nach Stützmauer beträgt der Fehleranteil

$$\underline{\bar{s}_{B_5}} = \pm 626 \cdot \text{Tsd. DM}$$

$$\text{und } \underline{\bar{s}_{B_5}} = \pm 1073 \cdot \text{Tsd. DM} \quad .$$

Zu den Baukosten zählen auch die Kosten für Kreuzungsbauwerke einschließlich  
der Brückenbauwerke. Die Kostenänderung mit der Höhe variiert stark mit der  
Art der Kreuzung und mit dem Höhenbereich. Als durchschnittlicher Wert soll  
für die Genauigkeitsabschätzung eine Kostenänderung von 0,3 Mio. DM pro Me-  
ter Höhenunterschied angenommen werden. Damit ergibt sich, bezogen auf die  
Berechnung der Kosten für ein Kreuzungsbauwerk, bei einer Höhengenaugkeit

von  $\pm 2,2$  m für interpolierte Höhen eine Standardabweichung von

$$\bar{s}_B = \pm 660 \cdot \text{Tsd. DM} .$$

Der Gesamtfehler beträgt bei insgesamt 344 Kreuzungsbauwerken im Berechnungsbereich

$$\bar{s}_{B_4} = \pm 660 \cdot \sqrt{344} \text{ Tsd. DM}$$

$$\underline{\bar{s}_{B_4} = \pm 12\,241 \cdot \text{Tsd. DM} .}$$

Wie bei der Abschätzung der Genauigkeit der Grunderwerbskosten wird aus den Einzelstandardabweichungen der Gesamtfehler resultierend aus der Bauwerkskostenberechnung abgeleitet. Dabei muß zwischen dem Einfluß auf die Gesamtkosten der Trasse und auf die Gesamtbauwerkskosten, wie sie in der Kostenstatistik ausgewiesen wird, unterschieden werden.

Der Fehleranteil an den Gesamtinvestitionskosten beträgt demnach

$$\bar{s}_B = \pm 12\,742 \text{ Tsd. DM}$$

das sind  $\pm 0,7\%$  der Gesamtkosten.

Die Standardabweichung der ausgewiesenen Bauwerkskosten beträgt

$$\bar{s}_B = \pm 12\,985 \text{ Tsd. DM}$$

das sind  $\pm 1,4\%$  der gesamten Bauwerkskosten.

#### 3.4.2.3 Auswirkungen auf die Berechnung der Kosten für Erdbauarbeiten und auf die Massenberechnung

Im Einschnittbereich berechnet sich die Querschnittsfläche für ebenes Gelände nach der Formel

$$F = b \cdot h + n \cdot h^2 .$$

Daraus folgt die Standardabweichung in Abhängigkeit vom Höhenfehler:

$$s_F = \pm (b + 2nh) s_I .$$

Das Volumen der Erdmassen wird aus dem Mittel zweier Profilflächen multipliziert mit dem Profilabstand L gebildet:

$$V = \frac{F_1 + F_2}{2} \cdot L$$

Die Varianz des berechneten Volumens beträgt nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz:

$$s_V^2 = \frac{1}{4} L^2 (s_{F_1}^2 + s_{F_2}^2)$$

Mit  $s_{F_1} = s_{F_2} = s_F$  folgt:

$$s_V^2 = \frac{L^2}{2} s_F^2 = \frac{L^2}{2} (b + 2n \cdot h)^2 s_I^2$$

Setzt man die aktuellen Werte  $b = 10,35$  m,  $n = 1,5$  und  $s_I = \pm 2,2$  m ein, und geht man von einer durchschnittlichen Einschnitthöhe von  $h = 6,5$  m und einem durchschnittlichen Stationsabstand von  $L = 120$  m aus, so ist, bezogen auf einen Stationsabstand, mit einer Unsicherheit in der Massenberechnung von

$$s_V = \pm 9264 \text{ m}^3$$

zu rechnen. Den Gesamtfehler erhält man wieder durch Multiplikation mit der Wurzel aus der Anzahl aller in den Berechnungsbereich fallenden Einschnittabschnitte ( $\sim 650$ ), der sich auf die Massenberechnung mit

$$\underline{s_{V_1} = \pm 236 \text{ Tsd. m}^3}$$

und auf die Kostenberechnung (durchschnittliche Kosten für Erdbewegungen : 20 DM/m<sup>3</sup>) mit

$$\underline{\bar{s}_{V_1} = \pm 4716 \text{ Tsd. DM}}$$

auswirkt.

Für die Bereiche Einschnitt mit Stützmauern erhält man auf die gleiche Weise die Werte

$$\underline{s_{V_2} = \pm 18 \text{ Tsd. m}^3}$$

und

$$\underline{\bar{s}_{V_2} = \pm 362 \text{ Tsd. DM}}$$

und für die Abschnitte mit einem Regelquerschnitt Damm betragen die Standardabweichungen

$$\underline{s_{V_3} = \pm 289 \text{ Tsd. m}^3}$$

$$\text{und } \underline{\bar{s}_{V_3} = \pm 5789 \text{ Tsd. DM}}$$

Die Unsicherheit bei der Festlegung der Übergänge von Einschnitt nach Damm bei der Höhe  $h = 0$  wirkt sich wegen der geringen Kostenunterschiede zwischen beiden Fahrwegarten auf die Kostenrechnung nicht aus, und auch der Einfluß auf die Aufstellung der Massenbilanz ist wegen der kleinen Beträge der Massen an diesen Übergangsstellen verschwindend gering.

Der Fehlereinfluß an den Übergängen von Damm nach Aufständering auf die Gesamtkosten ist schon unter 3.4.2.2 berücksichtigt worden, so daß hier nur noch der Einfluß auf die Einzelausweisung der Erdbaukosten und auf die Massenbilanz abzuschätzen ist. Das gilt auch für die Übergänge von Einschnitt nach Tunnel.

Im ersten Fall vollziehen sich die Übergänge bei einer Fahrweghöhe von  $h = 15$  m. Die Kosten für Erdarbeiten in dieser Höhe belaufen sich für den Regelquerschnitt Damm auf 7500 DM/m. Die Lagefeststellung eines Übergangs geschieht in steilem Gelände mit einer Genauigkeit von  $\pm 16$  m, so daß sich bei insgesamt  $n = 71$  Übergangsstellen im Berechnungsbereich ein Fehlereinfluß auf die ausgewiesenen Erdbaukosten von

$$s_{V_4} = \pm 7500 \cdot 16 \cdot \sqrt{n} \text{ DM}$$

$$\underline{\bar{s}_{V_4} = \pm 1011 \text{ Tsd. DM}}$$

berechnet. Nach Division durch  $20 \text{ DM/m}^3$  erhält man die Standardabweichung für die Massenberechnung zu

$$\underline{s_{V_4} = \pm 51 \text{ Tsd. m}^3}$$

Bezogen auf die Übergangsstellen Einschnitt nach Tunnel betragen die analog zu berechnenden Werte

$$\bar{s}_{V_5} = \pm 759 \text{ Tsd. DM}$$

und

$$s_{V_5} = \pm 38 \text{ Tsd. m}^3$$

Als Gesamtfehlereinfluß aus der Berechnung der Erdbaukosten auf die Trassenkosten erhält man mit

$$\bar{s}_E = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^3 \bar{s}_{V_i}^2}$$

die Standardabweichung

$$\bar{s}_E = \pm 7476 \text{ Tsd. DM}$$

das sind ± 0,4 % der Gesamtinvestitionskosten.

Die Standardabweichung des Einzelpostens Kosten für Erdarbeiten beträgt

$$\bar{s}_E = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^5 \bar{s}_{V_i}^2}$$

$$\bar{s}_E = \pm 7582 \text{ Tsd. DM}$$

das sind ± 1,4 % der anfallenden Kosten für Erdarbeiten.

Die vom Programm berechneten Abtragsmassen sind mit einer Unsicherheit von

$$s_A = \pm \sqrt{s_{V_1}^2 + s_{V_2}^2 + s_{V_5}^2}$$

$$s_A = \pm 240 \text{ Tsd. m}^3$$

das sind ± 1,2 % der Gesamtabtragsmasse, behaftet, und die Auftragsmassen mit einer Unsicherheit von

$$s_D = \pm \sqrt{s_{V_3}^2 + s_{V_4}^2}$$

$$s_D = \pm 293 \text{ Tsd. m}^3$$

entsprechend  $\pm 1,9\%$  der Gesamtauftragsmasse.

Damit beträgt der Fehler in der Massenbilanz (Differenz zwischen Auf- und Abtrag)

$$s_B = \sqrt{s_A^2 + s_D^2}$$

$$s_B = \pm 379 \text{ Tsd. m}^3$$

### 3.4.3 Zusammenstellung und Standardabweichung der Gesamtkosten

Bei der Zusammenfassung der Teilkosten zu den Gesamtkosten sind die folgenden Einzelstandardabweichungen zu berücksichtigen:

$$\text{Grunderwerb} \quad \bar{s}_G = \pm 0,6 \text{ Mio. DM} \quad (\hat{=} \pm 0,04 \% \text{ der Gesamtkosten}),$$

$$\text{Bauwerk} \quad \bar{s}_B = \pm 12,7 \text{ Mio. DM} \quad (\hat{=} \pm 0,7 \% \text{ der Gesamtkosten}),$$

$$\text{Erdbau} \quad \bar{s}_E = \pm 7,5 \text{ Mio. DM} \quad (\hat{=} \pm 0,4 \% \text{ der Gesamtkosten}).$$

Da alle Einzelvarianzen direkte Funktionen der Höhenunsicherheit  $s_I$  sind, sind sie mit  $r = 1$  korreliert. Das muß bei der Bildung der Gesamtvarianz berücksichtigt werden. Unter diesen Annahmen beläuft sich die Standardabweichung für die Gesamtkosten auf

$$\underline{\underline{\bar{s} = \pm 21 \text{ Mio. DM} \quad (\hat{=} \pm 1,2 \% \text{ der Gesamtkosten}).}}$$

Für die in der Kostenstatistik ausgewiesenen Teilsummen gelten folgende Standardabweichungen:

$$\text{Grunderwerb} \quad \bar{s}_G = \pm 0,6 \text{ Mio. DM} \quad (\hat{=} \pm 0,5 \%),$$

$$\text{Bauwerk} \quad \bar{s}_B = \pm 13,0 \text{ Mio. DM} \quad (\hat{=} \pm 1,4 \%),$$

$$\text{Erdbau} \quad \bar{s}_E = \pm 7,6 \text{ Mio. DM} \quad (\hat{=} \pm 1,4 \%).$$

Für die Massenberechnung wurden folgende Standardabweichungen abgeleitet:

$$\text{Abtrag} \quad s_A = \pm 240 \text{ Tsd. m}^3 \quad (\hat{=} \pm 1,2 \%),$$

$$\text{Auftrag} \quad s_D = \pm 293 \text{ Tsd. m}^3 \quad (\hat{=} \pm 1,9 \%),$$

$$\text{Differenz} \quad s_B = \pm 379 \text{ Tsd. m}^3.$$

Bei der Bewertung der Zahlen bezüglich der Kosten ist zu berücksichtigen, daß sie sich lediglich auf die im Rahmen des Trassenentwurfs ermittelten Kosten beziehen. Die Unsicherheiten in den Annahmen der Kostentabellen und der Grundkosten sind nicht enthalten.

Die wesentliche Ursache der angegebenen Streuungen liegen darin, daß aus der TK 25 die Geländehöhen nur mit einer Genauigkeit von  $s_I = \pm 2,2$  m entnommen werden können. Die Verwendung von Karten mit größeren Maßstäben würde daher in vollem Umfang der Kostenrechnung zugute kommen.

#### Literatur

Rahmenspezifikation, Trassierungsangaben für eine EMS-Schnellbahn Frankfurt - Paris, TRANSRAPID EMS 1979

Technische Vorgaben für ein Rechenprogramm "R/S-Investitionskosten", KARNER (STÖCKL) 1980 (unveröffentlicht)

EMS-Planungsstudie Frankfurt - Paris, TRANSRAPID EMS/KARNER 1980

R/S-Planungsstudie Frankfurt - Paris, DB, BZA München/KARNER 1981

OSTERLOH, H. (1974): Erdmassenberechnung, Bauverlag GmbH, Wiesbaden - Berlin 1974

Richtlinien für die elektronische Bauabrechnung (REB), Ausgabe 1972

STÖCKL, R. u. G. EITEL (Bearbeiter) (1981): TROP, Trassenoptimierung von Landverkehrswegen. Benutzerhandbuch, München 1981 (S. 47 - 52, S. 111 - 112, S. 123 - 127)

## 1. Einführung

Für das Problem der Gewinnmaximierung auf dem Gebiet der Unternehmensforschung wurden seit Beginn der fünfziger Jahre in Form der linearen und nicht-linearen Programmierung mathematische Lösungsmethoden entwickelt, die in den letzten Jahren mehr und mehr auch auf technische Problemstellungen übertragen wurden und sich ebenfalls dort als sehr wirkungsvoll erwiesen haben. Wesentlich dazu beigetragen hat die rapide Steigerung der Leistungsfähigkeit digitaler Rechenanlagen.

Aus derselben Zeit werden die ersten Versuche (MILLER (1958)) berichtet, die oft aufwendigen Trassierungsarbeiten zu automatisieren; dabei beschäftigte er sich noch hauptsächlich mit der Erstellung eines geeigneten digitalen Informationsmodells. Erst nachdem man die hierbei auftretenden Probleme gelöst hatte, war es möglich, eine automatische Trassenfindung anzugehen. Dies führte schließlich zur Anwendung verschiedener Optimierungsalgorithmen, wovon vor allem in den Arbeiten von HINTZEN (1965), BOESEFELD (1970), SCHECK (1973), KOCH (1975), MANOLOPOULOS (1979) berichtet wird. Hierzu mußten die bei der manuellen Bearbeitung meist intuitiv berücksichtigten Beurteilungskriterien mathematisch formuliert und den vorhandenen Optimierungsmodellen angepaßt werden.

Wie in dem Beitrag CASPARY, HEISTER und WELSCH (1982b) eingehend erläutert, entschied man sich bei der Bearbeitung der eigentlich dreidimensionalen Entwurfsaufgabe für eine Trennung in Lage und Höhe. Wegen der Vielschichtigkeit der Lageoptimierung wurde hier kein strenger mathematischer Weg beschritten, vielmehr wurde eine Lösung durch interaktives systematisches Probieren gesucht. Somit ist unter Beibehaltung der bereits optimierten Trasse die optimale Gerade zu finden. Prinzipiell sind beide Probleme stark korreliert, jedoch erscheint zur Zeit eine ganzheitliche strenge mathematische Lösung nicht praktikabel.

Da bei der Gradientenbearbeitung weit weniger einengende Randbedingungen zu berücksichtigen sind sowie bereits geringfügige Änderungen der Entwurfspara-

meter großen Einfluß auf die Kosten haben, erscheint es hier sinnvoll, ein strenges mathematisches Modell zur Kostenoptimierung einzuführen.

Unter dem Begriff mathematische Optimierung faßt man eine Reihe von Methoden zusammen, die geeignet sind, Systeme hinsichtlich einer vorher definierten Zielgröße - der Zielfunktion - unter Einhaltung gewisser Nebenbedingungen - den Restriktionen - zu optimieren. Dabei werden diese Methoden nicht auf das System selbst, sondern auf eine modellhafte Nachbildung des Systems angewendet. Es wird daher eigentlich nicht das System, sondern das Modell optimiert. Nur bei hinreichend genauer Übereinstimmung kann deshalb der erzielte Optimierungseffekt auf das System übertragen werden. Um bei der vorliegenden Problemstellung eine möglichst geringe Klaffung zwischen System und Modell zu erreichen, sind unter Zugrundelegung des in CASPARY, HEISTER und WELSCH (1982a) beschriebenen digitalen Informationsmodells folgende Faktoren bei der Formulierung von Zielfunktion und Restriktionen zu berücksichtigen:

- a) Der Gradientenverlauf soll möglichst kostengünstig sein. Dies ist hauptsächlich abhängig von den Größen Grunderwerb, Damm, Einschnitt, Höhe der Aufständigung, Geländequerneigung, Tunnel- und Brückenkosten.
- b) Die Gradienten sollen möglichst gut den fahrdynamischen Eigenschaften angepaßt sein; darunter ist eine flüssige Linienführung unter Einhaltung vorgegebener Mindestparameter zu verstehen.
- c) Die Gradienten sollen in vorgegebenen Abschnitten der systemtypischen Bauweise von Hochgeschwindigkeitsbahnen entsprechen.
- d) Die Gradienten sollen vorgegebene Zwangspunkte durchlaufen.

Nach einer Gegenüberstellung der verschiedenen Optimierungsverfahren, auf die hier nicht näher eingegangen werden soll, erscheint der Einsatz der dynamischen Optimierung als besonders zweckmäßig, da die Berücksichtigung der oben angegebenen Faktoren und somit eine gute Modellanpassung möglich ist; dabei braucht auf eine strenge mathematische Lösung nicht verzichtet zu werden. Das Modell und die erforderlichen Rechenregeln wurden von BELLMANN (1957) für die Optimierung sequentieller Entscheidungsprozesse entwickelt.

Um die Übertragung der dynamischen Optimierung auf die vorgegebene Aufgabenstellung besser nachvollziehen zu können, wird zunächst eine kurze Einführung in das Verfahren und die Terminologie der Unternehmensforschung gegeben.

## 2. Das mathematische Konzept

### 2.1 Dynamische Optimierung

Man geht davon aus, daß der Zustand eines Systems zu jedem Zeitpunkt durch einen Zustandsvektor

$$\mathbf{z}_i^T = (z_i^1, z_i^2, \dots, z_i^p) \quad (1)$$

festgelegt werden kann. Unterteilt man das System in  $i$  Stufen, auf denen jeweils eine Entscheidung

$$\mathbf{e}_i^T = (e_i^1, e_i^2, \dots, e_i^q) \quad (2)$$

gefällt werden kann, die das gesamte System beeinflusst, dann kann man für den Übergang von einer Stufe  $i$  zur Stufe  $i+1$  folgende Transformation anschreiben, um den neuen Zustandsvektor zu bestimmen:

$$\mathbf{z}_{i+1} = \mathbf{v}_i(\mathbf{z}_i, \mathbf{e}_i). \quad (3)$$

Weiterhin wird der Gewinn auf die Stufe  $i$ , der abhängt von dem Zustand  $\mathbf{z}_i$  und der vorgenommenen Entscheidung  $\mathbf{e}_i$ , mit  $u_i(\mathbf{z}_i, \mathbf{e}_i)$  bezeichnet. Der Gesamtgewinn über  $N$  Stufen ergibt sich dann zu:

$$U = \sum_{i=1}^N u_i(\mathbf{z}_i, \mathbf{e}_i) \quad (4)$$

Trifft man nun auf jeder Stufe nur solche Entscheidungen, die die Gewinnfunktion  $U$  maximiert, so ist die Lösung des dynamischen Programms die optimale Strategie

$$\mathbf{E}^* = (e_1^*, e_2^*, \dots, e_N^*) \quad (5)$$

Bei vorgegebenem Anfangszustand  $\mathbf{z}_1$  ist dann über die vorgegebene Transformation (3) mit dem optimalen Entscheidungsvektor  $\mathbf{e}_1^*$  der optimale Zustand  $\mathbf{z}_2^*$  zu berechnen. So fährt man fort bis die entsprechende Zustandsfolge erreicht ist.

$$\mathbf{Z}^* = (\mathbf{z}_1, \mathbf{z}_2^*, \mathbf{z}_3^*, \dots, \mathbf{z}_{N+1}^*) . \quad (6)$$

Jetzt ist nur noch die Frage zu klären: Wie bestimmt man die optimale Strategie? Dazu bedient man sich der Rückwärtsrechnung mit folgenden Rechenregeln:

Ausgehend von der Stufe  $N$  berechnet man zunächst alle möglichen Gewinne  $u_N$  durch Einsetzen aller Entscheidungsmöglichkeiten:

$$u_N = u_N(\mathbf{z}_N, \mathbf{e}_N) + u_{N+1}^* \quad (7)$$

$$\text{mit } u_{N+1}^* = u_{N+1}(\mathbf{z}_{N+1}) = 0 .$$

Von diesen Werten ist aber nur der optimale für die weitere Rechnung von Bedeutung:

$$u_N^* = \max \{u_N(z_N, e_N)\} \quad (8)$$

Geht man zur nächsten Stufe N-1 zurück, dann lassen sich wieder Gewinne  $u_{N-1}$  berechnen, die mit dem optimalen Gewinn  $u_N^*$  folgende Gewinnsummen ermöglichen:

$$w_{N-1} = u_{N-1}(z_{N-1}, e_{N-1}) + u_N^* \quad (9)$$

Sucht man jetzt wieder den maximalen Wert von  $u_{N-1}$ , dann erhält man auf der Stufe N-1:

$$\max w_{N-1} = u_{N-1}^* = \max \{u_{N-1}(z_{N-1}, e_{N-1}) + u_N^*\} . \quad (10)$$

Allgemein gilt für Stufe i:

$$u_i^* = \max w_i = \max \{u_i(z_i, e_i) + u_{i+1}^*\}, \quad i = N, N-1, \dots, 1. \quad (11)$$

Setzt man die Rückwärtsrechnung bis zur 1. Stufe fort, ergibt sich der optimale Wert der Zielfunktion (4) zu:

$$U^* = u_1^* = \max w_1 = \max \{u_1(z_1, e_1) + u_2^*\} . \quad (12)$$

Hat man so den optimalen Gewinn berechnet, können die optimale Strategie  $E^*$  und  $Z^*$  durch Vorwärtsrechnung bestimmt werden; bei der Rückwärtsrechnung wurden nämlich neben den Funktionswerten  $u_i^*$  auch die optimalen Entscheidungen für jeden Zustand abgespeichert. Dann läßt sich aus (12) bei vorgegebenem Anfangszustand  $z_1$  und bekannten  $u_1^*$ ,  $u_2^*$  die optimale Entscheidung  $e_i^*$  festlegen. Anschließend kann über die Transformation (3) der optimale Zustand  $z_2^*$  ermittelt werden. Für die i-te Stufe gilt

$$z_i^* = v_{i-1}(z_{i-1}^*, e_{i-1}^*) \quad (13)$$

mit

$$e_{i-1}^* = e_{i-1}(z_{i-1}^*) . \quad (14)$$

Damit ist das Ziel der dynamischen Optimierung erreicht, nämlich nach Bestimmung des optimalen Wertes  $U^*$  die optimale Strategie  $E^*$  und Zustandsfolge  $Z^*$  zu kennen.

Dieser zunächst abstrakte Lösungsweg soll durch ein kleines Beispiel auch graphisch näher erläutert werden:

## 2.2 Beispiel

Um direkt den Bezug zur Trassierung herzustellen, wird eine Gerade vereinfacht durch ein Tangentenpolynom dargestellt (siehe Abbildung 1a). Der optimale Verlauf dieses Polynoms ist nur durch Veränderung der Tangentenanstiege zu erreichen. Durch die Anzahl der Tangenten ist das System in  $N=4$  Stufen unterteilt. Auf jeder Stufe sind die Entscheidungsmöglichkeiten zur Änderung der Tangente durch den Entscheidungsvektor  $e_i$  ( $i = 1, \dots, 4$ ) festgelegt. Zum Beispiel kann man auf der Stufe 1 den Anstieg der Tangente auf 0 %, 3 % und 6 % festlegen. Ist der Zustand

$$z_1 = 0 \text{ [m]} , \quad (15)$$

so wird gemäß (3) mit dem Abstand  $s_1$  der Tangentenschnittpunkte der Zustand zu Beginn der 2. Stufe durch die Transformation berechnet:

$$z_2 = v_1(z_1, e_1) , \quad (16)$$

$$z_2 = z_1 + s_1 e_1 = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} + 100 \cdot \begin{vmatrix} 0,00 \\ 0,03 \\ 0,06 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0,00 \\ 3,00 \\ 6,00 \end{vmatrix} . \quad (17)$$

Dieser neue "Zustand" ist in der Abbildung 1a durch die Gitterpunkte (100,0; 100,3; 100,6) graphisch dargestellt. Weiterhin kann jetzt auch für diese Stufe je nach Entscheidung die Gewinnfunktion  $u_i$  berechnet werden. Hier wurde ein Kostenmodell simuliert, das von der Fläche zwischen Tangente und Gelände abhängt. Je nach Anstieg betragen die Kosten, die auch als negative Gewinne berechnet werden können, -20, -10 oder -6.

Auf der 2. Stufe können jetzt in jedem Gitterpunkt wieder die Entscheidungen  $e_2$  gefällt werden. Dies führt wieder zu neuen Gitterpunkten und entsprechenden Kosten. So fährt man fort bis zur 4. Stufe. Alle Möglichkeiten sind in Abbildung 1a aufgezeigt.

Ziel der Optimierung ist die Bestimmung desjenigen Tangentenpolynoms, das minimale Kosten verursacht oder maximalen Gewinn bringt.

$$\sum_{i=1}^4 u_i(z_i, e_i) = U \rightarrow \text{Max.} \quad (18)$$

Nach (7) bestimmt man alle möglichen Gewinne  $u_4$  auf der 4. Stufe, wobei die Endkosten mit  $u_5^* = 0$  angesetzt werden. Die Einzelwerte sind der Abbildung 1b zu entnehmen. Hiervon sind jedoch nur die minimalen Werte  $u_4^*$  für den weiteren Rechengang interessant. Geht man jetzt auf die 3. Stufe zurück, bildet man die Kostensummen  $w_3$  nach (9). Für jeden Knotenpunkt zu Beginn der 3. Stu-



fe wird jetzt wieder das Optimum  $u_3^*$  gesucht. Gleichzeitig wird die hierfür relevante Entscheidungsvariable notiert; sie wurde in der Abbildung 1a jeweils durch das Symbol  $\square$  gekennzeichnet.

Führt man in diesem Schema bis zur ersten Stufe fort, so ergibt sich der optimale Wert der Zielfunktion (18) zu:

$$U^* = u_1^* = -28 .$$

Mit Hilfe der Vorwärtsrechnung läßt sich dann gemäß (13) und (14) die optimale Strategie  $\mathbf{E}^*$  und die Zustandsfolge  $\mathbf{Z}^*$  eindeutig bestimmen:

$$\begin{aligned} z_1 &= 0 \\ z_2^* &= z_1 + s_1 e_1^* = 0 + 100 \cdot 0,06 = 6 \\ e_1^* &= e_1(z_1) = 0,06 \\ z_3^* &= z_2^* + s_2 e_2^* = 6 + 100 \cdot 0,00 = 6 \\ e_2^* &= e_2(z_2^*) = 0,00 \\ z_4^* &= z_3^* + s_3 e_3^* = 6 + 100 \cdot 0,00 = 6 \\ e_3^* &= e_3(z_3^*) = 0,00 \\ z_5^* &= z_4^* + s_4 e_4^* = 6 + 100 \cdot (-0,03) = 3 \\ e_4^* &= e_4(z_4^*) = -0,03 \end{aligned} \tag{19}$$

Damit liegt der Verlauf des kostengünstigsten Tangentenpolynoms fest.

### 2.3 Diskretisierung

Bei der numerischen Behandlung größerer Probleme wird man sich darauf beschränken, die Funktionen  $u_i^*$  nur in einem gewissen Bereich zu bestimmen, um hier nicht sinnvolle Lösungswege, die den Rechengang unnötig aufblähen, auszuschalten. Diese Begrenzung wird durch die Vorgabe von Maximal- und Minimalwerten der Zustandsvariablen erreicht:

$$\begin{aligned} z_{i\text{Min}}^k &\leq z_i^k \leq z_{i\text{Max}}^k \cdot \\ i &= 1, \dots, N+1 \\ k &= 1, \dots, p \end{aligned} \tag{20}$$

Zusätzlich kann dieser Zustandsbereich durch Vorgabe einer Schrittweite  $\Delta z$  und eines Diskretisierungsfaktors  $l$  diskretisiert werden, so daß nur auf Gitterpunkten eines vorgegebenen Rasters die Funktionsberechnung nach (11) durchgeführt wird. Legt man noch die Anzahl der Entscheidungsmöglichkeiten auf jeder Stufe  $j$  fest, dann sind die Bereiche von folgender Form:

$$z_j = \left\{ \left( \begin{array}{c} z_j^1 \\ \vdots \\ z_j^p \end{array} \right) , z_j^i = z_{j\text{Min}} + \lambda^i \Delta z_j^i , \lambda^i = 0, 1, \dots, l_j^i \right\}, \quad (21)$$

$$i = 1, 2, \dots, p$$

$$E_j = \left\{ \left( \begin{array}{c} e_j^1 \\ \vdots \\ e_j^q \end{array} \right) , e_j^v \in E_j^v , v=1, 2, \dots, q \right\} . \quad (22)$$

$$j = 1, \dots, N$$

Ist dabei  $r_j^v$  die Anzahl von Entscheidungsmöglichkeiten der Komponente  $e_j^v$ , dann gibt es auf der Stufe  $j$  insgesamt

$$R_j = \prod_{v=1}^q r_j^v \quad (23)$$

Entscheidungen. Ist die Anzahl der Gitterpunkte

$$G_j = \prod_{i=1}^p l_j^i , \quad (24)$$

dann ergibt sich für die Gesamtzahl der Funktionsberechnungen auf einer Stufe

$$n_j = \sum_{k=1}^{G_j} R_j^k . \quad (25)$$

Die Beschränkung und Unterteilung des Zustandsbereiches bedingt, daß der erhaltene Gewinn  $U^*$  nur optimal bezüglich der vorgegebenen Diskretisierung ist. Je feiner diese gewählt wird, um so dichter wird man das wahre Optimum erreichen. Dies bedeutet jedoch eine wesentliche Steigerung des Gesamtrechen-

aufwandes, der folgendermaßen abschätzbar ist.

Es gibt bedingt durch die Anzahl  $G_j$  der Gitterpunkte auf jeder Stufe  $j$  insgesamt

$$G = \prod_{j=1}^N G_j \quad (26)$$

Möglichkeiten, den Gewinn  $U$  zu berechnen. Geht man von der Vereinfachung aus, daß die Anzahl der Gitterpunkte auf jeder Stufe gleich ist, dann sind  $G = G_j^N$  Berechnungen notwendig. Bei der dynamischen Optimierung ist jedoch diese Anzahl wesentlich geringer, da durch die lokale Maximierung auf jedem Gitterpunkt nach (11) alle nicht optimalen Entscheidungen entfallen. Ist die Anzahl der Gitterpunkte bzw. Entscheidungsmöglichkeiten für alle Stufen gleich, dann ergibt sich aus (24), (23) bzw. (25) für jede  $j$ -te Stufe

$$\begin{aligned} \text{die Anzahl der Gitterpunkte zu } G_j &= (l_j+1)^p, \\ \text{die Anzahl der Entscheidungsmöglichkeiten zu } R_j &= (r_j)^q, \\ \text{die Anzahl der Funktionswertberechnungen zu } n_j &= (l_j+1)^p \cdot (r_j)^q. \end{aligned}$$

Mit  $l_{j+1} = r_j = 1$  kann schließlich näherungsweise zur Abschätzung des Rechenaufwandes die Anzahl  $n$  der zu berechnenden  $w_i$  nach (11) über  $N$  Stufen mit

$$n = N \cdot l^{(p+q)} \quad (27)$$

angegeben werden. Dabei beträgt die Anzahl  $\bar{n}$  der lokalen Maximalwerte  $u_i^*$ , die zur Vorwärtsrechnung abgespeichert werden müssen

$$\bar{n} = N \cdot l^2 \quad (28)$$

Sind zum Beispiel  $p=q=3$ ,  $N=10$  und  $l=10$ , dann wäre die Gesamtzahl aller möglichen Berechnungen  $G = (10^3)^{10} = 10^{30}$  (!); die Anzahl der durch die dynamische Optimierung notwendigen Funktionsberechnungen beträgt nach (27) jedoch nur  $n = 10 \cdot 10^6 = 10^7$ . Die Zahl der abgespeicherten Funktionswerte ist letztlich  $\bar{n} = 10 \cdot 10^2 = 1\ 000$ .

Dieses Beispiel zeigt, daß bei mehrdimensionalen Problemen dem Bellmanschen Lösungsprinzip, trotz der starken Reduzierung der Funktionswertberechnungen, Grenzen gesetzt sind, da der Rechenaufwand mit der Dimension etwa exponentiell ansteigt. Deshalb ist bei der Formulierung des mathematischen Modells darauf zu achten, daß

- a) die Dimensionen des Zustands- und Entscheidungsvektors möglichst klein sind,
- b) der Diskretisierungsfaktor klein und
- c) die Zielfunktion sowie die Transformation möglichst einfach sind.

Sind der erlaubte Zustandsbereich sowie sein Diskretisierungsfaktor groß und wird zusätzlich eine hohe Genauigkeit gefordert, empfiehlt sich folgendes iterative Vorgehen:

Man bestimmt zunächst mit grober Diskretisierung  $\Delta z_j^{i0}$  eine vorläufige optimale Zustandsfolge  $\mathbf{z}^{*0} = (z_1^0, z_2^0, \dots, z_N^0)$  aus den erlaubten Zustandsmengen  $Z_1^0, Z_2^0, \dots, Z_N^0$  und erhält den Gewinn  $U^{*0}$ . Man legt für den nächsten Iterationsschritt die Zustandsmengen so fest, daß um die vorläufig optimale Zustandsfolge mit halbem Rasterwert  $\Delta z_j^{i1} = 1/2 \Delta z_j^{i0}$  eine neue Zustandsmenge  $Z_1^1, Z_2^1, \dots, Z_N^1$  gebildet werden kann. In diesem "Suchschlauch" wird nun die nächste optimale Zustandsfolge  $\mathbf{z}^{*1}$  berechnet. Man fährt so fort, bis ein definiertes Abbruchkriterium erfüllt ist. Ob das Iterationsverfahren gegen das gesuchte Optimum konvergiert, ist allgemein nicht nachweisbar. Man kann jedoch mit großer Wahrscheinlichkeit sagen, daß das gesuchte Optimum innerhalb des Suchschlauchs liegt, wenn ein zweitbesten Zustandsvektor noch innerhalb der Grenzen des neuen Zustandsbereiches liegt. Deshalb ist es sinnvoll, beim k-ten Iterationsschritt bereits die Zustandsgrenzen des (k+1)-ten Schrittes zu bestimmen und zu überprüfen, ob die "zweitbeste" Zustandsfolge innerhalb dieser Grenzen liegt.

### 3. Die Gradientenoptimierung

#### 3.1 Entscheidungs- und Zustandsparameter bei der Gradientenbearbeitung

Gewöhnlich wird die Gradienten nicht - wie im oben angegebenen Beispiel - durch einen Parameter beschrieben, sondern durch mehrere, wie Gerade und Kreis im vorliegenden Fall. Für die Anwendung der dynamischen Optimierung muß die Gradientenberechnung so umformuliert werden, daß sie sich in das Schema des Optimierungsalgorithmus fügt; dabei ist für die praktische Durchführung wichtig, daß Zielfunktion (4) und Transformation (3) einen möglichst einfachen mathematischen Ausdruck bilden. Denn wie bereits aus dem Beispiel ersichtlich, werden diese Funktionen sehr oft berechnet und bilden somit den Hauptanteil an Rechenzeitbedarf.

Die Gradienten des Vorentwurfs wird deshalb in Abschnitte unterteilt, in de-

nen jeweils die Parameterfolge Gerade - Kreis oder Kreis - Gerade erlaubt ist. Diese Parameterfolge entspricht jeweils einer Stufe. Wichtig hierbei ist, daß die Anzahl  $N$  der Stufen durch den Optimierungsalgorithmus nicht geändert werden kann. Der Entwurfsingenieur hat hier bereits die Möglichkeit, auf eine ausgewogene, fahrdynamisch günstige Linienführung Einfluß auszuüben.

Der Zustand zu jedem Abschnittsbeginn ist festgelegt durch den dreidimensionalen Zustandsvektor

$$\mathbf{z}_i^T = (r_i, h_i, m_i) \quad \mathbf{z}_i \in Z_i, \quad (29)$$

wobei

- $r$  die Länge der rektifizierten Trasse [m],
- $h$  die Höhe der Gradienten ü. NN [m],
- $m$  der Anstieg [%],
- $i$  der Stufenindex ( $i=1, \dots, N$ )

bedeutet. Auf jeder Stufe können jetzt Entscheidungen gefällt werden, die mehr oder weniger kostengünstig sind

$$\mathbf{e}_i^T = (r_i, h_i, m_i) \quad \mathbf{e}_i \in E_i. \quad (30)$$

Diese Entscheidungen implizieren die Festlegung einer Parameterfolge, wie leicht aus Abb. 2 ersichtlich ist:

Im Punkt A auf der Stufe  $i$  ist der Zustand festgelegt durch die Koordinaten  $r_i$ ,  $h_i$  und den Anstieg  $m_i$ . Der Punkt E kann in einem vorgegebenen Raster durch die Entscheidungsmöglichkeiten für  $r_i$ ,  $h_i$  und  $m_i$  verändert werden. Gesucht ist natürlich die optimale Entscheidung  $r_i^*$ ,  $h_i^*$  und  $m_i^*$ . Dadurch ist indirekt der Tangentenschnittpunkt TS festgelegt, der wiederum eine eindeutige Bestimmung der Gradientenparameter Gerade - Kreis zuläßt.

Die Transformation nach (3) ist durch Wahl der Größen  $\mathbf{e}$  und  $\mathbf{z}$  trivial:

$$\mathbf{z}_{i+1} = \mathbf{e}_i. \quad (31)$$

Hierdurch ist ein stetiger Übergang von einer Parameterfolge zur nachfolgenden gewährleistet, so daß der Gradientenverlauf glatt ist.

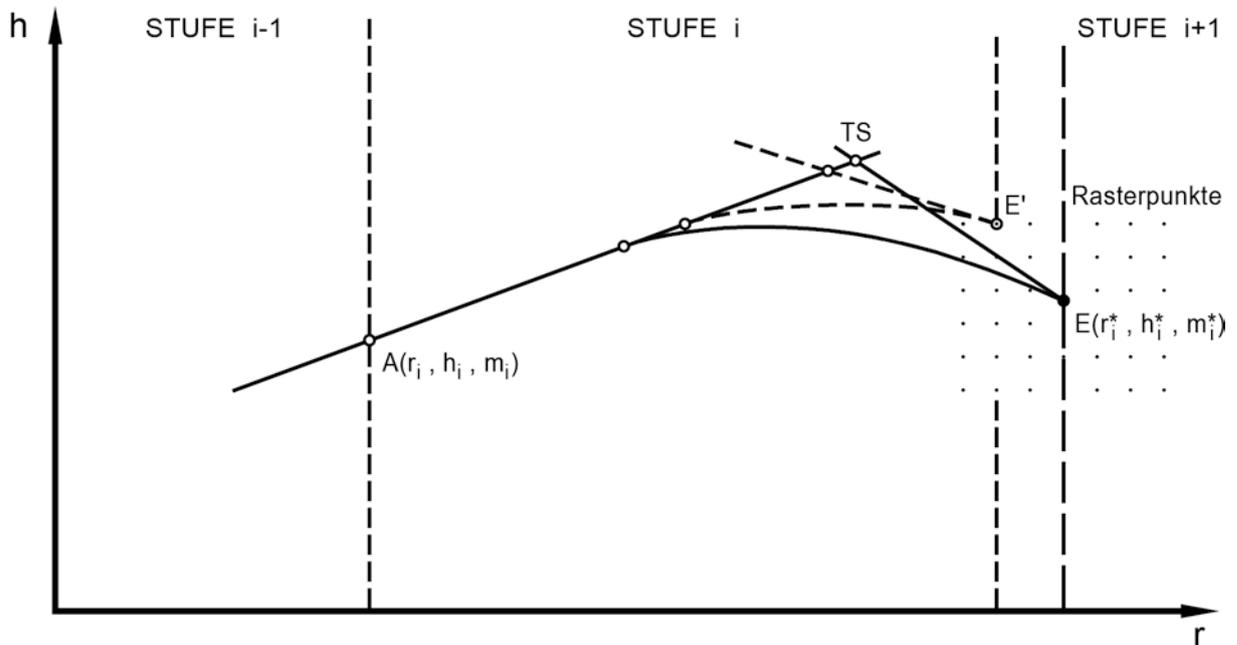


Abb. 2: Darstellung einer Parameterfolge

### 3.2 Zielfunktion und Restriktionen

Von der Ausbildung der Zielfunktion hängt weiterhin ganz wesentlich die Güte des Optimierungsergebnisses ab. Hier steht man im Zwiespalt zwischen möglichst exakter Modellanpassung und wirtschaftlich vertretbarem Rechenaufwand; schließlich kann sogar die Praktikabilität des Optimierungsverfahrens für große Systeme in Frage gestellt werden.

Da die Kosten minimiert werden sollen, muß zunächst entschieden werden, ob eine einheitliche Funktion  $u_i$  zur Kostenberechnung in dem Planungsstadium bereits erstellt werden kann oder ob hierfür genäherte Größen wie zum Beispiel Fläche zwischen Gelände und Gradiente oder Höhendifferenz - Gradiente - Gelände genügen.

In zwei Projektstudien, für die dieses Optimierungskonzept entworfen wurde,



den richtigen Kostenfaktor zu finden, ist ein lokales Informationsmodell erstellt worden. Dieses digitale Modell enthält die Größen

- Geländehöhe in Regelabständen  $h_j$ ,
- entsprechende Geländequerneigung  $q_j$ ,
- Gewicht  $p_j$ , bestehend aus sieben Ziffern (xxxx.xx).

Hierbei dienen die Vorkommaziffern als Gewicht und ermöglichen die Berücksichtigung von Zwangspunkten. Die Nachkommaziffern regeln die Lage und Klassifizierung von Straßen zwischen zwei benachbarten Stützpunkten. Zu jedem Höhenunterschied  $\Delta h_j$ , der zum Beispiel in Regelabständen von 100 m bestimmt wird, kann dann unter zusätzlicher Berücksichtigung der Querneigung auf den entsprechenden Kostenfaktor  $K_j$  in einer Tabelle zugegriffen werden. Diese Tabelle hat zwei Eingänge und zwar  $\Delta h$  in der Schrittweite 1 m und die Querneigung in 2 %-Schritten. Sind die Nachkommastellen von  $p_j$  besetzt, so werden noch die Kosten für Kreuzungsbauwerke einer zweiten Tabelle entnommen und in Abhängigkeit der Entfernung Kreuzungsbauwerk - Stützpunkt proportional auf die Kostenfaktoren  $K_j$  und  $K_{j+1}$  verteilt.

Damit ist es gelungen, in einer einfachen Zielfunktion ein kompliziertes Kostenmodell zu berücksichtigen; gleichzeitig impliziert diese Funktion sogar noch gewisse Restriktionen wie die Berücksichtigung von Zwangspunkten durch individuelle Steuerung des Gewichtes  $p_j$ . Mindestparameter werden dadurch steuerbar, daß nur solche Entscheidungen zulässig sind, aus denen sich Parameter berechnen lassen, die nur im vorgegebenen Bereich liegen. Ein Sprungbefehl im Programm bewirkt, daß für unzulässige Entscheidungen keine Funktionswerte gemäß (11) berechnet werden können.

Schließlich sei noch erwähnt, daß zur Manipulation der Fahrdynamik entscheidend die Anzahl des Stufenindex  $N$  ist. Je mehr Stufen bzw. Parameterfolgen für einen Abschnitt angesetzt werden, um so besser kann sich die Gradienten dem Gelände anpassen, um so unruhiger wird aber die Linienführung.

Weiterhin ist zu berücksichtigen, daß die Anzahl  $N$  der Stufen nach (27) mit verantwortlich für den Rechenaufwand ist. Bei numerischen Berechnungen hat sich  $N \leq 15$  bewährt; dies bedeutete eine Länge zwischen 20 bis 30 km des zu bearbeitenden Abschnitts.

Weitere Details hierzu können dem Benutzerhandbuch TROP (1981) entnommen werden.

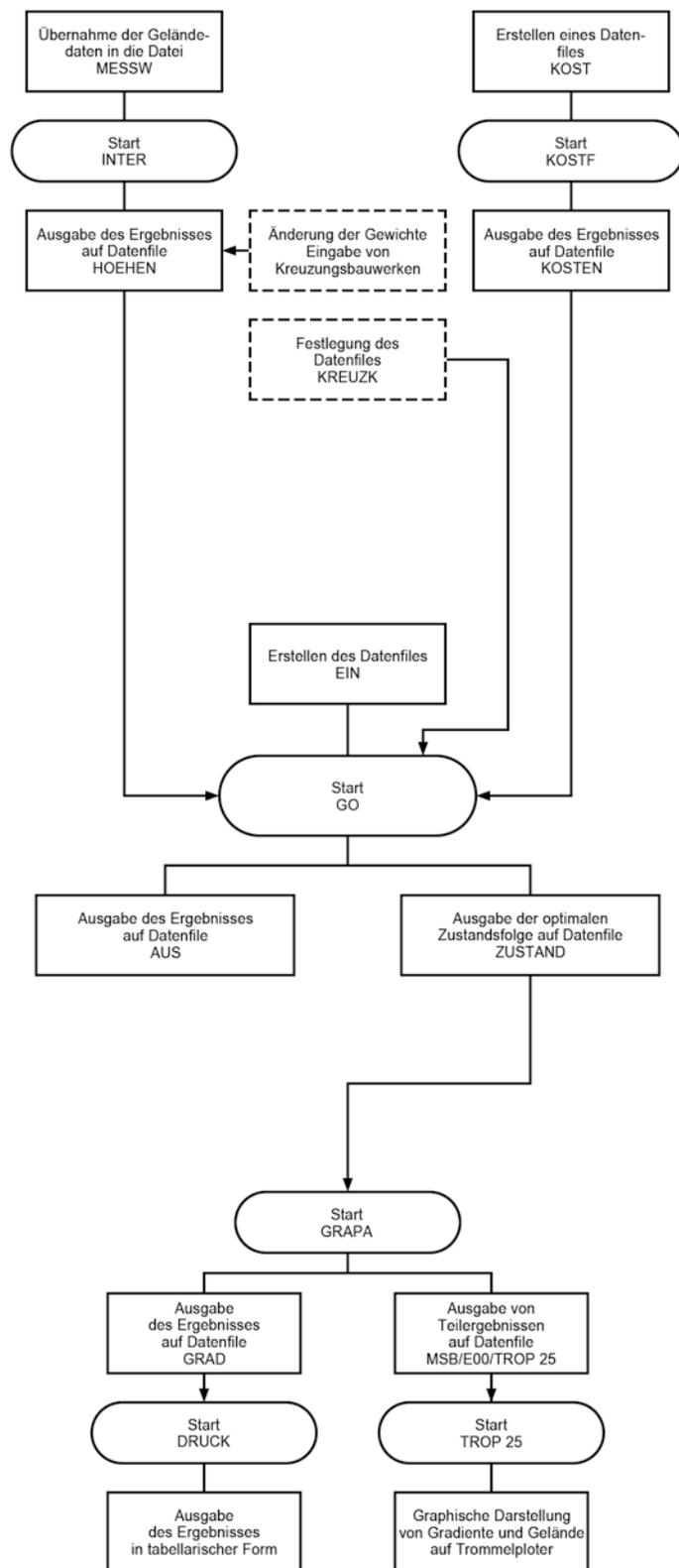


Abb. 4: Ablaufplan zur Gradientenoptimierung

### 3.3 Ein dialogfähiges Optimierungsprogramm

Nach dem dargelegten mathematischen Konzept wurde ein dynamisches Optimierungsprogramm mit dreidimensionalen Zustands- und Entscheidungsvektoren erstellt. Trotz der für den mathematisch weniger vorgebildeten Nutzer komplizierten Materie ist ein einfach handzuhabendes, dialogfähiges Programm EGO entstanden, dessen Arbeitsablauf in Abbildung 4 entnommen werden kann.

Um das Hauptprogramm zur Gradienten-Optimierung (GO) zu starten, müssen vorab vier Datenfiles erstellt werden: HOEHEN, KOSTEN, KREUZK und EIN. Der erste File enthält die geländebeschreibenden Werte Höhe und Querneigung in Trassenachse und Regelabstände von 100 m sowie das Gewicht eines jeden Stützpunktes, vorbesetzt mit Eins. Die Datei KOSTEN enthält die Erstellungskosten pro m Höhendifferenz und je laufendem m Trasse in Abhängigkeit von Höhendifferenz und Querneigung. In KREUZK ist die Kastentabelle für Kreuzungsbauwerke abgespeichert; als Eingangsgrößen zur Ermittlung der Kosten sind die Höhendifferenz und Klassifizierung der Straße notwendig. Die Datei EIN enthält schließlich die Steuerparameter für das Hauptprogramm; dies sind insbesondere

- der Stufenindex N,
- die Untergrenze des Zustandsbereiches auf jeder Stufe für jede Komponente,
- der Diskretisierungsfaktor für jede Stufe und jede Komponente,
- die Rasterweite,
- die Entwurfsgeschwindigkeit.

Die Ergebnisse der Optimierung werden an das Programm GRAPA zur Berechnung der Gradientenparameter übergeben, wo dann zwei Ergebnisdateien erstellt werden, die entweder einen sachgerechten Ausdruck über das Programm DRUCK ermöglichen oder aber über TROP 25 den in der Abbildung 5 dargestellten optimalen Gradientenverlauf erzeugen.

### 4. Bewertung der Ergebnisse und Ausblick

Das beschriebene Programmsystem EGO wurde in zwei Projektstudien zur Trassierung von Hochgeschwindigkeitsbahnen angewendet. Dies führte je nach Streckenabschnitt zu einer Reduzierung der Kosten zwischen 10 % bis 20 %. Da die reine Kostenminimierung eine Gradientenführung festlegt, die nicht in allen Bereichen unter den Gesichtspunkten des Fahrkomforts und der Umweltfreundlich-

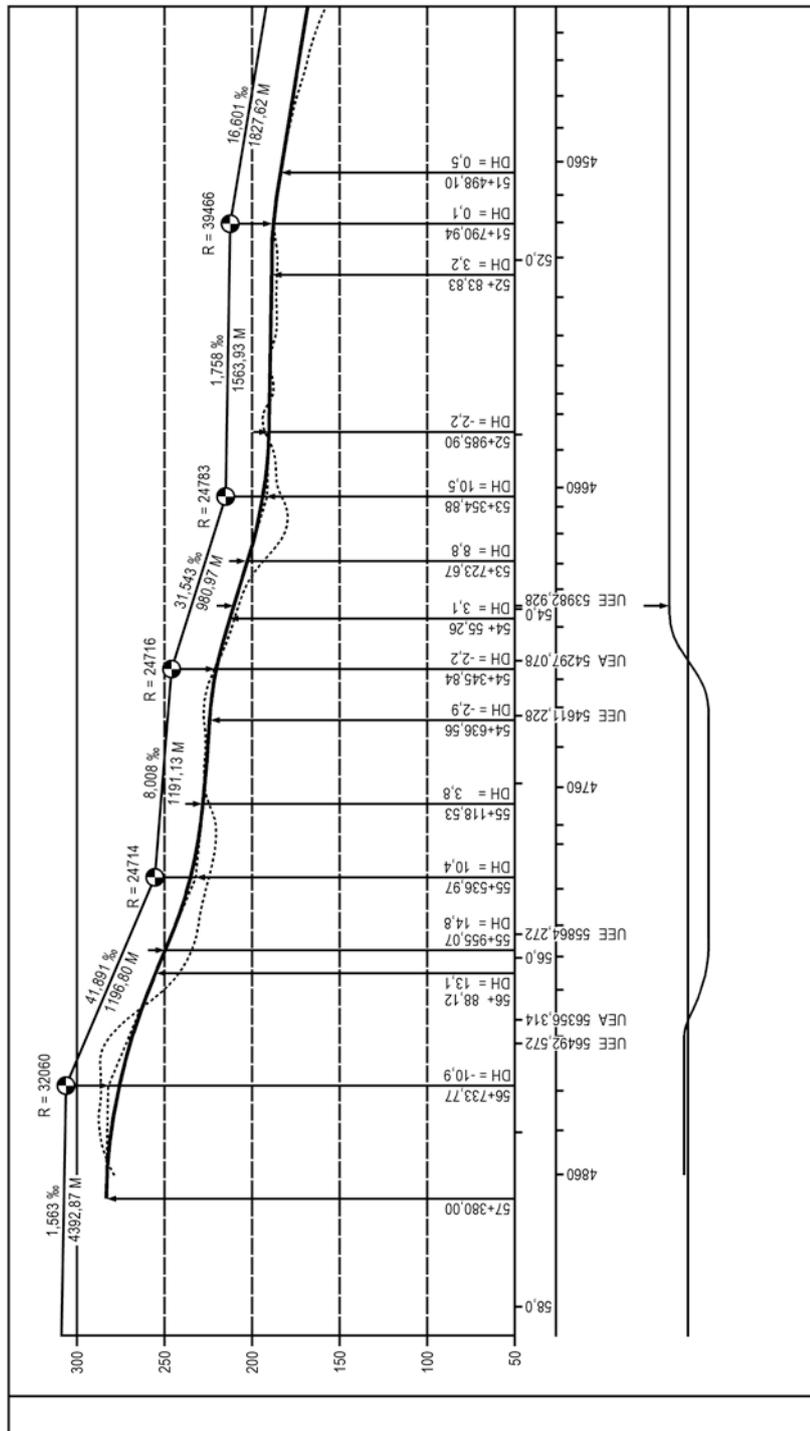


Abb. 5: Optimaler Gradientenverlauf

keit sowie der systemspezifischen Bauweise die Vorstellungen des Trassierungsingenieurs erfüllte, wurde in einzelnen Abschnitten die Gradientenoptimierung nochmals überarbeitet. Es zeigt sich hierbei, daß dadurch der Optimierungsgewinn um circa 2 % reduziert wurde. Der verbleibende Gewinn dürfte jedoch die heute noch relativ hohen Rechnerkosten gerechtfertigt erscheinen lassen. Die Abwicklung der Studien machte deutlich, daß bei der Komplexität und der Vielfalt der beteiligten Personen eine möglichst "objektive" und automatisierte Bearbeitung durch den Computer sinnvoll ist; gleichzeitig wird dadurch der Entwurfsingenieur von Routinearbeiten entlastet und für die wichtigen Aufgaben der Beurteilung und Verbesserung freigestellt. Deshalb ist es wichtig, daß die Programmsysteme so erstellt sind, daß der Bearbeiter Änderungen schnell und an jeder Stelle einbringen und damit die Auswirkung unmittelbar in anschaulicher Form am Bildschirm bewerten kann. Diese Idealvorstellung eines dialogfähigen Systems konnte bei der Gradientenoptimierung in nicht allen Arbeitsschritten verwirklicht werden. Ein wesentliches Hindernis hierfür ist der bei der heutigen Hardware-Konfiguration noch hohe Rechenzeitanforderung, der befriedigende Antwortzeiten selbst bei leistungsfähigen Großrechenanlagen kaum erwarten läßt. Man steht hierbei im Zielkonflikt zwischen Modellvereinfachung und schnellem Ergebnis einerseits sowie möglichst exaktem Modell mit sicherem Optimierungsergebnis aber hohem Rechenzeitaufwand andererseits. Es wird aber bei der rasanten Entwicklung auf dem Hardware Sektor in naher Zukunft bestimmt eine Verbesserung erzielbar sein, die ein interaktives Optimieren am Bildschirm ohne Verzicht auf strenge mathematische Modelle ermöglicht.

#### Literatur

Bellman, R.E. (1957): Dynamic Programming, Princeton

Benutzerhandbuch TROP (1981): Trassenoptimierung von Landverkehrswegen, GeoMeDa, München

Boesefeld, I. (1970): Optimierung einer Gradienten im Straßenbau nach der Monte Carlo Methode, Graz

Caspary, W., Heister, H., Welsch, W. (1980): Ein interaktives Programmsystem zur Entwicklung einer optimalen Trasse auf der Grundlage topographischer Karten, Allgemeine Vermessungsnachrichten, 87, S. 178-191

- Caspary, W., Heister, H., Welsch, W. (1982a): Bearbeitung des Vorentwurfs für ausgewählte Varianten mit dem Programmsystem TROP, Schriftenreihe des Wissenschaftlichen Studiengangs Vermessungswesen der Hochschule der Bundeswehr, Heft 6, S. 159 - 174
- Caspary, W., Heister, H., Welsch, W. (1982b): Gedanken zum interaktiven rechnergestützten Entwerfen von Trassen für Verkehrssysteme, Schriftenreihe des Wissenschaftlichen Studiengangs Vermessungswesen der Hochschule der Bundeswehr, Heft 6, S. 80 - 101
- Hintzen, H. (1965): Die Bestimmung der optimalen Gradienten von Straßen mit Hilfe elektronischer Rechenanlagen, Straßen- und Tiefbau, 6, 1965
- Koch, R. (1975): Optimierung der Linienführung von Straßen im Grundriß, Straße und Autobahn, 26, S. 223 - 229
- Manolopoulos, N. (1979): Trassenfindung und Optimierung mit dem Programmsystem OPT-1, CAD-Berichte, Nr. 126, S. 109 - 162
- Miller, C.L., Laflamme, R.A. (1958): The Digital Terrain Model-Theory and Application, Photogrammetric Engineering, Vol. XXIV, S. 433 - 442
- Scheck, H.J. (1975): Optimierungsberechnungen und Sensitivitätsanalysen als Hilfsmittel bei der Entwurfsbearbeitung von Straßen, Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 153, S. 31 - 147
- Schwintzer, P., Stöckl, R. (1982): Investitionskostenrechnungen für den Vorentwurf, Schriftenreihe des Wissenschaftlichen Studiengangs Vermessungswesen der Hochschule der Bundeswehr, Heft 6, S. 114 - 139

W. Caspary, H. Heister und W. Welsch

---

## 1. Einleitung

Die Bearbeitung großräumiger Neutrassierungen ist im dichtbesiedelten Mitteleuropa mit seinem gut ausgebauten Verkehrsnetz eine nur noch selten gestellte, dann aber höchst komplizierte Aufgabe. Die Autoren dieses Beitrags hatten Gelegenheit, im Rahmen von zwei Planungsstudien, die der BMFT finanziert hat, mitzuarbeiten, wobei ihnen die Aufgabe zufiel, für in der Vorplanung ausgewählte Varianten den Vorentwurf durchzuführen. Wegen des außergewöhnlichen Umfangs der Aufgabe - es ging darum, für ein elektromagnetisches Schnellbahnsystem (EMS) mit  $V_E = 400$  km/h und ein Rad-Schiene-System (R/S) mit  $V_E = 300$  km/h eine Städteverbindung von Frankfurt/Main nach Paris zu planen - war es geboten, die traditionelle Arbeitsweise beim Vorentwurf völlig neu zu überdenken und eine Lösung anzustreben, die die heutigen Möglichkeiten der digitalen und graphischen Datenverarbeitung nutzt, um möglichst wirtschaftlich zum Ziel zu gelangen.

Das Ergebnis dieser Vorüberlegungen war der Entschluß, ein neues Trassenoptimierungsprogrammsystem (TROP) zu entwickeln, das die Arbeit des Trassierungsingenieurs in allen Phasen des Vorentwurfs begleitet. Das Programm übernimmt alle mathematisch faßbaren Aufgaben und erweitert den Entscheidungsspielraum des Entwurfsbearbeiters, indem es im Dialog, für gewünschte Varianten, sofort die nötigen Berechnungen durchführt. Jederzeit kann der aktuelle Status des Entwurfs in Form von Tabellen und Graphiken sichtbar gemacht werden, da alle Ergebnisse und Teilergebnisse als Bestandteile des digitalen Trassensystems permanent zur Verfügung stehen.

## 2. Überblick über das Programmsystem TROP

Die rechnergestützte Bearbeitung des Vorentwurfs wurde in vier Phasen gegliedert.

Die erste Phase besteht darin, den für das Projekt bedeutsamen Inhalt der Topographischen Karte 1:25000 (TK 25) in den Rechner einzuspeisen. Diese Digi-

talisierung der Karte kann sich auf den Interessenstreifen beschränken, der in der Vorplanung festgelegt wurde. Sie umfaßt neben dem topographischen Karteninhalt alle im Zuge der Vorplanung eingetragenen Ergänzungsinformationen. Das Ergebnis ist ein digitales Informationsmodell, auf das in allen folgenden Arbeitsgängen zurückgegriffen werden muß.

In der zweiten Phase des Vorentwurfs wird der Grundriß bearbeitet. Dabei wird zunächst untersucht, wo Änderungen der aus der Vorplanung übernommenen Freihandlinie nötig und sinnvoll sind. Danach wird die Freihandlinie durch eine Folge von zulässigen Trassierungselementen (Geraden, Kreise, Übergangsbögen) ersetzt. Das Ergebnis wird in das digitale Trassenmodell übernommen.

Die Bearbeitung der Gradienten erfolgt in Phase drei. Die graphisch entworfenen Gradientenparameter werden zusammen mit einem Kostenmodell und den vorgegebenen Zwangspunkten in ein Optimierungsprogramm eingespeist, das nach dem mathematisch strengen Verfahren der dynamischen Optimierung die Folge von zulässigen Gradientenelementen ermittelt, die minimale Kosten erzeugt. Das Ergebnis wird wiederum ins digitale Trassenmodell übernommen.

Das Programmsystem erlaubt es, an dieser Stelle in die Grundrißbearbeitung zurückzuspringen, um durch Verschiebungen des Grundrisses eine eventuell noch kostengünstigere Gradientenführung zu ermöglichen. Es zeigte sich jedoch bald, daß ein solches iteratives Vorgehen nur selten sinnvoll ist, da die Gradientenführung in der Regel nach der mathematischen Kostenoptimierung noch geändert wird, um ästhetische und systemspezifische Kriterien zu erfüllen und um die Umweltverträglichkeit zu verbessern.

In der abschließenden vierten Phase des Vorentwurfs werden die Investitionskosten berechnet und zwar sowohl für die kostengünstigste Lösung als auch für die aus den genannten Gründen abgeänderte, endgültige Linienführung. Außerdem wird das Ergebnis in Grundriß und Längsschnitt dargestellt und mit den Kartenunterlagen zusammenkopiert. Statistische Auswertungen nach Kosten- und Fahrwegarten sowie eine Analyse der Achsengeometrie runden das Bild ab.

In Abbildung 1 ist der Arbeitsprozeß für den Vorentwurf dargestellt. Das digitale Trassenmodell wird durch das Programmsystem TROP Zug um Zug aufgebaut, bis es schließlich sämtliche Ergebnisse des Vorentwurfs enthält. Durch die vorhandenen Graphikprogramme können in jeder Phase der inzwischen erreichte Stand oder auch Auszüge daraus als Plots ausgegeben werden.

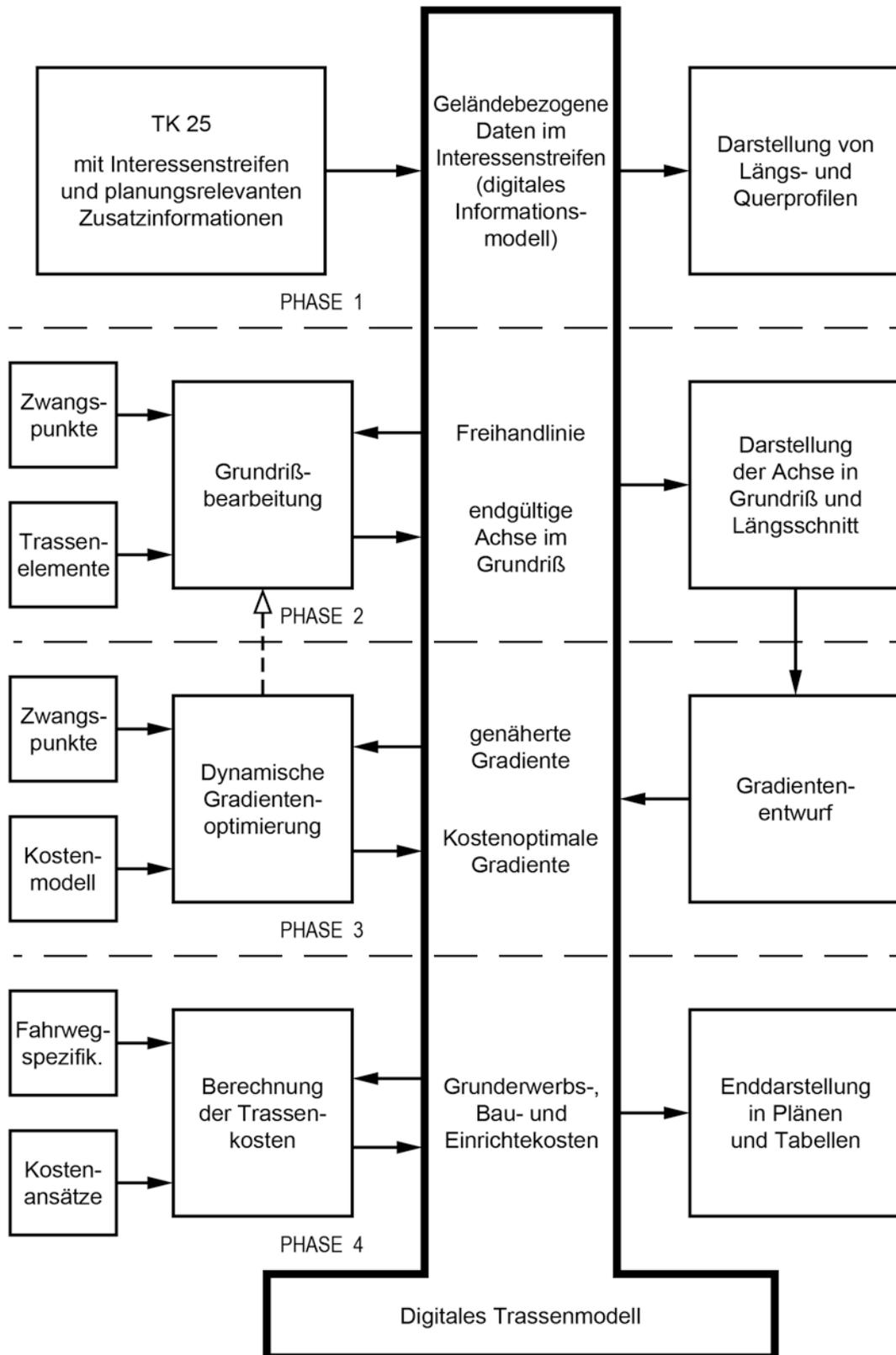


Abbildung 1: Übersicht über die Bearbeitung des Trassenvorentwurfs mit dem interaktiven Programmsystem TROP

### 3. Aufbau des digitalen Informationsmodells

Die Basis des digitalen Informationsmodells und zugleich Grundlage für alle später folgenden Bearbeitungsschritte ist der Inhalt der Topographischen Karte 1:25000, ergänzt um für die Planung bedeutsame Zusatzinformationen, die im Zuge der Vorplanung erhoben werden. Da für die Vorentwurfsbearbeitung nur der Karteninhalt benötigt wird, der im in der Vorplanung festgelegten Interessenstreifen liegt, wurde eine Modellstruktur gesucht, die besonders für langgestreckte schmale Flächen geeignet ist. Außerdem sollte das Modell so beschaffen sein, daß es zwanglos der variablen Informationsdichte der Karte angepaßt werden kann. Unter diesen Gesichtspunkten erschien die bei digitalen Höhenmodellen übliche Speicherung der Information in einem quadratischen Raster wenig geeignet. Als günstigere Lösung wurde eine Datenorganisation in Profilen quer zum Interessenstreifen angesehen. Es wurde daher das für die Geländeaufnahme im Verkehrswegebau klassische Verfahren der Längs- und Querprofile zum Vorbild für die Datenorganisation im digitalen Informationsmodell ausgewählt.

Das Programm läßt dem Bearbeiter völlig freie Hand bei der Wahl der Profilrichtung, der Profilabstände und der Anzahl der Punkte pro Profil. Daher ist es möglich, mit einer minimalen Anzahl von Punkten eine dem Problem angemessene Genauigkeit des digitalen Modells zu erzielen. Da die folgenden Bearbeitungsphasen, z.B. Gradientenentwurf oder Kostenberechnung auf das digitale Modell in der Form zurückgreifen, wie es durch Messung in der Karte entstanden ist, ohne irgendeine zwischengeschaltete Interpolation oder Strukturänderung, wird die Kartengenauigkeit uneingeschränkt während des gesamten Vorentwurfs ausgenutzt.

Der praktische Aufbau des Informationsmodells beginnt damit, daß die Profile, die digitalisiert werden sollen, im Interessenstreifen eingetragen werden. Maßgebend für den gewählten Profilabstand ist, daß die Änderung des Karteninhalts zwischen zwei Profilen eine lineare Interpolation zulassen muß. Der Profilabstand wird daher fortlaufend der Informationsdichte der Karte angepaßt. Bei der nachfolgenden Digitalisierung der Profile werden zunächst Anfangs- und Endpunkte eingestellt und damit jedes Profil eindeutig im Landeskoordinatensystem lokalisiert. Alle weiteren Daten werden in einem profilbezogenen Spezialsystem bestimmt. Es sind dies die Lage der Freihandlinie und eine ausreichende Anzahl von Höhenpunkten (in der Regel Schnittpunkte des Profils mit Höhenlinien), so daß das Gelände durch eine zweidimensionale ku-

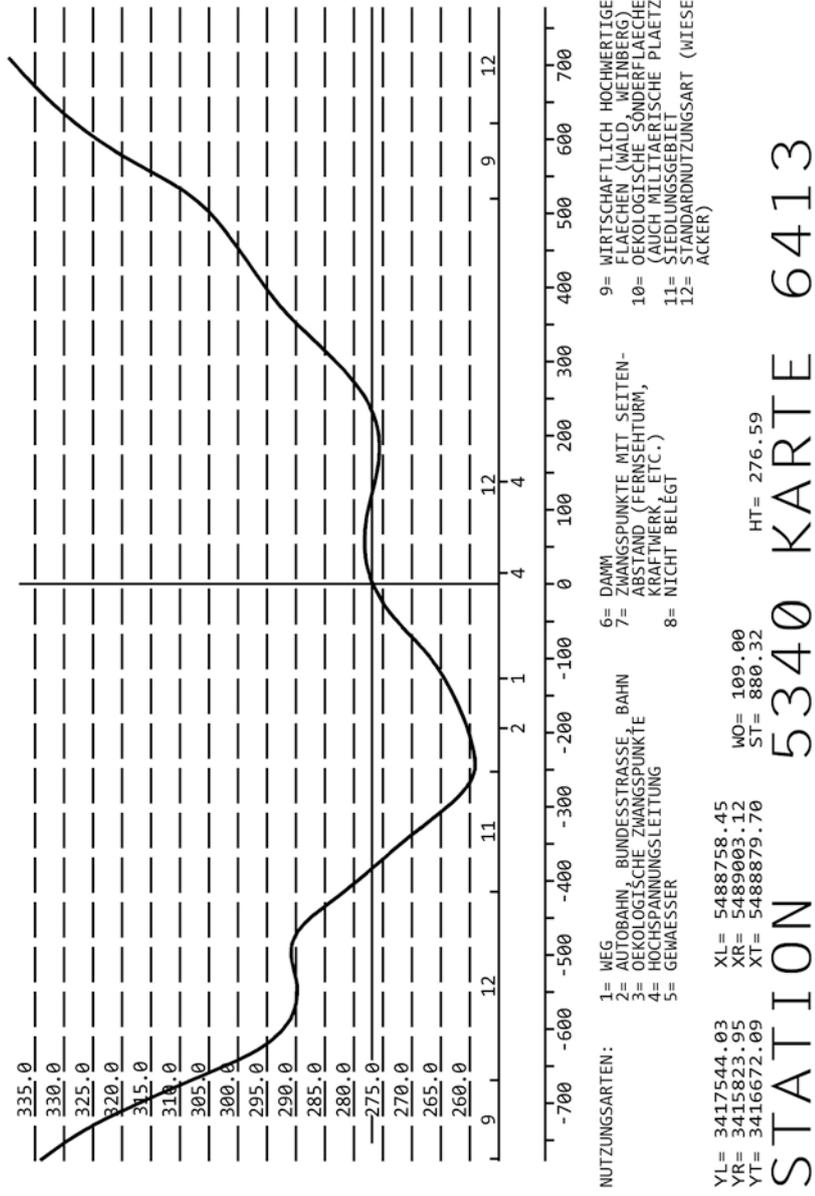


Abbildung 2: Kontrollausgabe eines digitalisierten Profils am Bildschirm

bische Spline-Funktion approximiert werden kann. Außerdem werden Flächen- und Liniennutzungen mit erfaßt. Bei Flächennutzungen werden die Schnittpunkte des Profils mit den Flächengrenzen digitalisiert und bei Liniennutzungen die Schnittpunkte des Profils mit dem Objekt selbst, bei dem es sich um eine Straße, Eisenbahnlinie, Flußlauf oder ähnliches handeln kann. Die verschiedenen Nutzungsarten werden im digitalen Modell durch Kennziffern unterschieden.

Sind alle auf einem Profil liegenden Informationen erfaßt, so wird am graphischen Bildschirm eine Profildarstellung gemäß Abbildung 2 erzeugt, die zur Kontrolle der erfaßten Information dient. Erst wenn sich der Bearbeiter von der Vollständigkeit und Richtigkeit der Daten überzeugt hat, erfolgt die Übernahme in den Datenspeicher. Zu Dokumentationszwecken kann das Profil als Hardcopy oder Plot ausgegeben werden.

Die Digitalisierung des Karteninhalts (Phase 1 in Abbildung 1) ist einer der aufwendigsten Arbeitsabschnitte im Rahmen der Vorentwurfsbearbeitung. Deshalb wurde versucht, durch den Einsatz der Menüfeldtechnik und durch Rechnerüberwachung des Ablaufs im Dialog mit dem Bearbeiter eine möglichst wirtschaftliche Lösung zu erzielen.

Um das weitere Arbeiten mit den Profilen übersichtlich zu gestalten, werden sie zu Gruppen zusammengefaßt, die jeweils einem Abschnitt der Trasse angehören. Diese Abschnitte werden so definiert, daß man daraus die Freihandlinie und alle Nebenvarianten lückenlos zusammensetzen kann. In den folgenden Bearbeitungsphasen können dann immer Trassenabschnitte angesprochen werden, womit eine erhebliche Vereinfachung erzielt wird.

#### 4. Bearbeitung des Trassengrundrisses

Die Weiterentwicklung der Linienführung im Grundriß geht von der Freihandlinie aus, die in der Voruntersuchung festgelegt wurde und bereits in digitaler Form als Folge von kubischen Splines im Rechner zur Verfügung steht. Zunächst wird dabei versucht, eine Verbesserung der Anpassung der Trasse an das Gelände zu erzielen. Dies ist von der Natur der Sache her ein räumliches Problem, das eigentlich die gleichzeitige Bearbeitung von Grundriß und Gradienten erfordert. Aus praktischen Gründen ist jedoch eine getrennte Bearbeitung von Lage und Höhe geboten, da der Entwurfsingenieur trotz Rechnerunterstützung überfordert wäre, wenn man von ihm verlangte, alle örtlichen und geome-

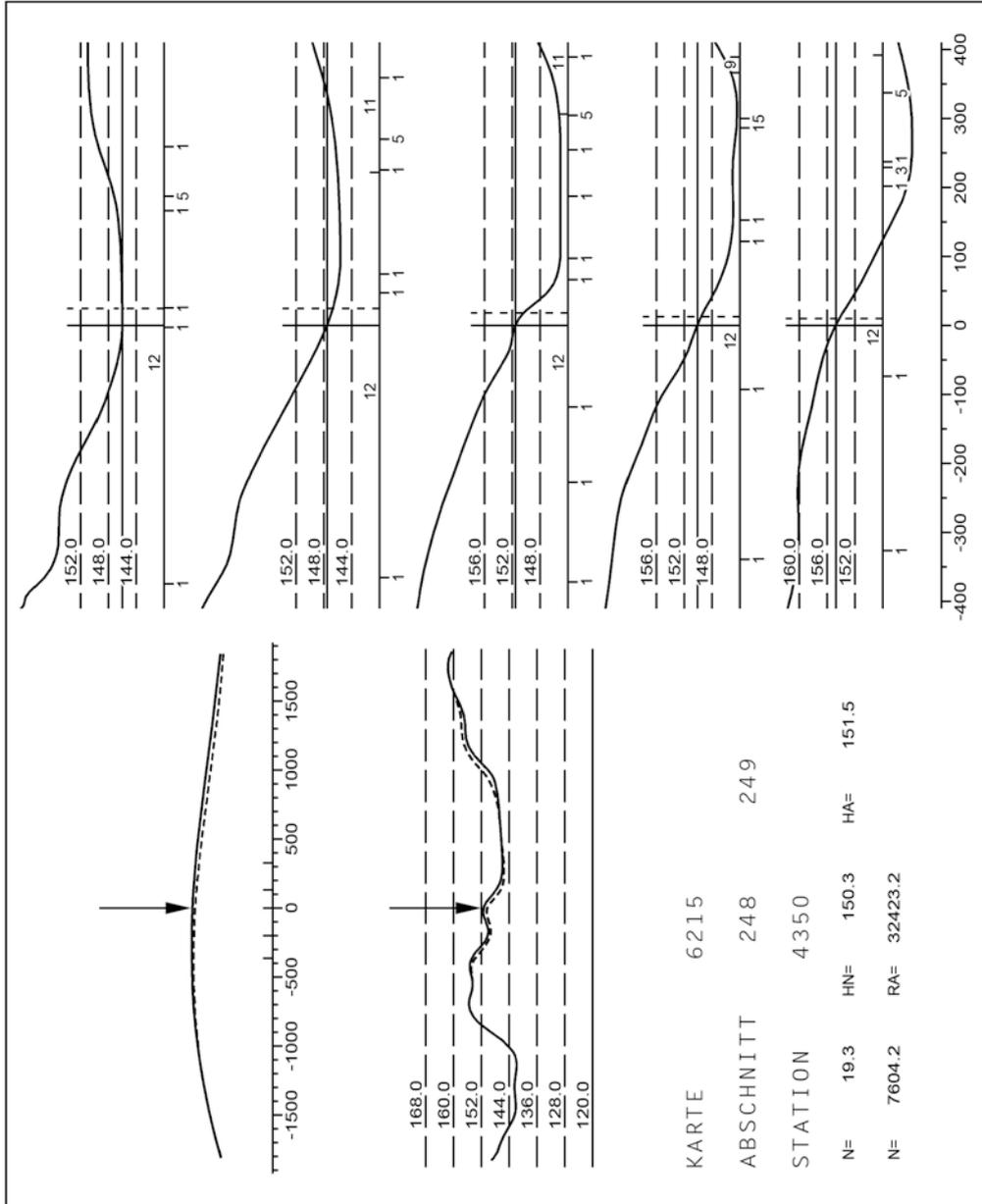


Abbildung 3: Bildschirmgraphik zur Unterstützung der Grundrißbearbeitung

trischen Restriktionen sowie die Kriterien Baukosten, Landschaftsschutz und Ästhetik gleichzeitig entsprechend ihrer Bedeutung zu berücksichtigen. Auch bei der Entwicklung von Programmsystemen ist eine Teilung des räumlichen Problems notwendig, um einerseits die Entwicklungs- und Bearbeitungskosten zu begrenzen und andererseits eine übersichtliche Bedienung des Programms im Dialogverkehr zu ermöglichen.

Um trotz dieser vereinfachenden Bearbeitung der Forderung nach räumlicher Lösung der Trassierungsaufgabe gerecht zu werden, bietet sich ein iteratives Vorgehen an, bei dem nach der Festlegung der Gradienten eine erneute Bearbeitung des Grundrisses erfolgt, danach einer Verbesserung der Gradienten durchgeführt wird und so fort, bis schließlich die optimale Lage der räumlichen Achsen festliegt. Dieses sehr aufwendige schrittweise Vorgehen läßt sich nun, wie die Erfahrung mit dem Programmsystem TROP gezeigt hat, weitgehend vermeiden, indem man bei der Grundrißbearbeitung sowohl das Längsprofil als auch die in der Nähe des betrachteten Abschnittes liegenden Querprofile als Entscheidungshilfen einbezieht.

Für die praktische Arbeit kommt es nun darauf an, diese Geländeinformationen in geeigneter Weise verfügbar zu machen. Im Programmsystem TROP geschieht dies mittels einer Bildschirmgraphik gemäß Abbildung 3. In der linken Bildhälfte werden für einen etwa drei Kilometer langen Trassenabschnitt Grundriß und Längsschnitt dargestellt. Auf der rechten Seite werden fünf Querprofile gezeigt, die so angeordnet sind, daß ihr Schnittpunkt mit der Freihandlinie lagerichtig abgebildet ist. Im linken Grundrißbild ist die Position der dargestellten Querprofile ebenfalls gekennzeichnet. Das mittlere Profil befindet sich genau an der durch den Pfeil angezeigten Stelle. Diese Graphik enthält alle wesentlichen Informationen, die zur Beurteilung und eventuellen Verbesserung der Freihandlinie wichtig sind.

Wenn nun eine Lageveränderung der Freihandlinie vorgenommen werden soll, so wird dies zweckmäßig am Bildschirm durchgeführt, da das Programm dann sofort rechnet und in allen Elementen der Abbildung 3 neben dem ursprünglichen auch den neuen Trassenverlauf zeigt. Die Verschiebung kann mit Hilfe des Bildschirmfadekreuzes in den einzelnen Querprofilen erfolgen oder günstiger für Trassenstücke durch Angabe des Verschiebungsbetrages und der zugehörigen Länge oder des neuen Krümmungsradius. Vom Programm wird dann der veränderte Trassenabschnitt an den Rändern mit der alten Achse unter Einhaltung der Mindestparameter so verbunden, daß ein glatter Übergang entsteht.

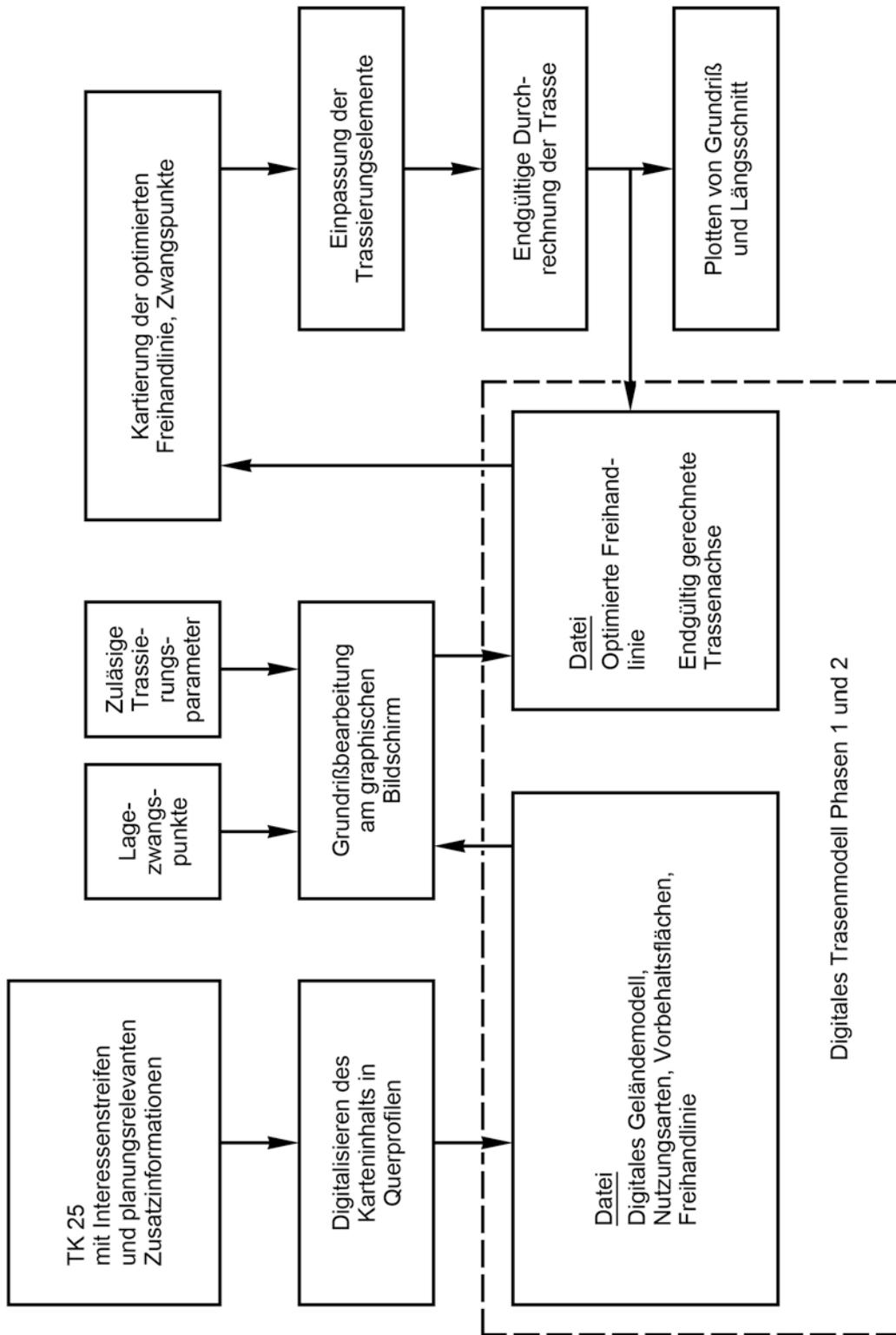


Abbildung 4: Blockdiagramm zu Phase 1 (Digitalisierung) und Phase (Grundriß) der Vorentwurfsbearbeitung

Neben der Geländeanpassung ist in diesem Arbeitsgang für die Realisierung aller betrieblichen Anforderungen an die Trasse zu sorgen. So sind bei der EMS-Trasse in regelmäßigen Abständen Geradenstücke geringer Längsneigung für die Einrichtung von Überleitstellen vorzusehen. Die Anbindungsstellen und Bahnhofsbereiche mit ihren Einschränkungen an die zulässige Gradientenführung sind einzuplanen. Weiterhin sind die Möglichkeiten für besondere systemspezifische Bauweisen, z.B. Aufständigung, zu schaffen.

Im folgenden Arbeitsschritt wird die Freihandlinie durch eine Trassenachse ersetzt, die aus den zulässigen Elementen Geraden, Übergangsbögen und Kreise besteht. Die eindeutige Verknüpfung der Trassierungselemente geschieht durch das Programmsystem TROP. Als Eingabe sind Zwangspunkte und sogenannte Fest-, Schwenk-, Puffer- und Koppелеlemente zulässig, deren Lage- und Formparameter aus der Grundrißdarstellung abgegriffen werden. Die Güte der Anpassung der Achse an die Freihandlinie hängt wesentlich von der Geschicklichkeit des Trassierungsingenieurs bei der graphischen Festlegung der Elemente ab.

Die geometrisch definierte Achse wird anschließend ins digitale Trassenmodell übernommen und mit den Querprofilen zum Schnitt gebracht. In Grundriß- und Längsprofildarstellungen wird das Ergebnis der Grundrißbearbeitung für die folgende Gradientenbearbeitung bereitgestellt.

Der Arbeitsfluß von der Digitalisierung des Inhalts der TK 25 bis zum Abschluß der Grundrißbearbeitung ist in Abbildung 4 dargestellt. Weitere Einzelheiten können CASPARY, HEISTER, WELSCH (1980a) entnommen werden.

## 5. Bearbeitung der Gradienten

Wichtigstes Hilfsmittel bei der Gradientenbearbeitung (Phase 3 des Vorentwurfs) ist der Programmbaustein EGO, der in CASPARY, HEISTER, WELSCH (1980b) ausführlich beschrieben ist. Ein dynamisches Optimierungsverfahren, zugeschnitten auf die Aufgabe der Gradientenwahl, ist in diesem Programm realisiert. Es führt auf mathematisch strengem Weg zu der kostenoptimalen Gradientenführung.

Eingabegrößen für die dynamische Optimierung sind Anfangswerte für den iterativen Algorithmus, die graphisch dem Längsprofil entnommen werden. An diese Startwerte werden keine Genauigkeitsforderungen gestellt. Das Konvergenzziel ist jedoch schneller erreicht, wenn die Näherungswerte nahe bei der optima-

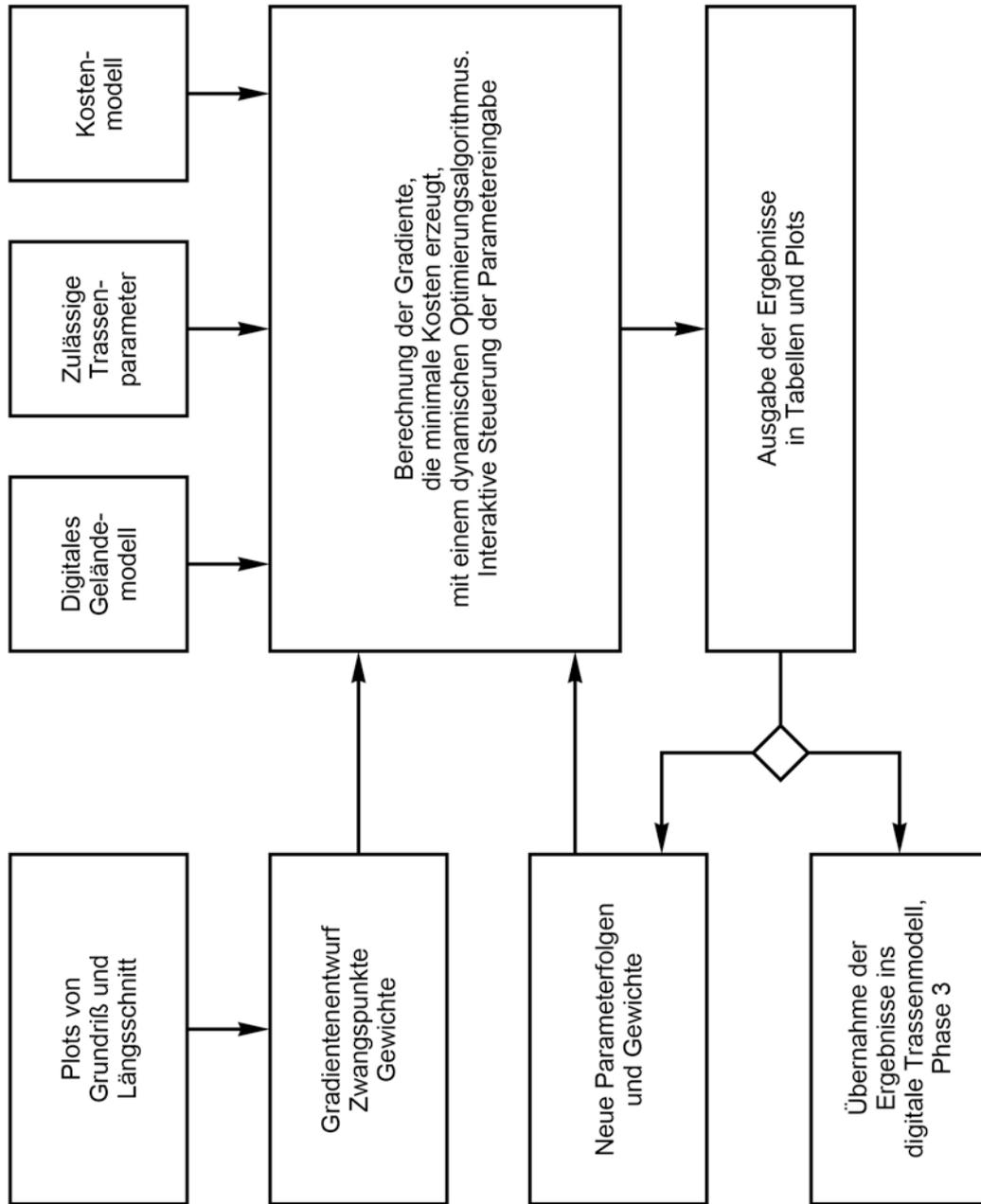


Abbildung 5: Blockdiagramm zu Phase 3 (Gradiente) der Vorentwurfsbearbeitung

len Lösung liegen.

Zur Berechnung der Zielfunktion greift das Programm auf die Geländeparameter Höhe und Querneigung des digitalen Informationsmodells zurück. Ferner wird ein Kostenmodell bereitgestellt, das in Form einer Tabelle aufgebaut ist, aus der mit den zwei Eingängen Geländehöhe minus Gradientenhöhe und Geländequerneigung die Kosten eines Trassenquerschnittes entnommen werden. Ehe nach der Querschnittsmethode die Gesamtkosten berechnet werden, werden die Stationskosten mit einem wählbaren Gewicht multipliziert. Für den Normalfall ist das Gewicht mit eins vorbesetzt. Muß ein Zwangspunkt eingehalten werden, so wird ein sehr hohes Gewicht gewählt und zugleich die Geländehöhe so verändert, daß minimale Investitionskosten in der geforderten Trassenhöhe entstehen. Durch ähnliche Manipulationen ist es möglich, in Abschnitten, wo dies sinnvoll erscheint, einen aufgeständerten oder einen in einem Einschnitt liegenden Fahrweg zu begünstigen. Ferner werden die Kosten für die Kreuzungsbauwerke, die nach der Klassifizierung des kreuzenden Verkehrsweges gestaffelt sind, bei der Berechnung der Zielfunktion einbezogen.

Alle vom Optimierungsprogramm berücksichtigten Lösungsmöglichkeiten für die Gradientenführung bestehen aus einer Folge zulässiger Trassierungsparameter. Die Restriktionen bezüglich Längsneigung und Ausrundungshalbmesser für Kuppen und Wannen werden laufend eingehalten. Das Ergebnis dieses sehr aufwendigen Bearbeitungsschrittes ist die unter Berücksichtigung aller Zwänge kostengünstigste Gerade. Weitere Einzelheiten zur dynamischen Gradientenoptimierung sind in einem eigenen Beitrag dieses Heftes dargestellt.

Wie aus dem in Abbildung 5 dargestellten Ablaufplan der Gradientenbearbeitung ersichtlich ist, wird das Ergebnis in Plänen und Tabellen dargestellt. Vor der Übernahme ins digitale Trassenmodell erfolgt eine sorgfältige Überprüfung, die dazu führen kann, daß die Optimierung mit geänderten Gewichten oder einer geänderten Anzahl von Parameterfolgen wiederholt werden muß.

## 6. Kostenberechnung und Enddarstellung

Für die in Phasen zwei und drei der Vorentwurfsbearbeitung festgelegte Trassenführung wird mit der größt möglichen Genauigkeit eine Investitionskostenberechnung durchgeführt. Das Ergebnis hängt natürlich in starkem Maße von den gewählten Kostensätzen für Grunderwerb, Erdmassenbewegung, Baumaßnahmen und anderem ab. Solange es jedoch lediglich zum Vergleich konkurrierender Varianten benutzt wird, ist diese Unsicherheit nahezu bedeutungslos.

Der zweite wesentliche Einflußfaktor auf die Sicherheit der Kostenrechnung ist die Höhengenaugigkeit der TK 25. Bei der realistischen Annahme einer Standardabweichung von  $\pm 2$  m für die digitalisierten Höhen ergab eine detaillierte Genauigkeitsschätzung einen relativen mittleren Fehler von 1-2 % für die Kosten eines 20 km langen Trassenstückes, das in 100 Querprofilen digitalisiert vorlag. Bei längeren Trassenabschnitten nimmt der relative Fehler wie  $1/\sqrt{n}$  ab, wenn n das Vielfache von 20 km ist. Einzelheiten zur Kostenberechnung sind in dem Beitrag "Kostenmodelle" von SCHWINTZER, STÖCKL in diesem Heft erläutert.

Für die Durchführung der Kostenermittlung wurde der Programmbaustein TRAKO entwickelt, der zugleich eine Reihe von statistischen Auswertungen zur Trassenbeschreibung erledigt. Insbesondere wird eine Massenbilanz aufgestellt und eine Aufschlüsselung der Kosten nach Kostenarten durchgeführt. Ferner wird der Anteil der Fahrwegarten in dem bearbeiteten Abschnitt und der Flächenverbrauch ermittelt.

Diese Ergebnisse sind zusammen mit den Trassenplänen in Grundriß und Längsprofil und der TK 25 Grundlagen der Endbegutachtung. Hierbei stehen system-spezifische Gesichtspunkte und Kriterien der Ästhetik und der Umweltbelastung im Vordergrund, die bisher, insbesondere bei der Gradientenfestlegung, dem Kostenkriterium untergeordnet wurden. Entscheidungen zur Änderung der Gradientenführung, die in vielen Fällen an dieser Stelle getroffen werden, führen zu einer Erhöhung der Investitionskosten, die durch eine erneute Kostenberechnung nachgewiesen werden.

Abbildung 6 zeigt den Arbeitsfluß in der letzten Phase der Vorentwurfsbearbeitung und in Abbildung 7 ist ein verkleinerter Ausschnitt aus der graphischen Darstellung des Endergebnisses wiedergegeben. Diese Darstellung ist so aufgebaut, daß Grundriß und Längsprofil gleichzeitig mit eindeutiger Zuordnung betrachtet werden können. Sie ist durch eine Vielzahl von Zusatzinformationen ergänzt, die sich selbst erklären. Vor der Ausgabe wird der Grundrißteil mit der TK 25 zusammenkopiert, so daß für die Gesamtbeurteilung des Ergebnisses alle wünschenswerten Daten in Grundriß und Profil bereitstehen und damit eine weitgehend räumliche Betrachtung ermöglichen.

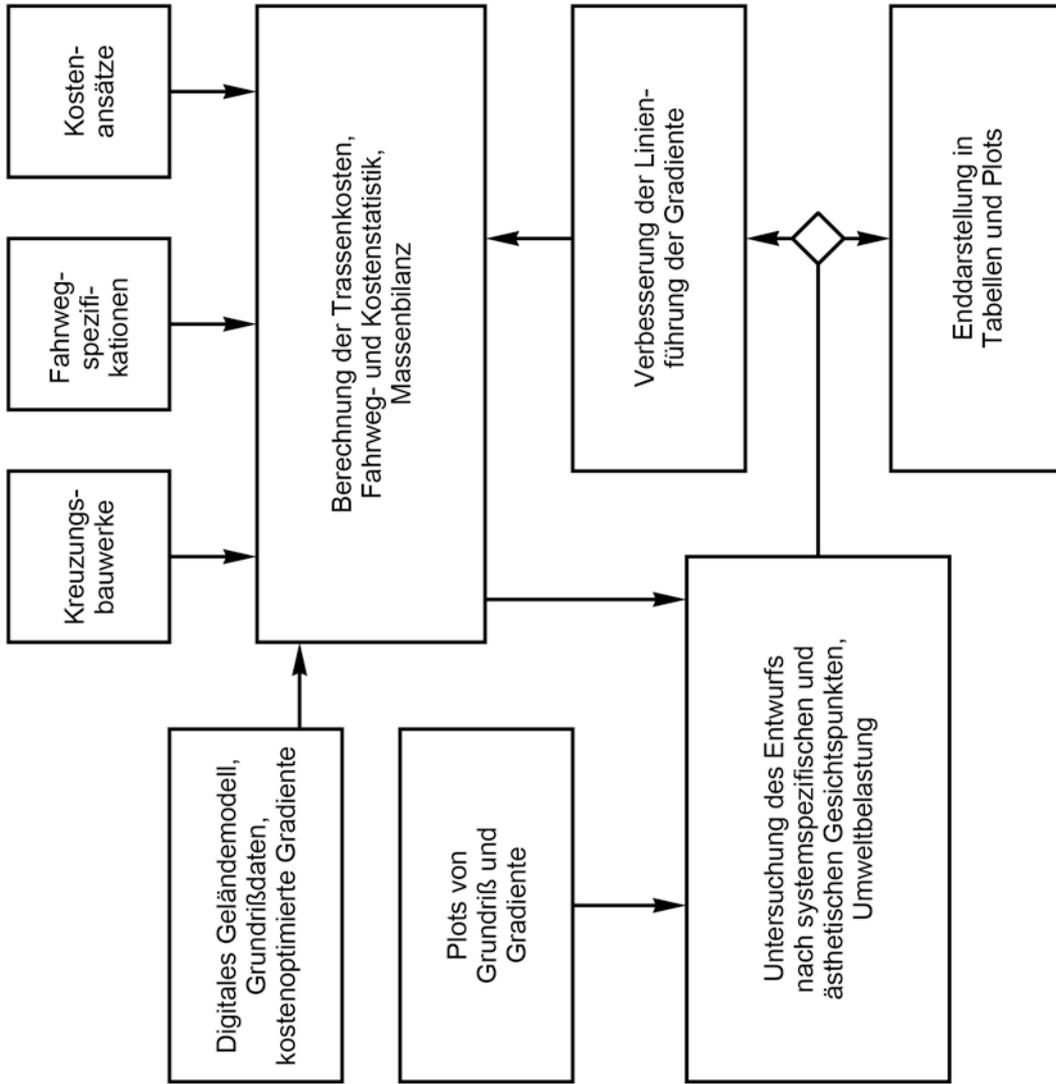


Abbildung 6: Blockdiagramm zu Phase 4 (Kostenberechnung und Enddarstellung) der Vorentwurfsbearbeitung

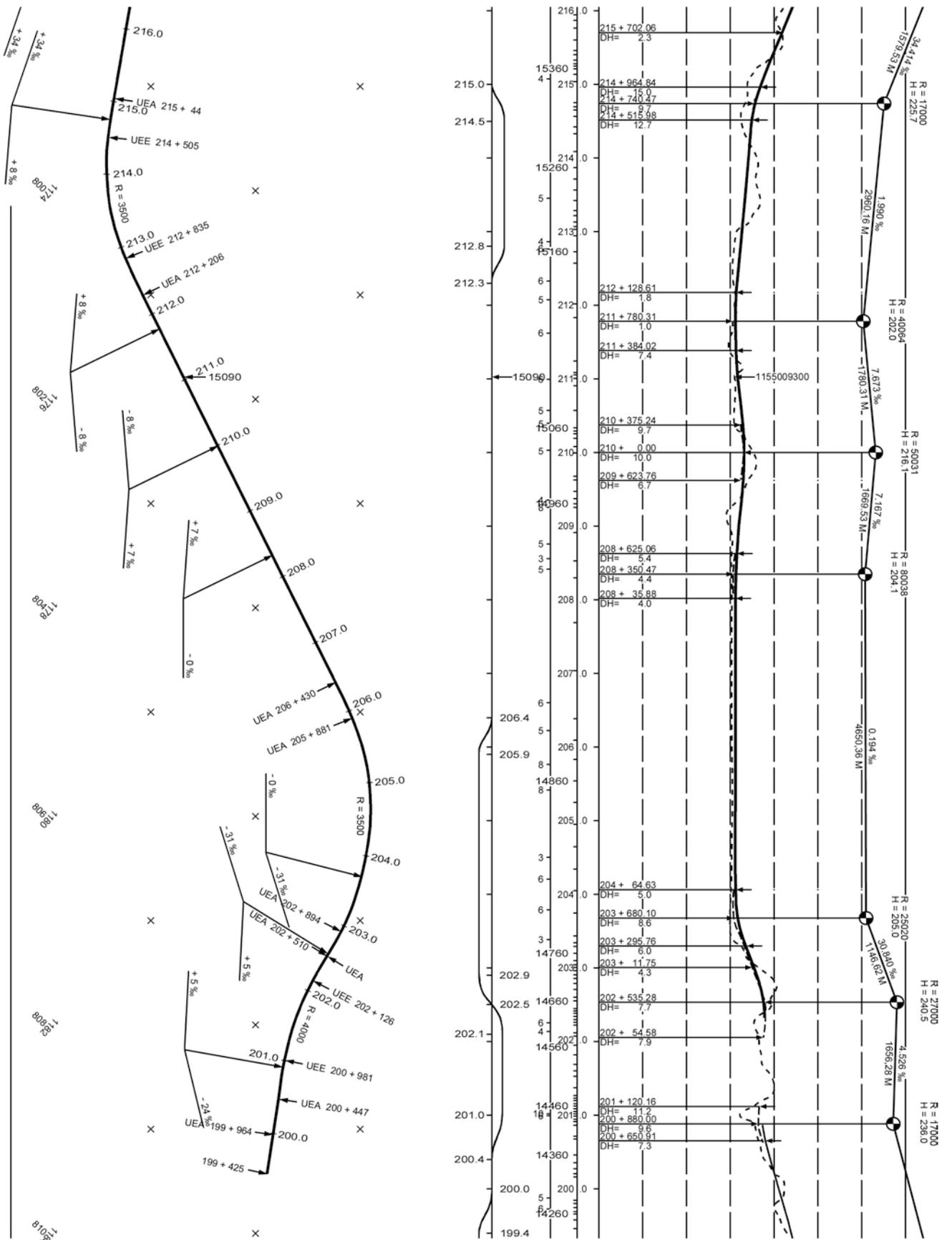


Abbildung 7: Verkleinerter Ausschnitt aus der Darstellung des Endergebnisses

## 7. Zusammenfassung

Mit dem Programmsystem TROP wird eine weitgehend interaktive Entwicklung eines Trassenvorentwurfs ermöglicht. Der Trassierungsingenieur wird von allen Routinearbeiten befreit und kann sich verstärkt auf die erforderlichen Entscheidungen konzentrieren, die mit TROP fundierter getroffen werden können, da einerseits die rechnerisch darstellbaren Entscheidungskriterien schnell zur Verfügung stehen und andererseits eine weitgehend räumliche Beurteilung ermöglicht wird, weil Grundriß und Profil stets gemeinsam betrachtet werden können.

Das Programm hat sich in zwei Trassierungsstudien von je etwa 500 km Länge gut bewährt.

## Literatur

- 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

Struktur, Verwaltung und Verarbeitung  
der Daten im Rahmen des  
Programmsystems TROP

Prof. Dr.-Ing. G. Böge  
Dipl.-Ing. P. Fors

## INHALT

1. Systemübersicht und Schnittstellen
  - 1.1 Kurzbeschreibung der Programmfunktionen
  - 1.2 Systemübersicht
  - 1.3 Schnittstellen
2. Dateiaufbau
3. Programm TROP10
  - 3.1 Allgemeine Erläuterungen
  - 3.2 Datenstruktur
  - 3.3 Algorithmen
4. Programm TROP20
  - 4.1 Allgemeine Erläuterungen
  - 4.2 Datenstruktur
  - 4.3 Algorithmen
5. Programm TROP25
  - 5.1 Allgemeine Erläuterungen
  - 5.2 Datenstruktur
  - 5.3 Algorithmen
6. Spline-Interpolation
  - 6.1 Spline-Interpolation zwischen zwei Punkten
  - 6.2 Spline-Interpolation  $y = f(x)$
  - 6.3 Spline-Interpolation  $x = x(s), y = y(s)$

## 1. Systemübersicht und Schnittstellen

### 1.1 Kurzbeschreibung der Programmfunktionen

#### 1.1.1 TROP10

In eine Landkarte wird eine Trasse mit Querprofilen eingezeichnet. Mithilfe des Programms TROP10 werden Grundriß- und Höhenkoordinaten ausgewählter Punkte auf diesen Querprofilen am Digitalisiertisch aufgenommen und in FILE20 permanent abgespeichert. Die aufgenommenen Querprofile können auf einem grafischen Bildschirm dargestellt werden.

#### 1.1.2 TROP20

TROP20 erzeugt unter Benutzung von FILE20 Trassenabschnitte. Trassenabschnitte bestehen aus einer vom Benutzer zu definierenden Folge von Querprofilen. Auf einem grafischen Bildschirm werden ein Teil des Grund- und des Aufrisses der Trasse sowie 5 darin befindliche Querprofile dargestellt. Mittels Fadenkreuz kann die Lage der Trasse im mittleren der dargestellten Querprofile verändert werden. Die damit bewirkte Verschiebung der Trasse wird im Grund- und Aufriß eingezeichnet. Die Trasse kann auch in mehreren benachbarten Querprofilen parallel verschoben und im Übergangsbereich mit kubischen Parabeln an die alte Trasse angeschlossen werden. Die Abschnittsdaten der digitalisierten Trasse aus TROP10 und der geglätteten Trasse aus TROP20 werden in FILE21 abgespeichert.

#### 1.1.3 TROP25

TROP25 erzeugt unter Benutzung von FILE20 und FILE21 Varianten. Varianten bestehen aus einer vom Benutzer zu definierenden Folge von Trassenabschnitten. Sie können wahlweise zusätzlich Sonderquerprofile enthalten, die entweder mit TROP10 aufgenommen oder lediglich durch die Koordinaten und Höhenlage des Trassenpunktes gekennzeichnet sind. TROP25 stellt diese Varianten im Grund- und Aufriß sowie evtl. mit Krümmungsband dar. Varianten können auf drei verschiedene Arten definiert sein:

- 1.) Varianten mit geglätteter Trasse aus TROP20
- 2.) Varianten mit geometrischem Grundriß

Ein geometrischer Grundriß besteht aus einer Folge von Geraden und Kreisen, die durch Übergangsbögen verbunden sind. Die Übergangsbögen können biquadratische oder kubische Parabeln, Klothoide oder Sinusoide sein. Schneidet man den geometrischen Grundriß mit den Querprofilen und ermittelt über den dadurch in den Querprofilen definierten Trassenpunkten durch Spline-Interpolation die Geländehöhen, so erhält man den zugehörigen Aufriß. Die Daten von geometrischem Grundriß und zugehörigem Aufriß werden in FILE22 als "geglättete Trasse" abgespeichert. Die Definition des geometrischen Grundrisses kann auf drei verschiedene Arten eingegeben werden:

- Eingabe am alphanumerischen Sichtgerät im Dialog,
- Eingabe von FILE24, der die geometrischen Grundrisse der Varianten für das aktuelle Bild enthält,
- Eingabe von FILE31, in dem alle zuvor definierten geometrischen Grundrisse permanent gespeichert sind.

Bei den ersten beiden Eingabearten wird der geometrische Grundriß anschließend auf FILE31 permanent abgespeichert.

### 3.) Varianten mit geometrischem Grund- und Aufriß

Ein geometrischer Aufriß besteht aus einer Folge von Geraden und Kreisen. Die Definition des geometrischen Aufrisses kann auf drei verschiedene Arten eingegeben werden:

- Eingabe am alphanumerischen Sichtgerät im Dialog,
- Eingabe von FILE27, der die geometrischen Aufrisse der Varianten für ein Bild enthält,
- Eingabe von FILE32, wo alle geometrischen Aufrisse permanent gespeichert sind.

Bei den ersten beiden Eingabearten wird der geometrische Aufriß anschließend auf FILE32 permanent gespeichert.

Die Stationsdaten des geometrischen Aufrisses werden in FILE28 abgespeichert. Zusätzlich werden in FILE26 die Koordinaten der Anfangspunkte der geometrischen Elemente abgelegt.

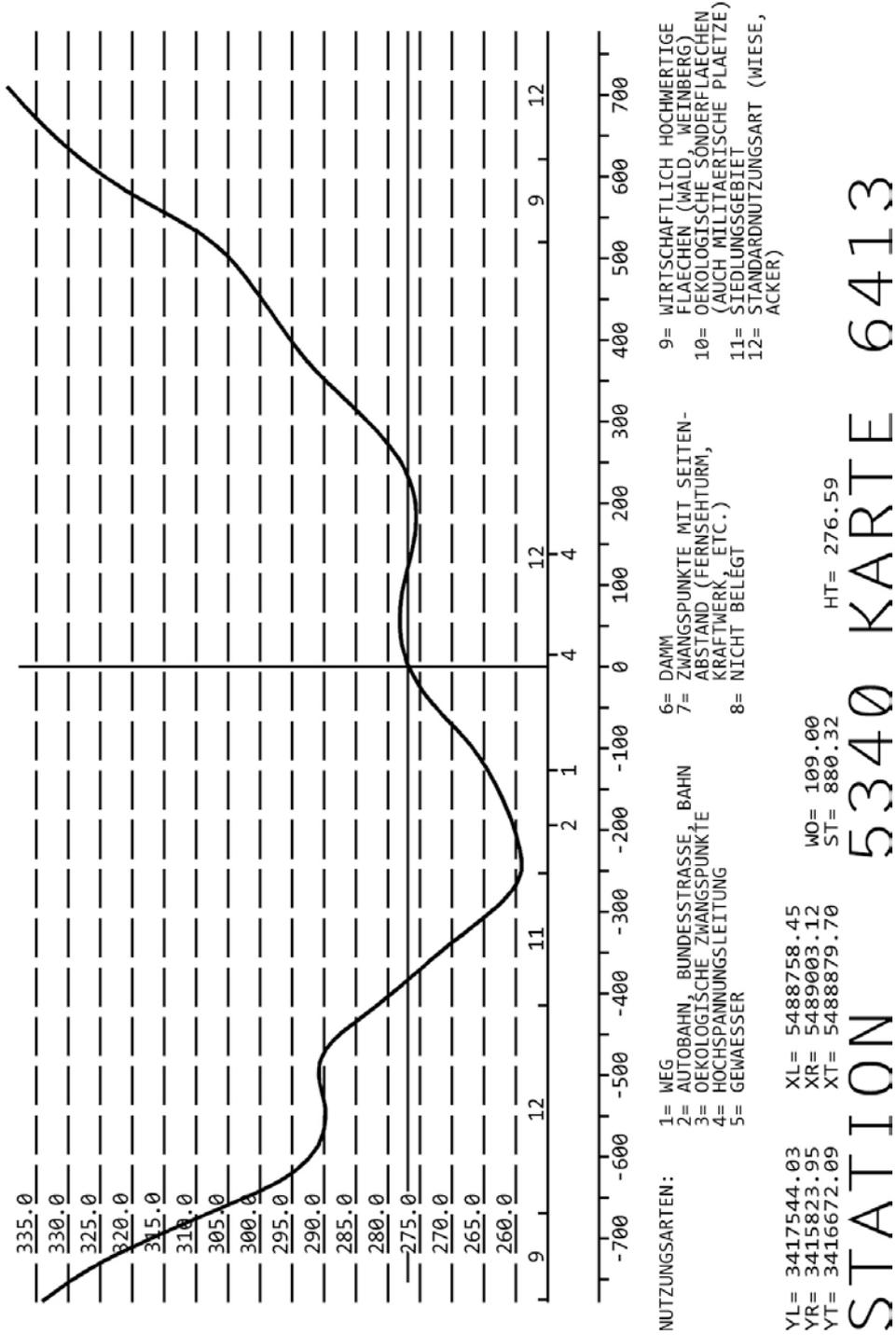
Für die Varianten 2 und 3 wird zusätzlich zu Grund- und Aufriß ein Krümmungsband gezeichnet.

Sind Sonderprofile vorhanden, so wird ihre Lage unter Angabe einer

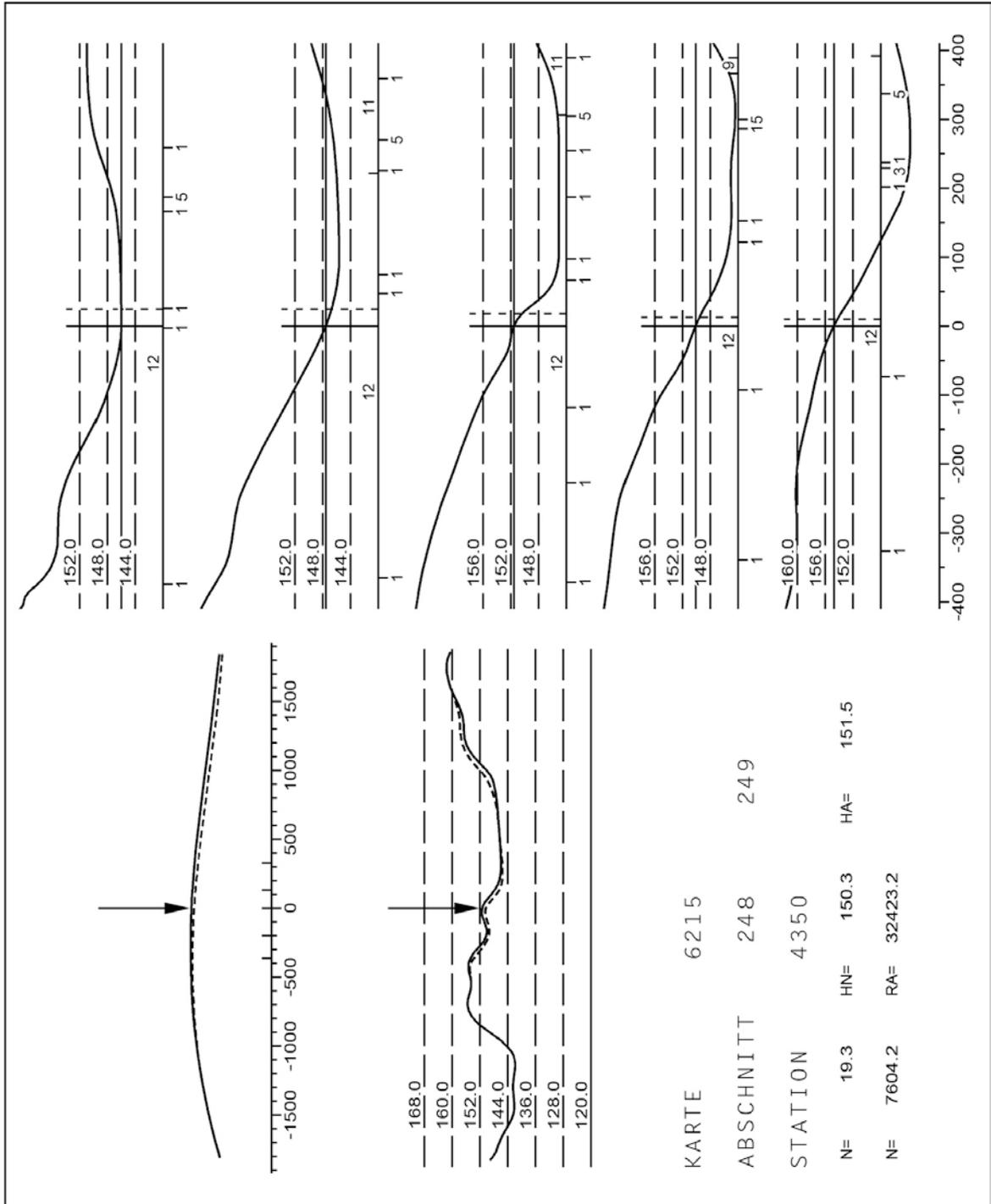
Kurzbezeichnung für die Art des Sonderquerprofils im Aufriß eingetragen. In TROP25 berechnete Sonderprofildaten werden auf FILE29 abgespeichert.

Auf den folgenden Seiten sind zur Illustration einige der vom Programmsystem TROP erzeugte Graphiken dargestellt.

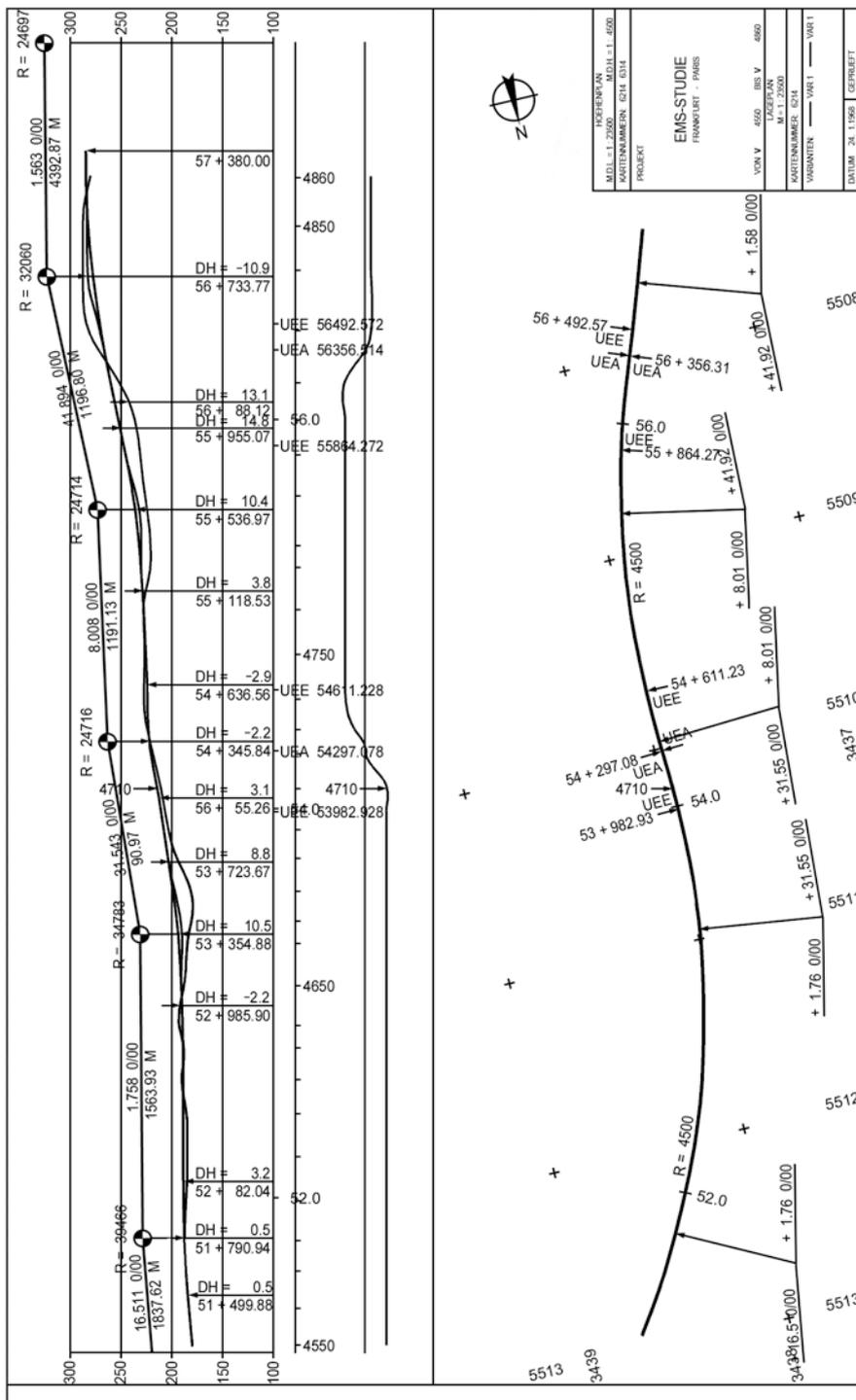
TROP10 - Graphische Darstellung eines Querprofils



TROP20 - Graphische Korrektur der Trassenlage



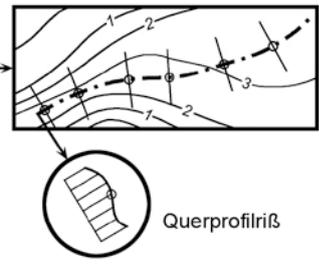
TROP25 - Graphische Darstellung der Trasse



1.2. Systemübersicht

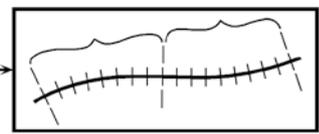
TROP 10

Aufnahme von Querprofilen mit Trassenlage am Digitalisiergerät

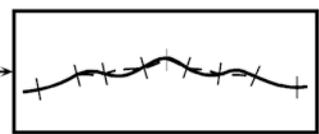


TROP 20

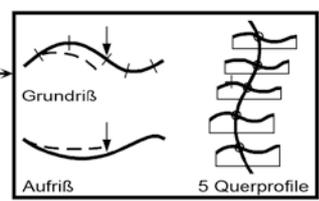
Definition von Abschnitten durch Zusammenfassung von Querprofilfolgen



Herstellung eines stetigen Übergangs zwischen den Abschnitten durch Spline-Interpolation

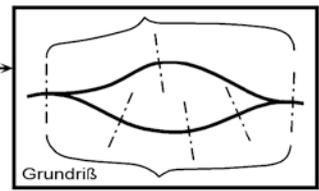


Darstellung von 5 Querprofilen und Verschiebung der Trassenlage im mittleren Querprofil



TROP 25

Definition von Varianten durch Zusammenfassung von Abschnittfolgen



Definition von Sonderquerprofilen

Darstellung von mit TROP20 aufgenommenen Varianten in Grund- und Aufriß

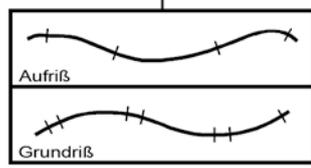
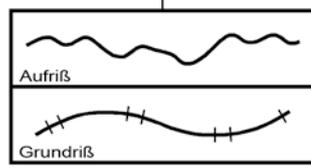
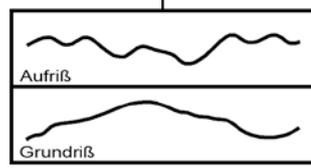
Eingabe von geometrischen Grundrißelementen

Eingabe von geometrischen Grund- und Aufrißelementen

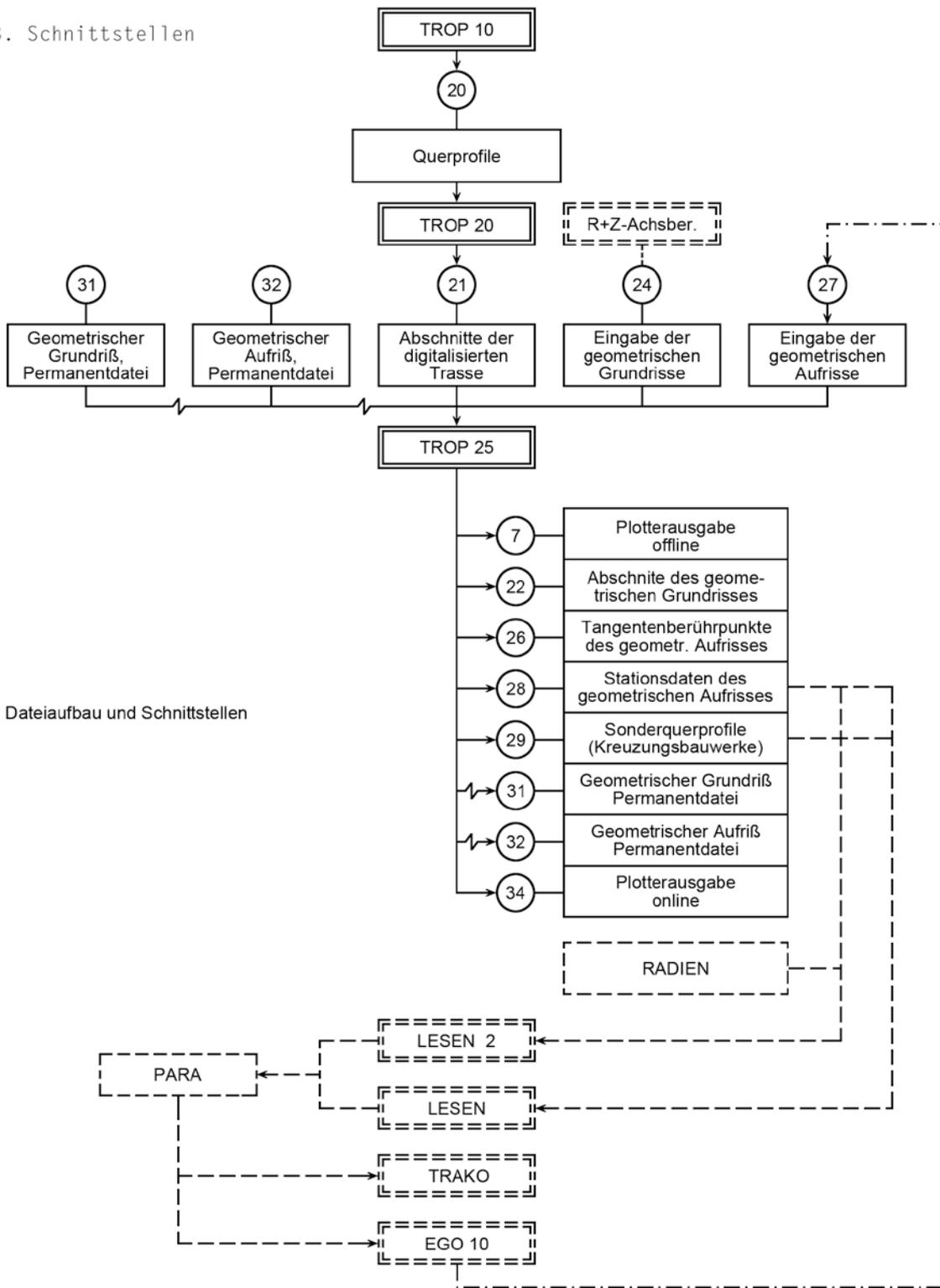
Darstellung von mit TROP20 aufgenommenen Varianten in Grund- und Aufriß

Darstellung von geometrischem Grundriß und dazugehörigem Gelände im Aufriß

Darstellung von geometrischem Grund- und Aufriß



### 1.3. Schnittstellen



Dateiaufbau und Schnittstellen

— Wahlweise Ein- oder Ausgabe

— Informationsfluß

— Andere Programmsysteme und Dateien

▭ Programmsystem

○ Datei mit zugehöriger Kanalnummer

Aus dem oben dargestellten Dateiverzeichnis mit Schnittstellen ist zu ersehen, daß die Programmsysteme TROP10 und TROP20 nur über FILE20 und FILE21 mit anderen Programmsystemen kommunizieren. Dagegen verfügt das Programmsystem TROP25 über mehrere Schnittstellen zu anderen Systemen. Auf der Eingabeseite wird FILE24 - Eingabe des geometrischen Grundrisses - von den Ergebnissen des Programms "R+Z-Achsberechnung" bestimmt. Dieses Programm definiert den geometrischen Grundriß. FILE27 - Eingabe des geometrischen Aufrisses - wird von den Ergebnissen des Programms EG010 bestimmt; dieses Programm optimiert den geometrischen Aufriß. Auf der Ausgabeseite beeinflussen wiederum FILE28 - Stationsdaten des geometrischen Aufrisses - und FILE29 - Sonderquerprofilaten - über die Programme LESEN und LESEN2 die Eingabewerte für die Programme EG010 und TRAKO. TRAKO berechnet die Kosten der geometrischen Trasse.

## 2. Dateiaufbau

### 2.1. FILE20 - Querprofildaten

Von TROP10 wird die Querprofildatei FILE20 erzeugt. FILE20 enthält 3 Arten von Sätzen:

- 1) 1 Kopfsatz
- 2) nsqp Sätze mit Querprofilparametern, nsqp = 1s20-20
- 3) beliebig viele Sätze mit Querprofildaten

#### 2.1.1. Kopfsatz

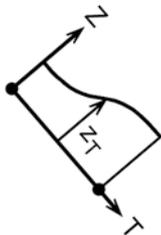
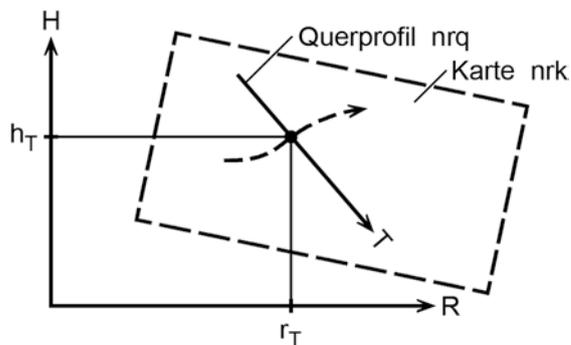
Nr.	Name	Bedeutung
1	mqp	Anzahl Parameter je Querprofil
2	nqpmax	Maximale Anzahl Querprofilparameter je Satz
3	1s20	Satzlänge in Worten
4	nq	Anzahl in FILE20 vorhandener Querprofile
5	ns20	Anzahl in FILE20 vorhandener Sätze
6	ix	1. freier Speicherplatz im letzten Satz mit Querprofildaten
7	nrsqv	Nr. des aktuell im Kernspeicher vorhandenen Satzes mit Querprofildaten
8	nrsqpv	Nr. des aktuell im Kernspeicher vorhandenen Satzes mit Querprofilparametern
9-20	RR	Reserve
21-1s20	NRSQ	Nummern der Sätze mit Querprofilparametern



### 2.1.2. Satz mit Querprofilparametern

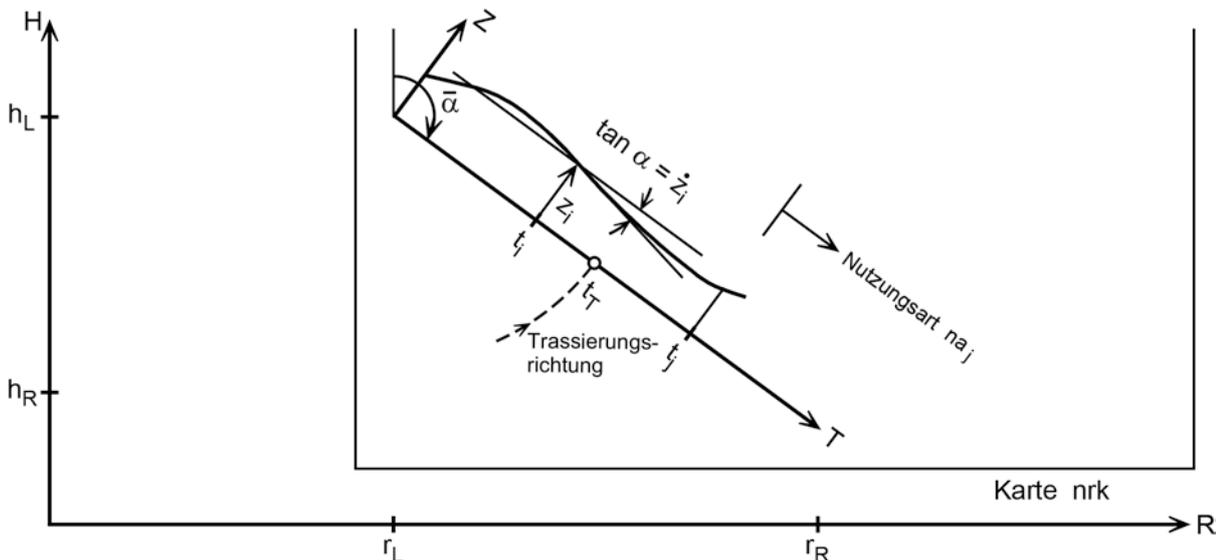
Nr.	Name	Bedeutung
i,1	nrq	Querprofilnummer
i,2	$r_T$	Rechtswert des Trassenpunkts
i,3	$h_T$	Hochwert des Trassenpunkts
i,4	$z_T$	Geländehöhe des Trassenpunkts
i,5	nrsq	Nummer des Satzes, in dem die zugehörigen Querprofil- datums gespeichert sind
i,6	ix	Position des ersten Querprofildatums im Satz nrsq
i,7	nrk	Kartenummer

$i = 1, nqpmax$



### 2.1.3. Satz mit Querprofildaten

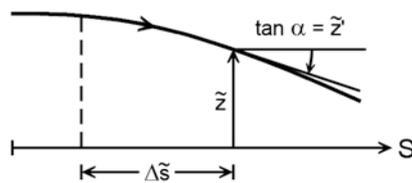
Nr.	Name	Bedeutung
ix	nhlp	Anzahl der Höhenlinienpunkte
ix+1	npna	Anzahl der Nutzungspunkte
ix+2	$r_L$	Rechtswert
ix+3	$h_L$	Hochwert
ix+4	$r_R$	Rechtswert
ix+5	$h_R$	Hochwert
ix+6	$t_T$	Querprofilkoordinate des Trassenpunkts
ix+7	$\bar{\alpha}$	Winkel des Querprofils zur Nordrichtung
ix+8	nrk	Kartenummer
ix+9	RR	Reserve
ixhlp	HLP(3,nhlp)	für jeden Höhenlinienpunkt: 1. $t_i$ -Querprofilkoordinate 2. $z_i$ -Geländehöhe 3. Steigung $\dot{z}_i = \frac{dz}{dt}$ $i = 1, nhlp; ixhlp = ix20$
ixpna	PNA(2,npna)	für jeden Nutzungsartpunkt: 1. $t_j$ -Querprofilkoordinate 2. $na_j$ -Nr. der neuen Nutzungsart $j = 1, npna; ixpna = ixhlp + 3 \cdot nhlp$



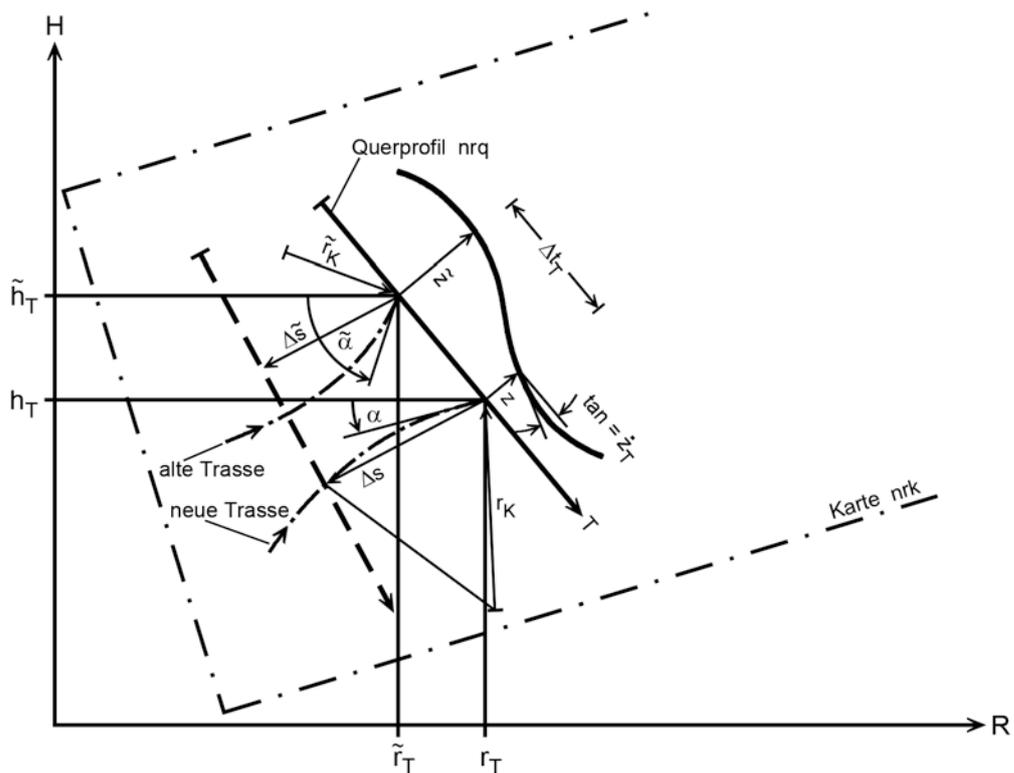
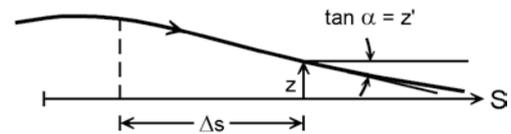
Bemerkungen:

1. Die alten Abschnittsdaten werden von TROP10 aus der digitalisierten Trasse entnommen. Die neuen Abschnittsdaten werden aus TROP20 durch numerische oder grafische Verschiebung der Trasse erhalten. Wird keine Verschiebung des Trassenpunkts vorgenommen, so sind die neuen gleich den alten Abschnittsdaten.
2. Geländehöhe und Geländequerneigung im neuen Trassenpunkt werden durch Spline-Interpolation im Querprofil zwischen den zwei benachbarten Höhenpunkten ermittelt.

Aufriß alte Trasse



Aufriß neue Trasse



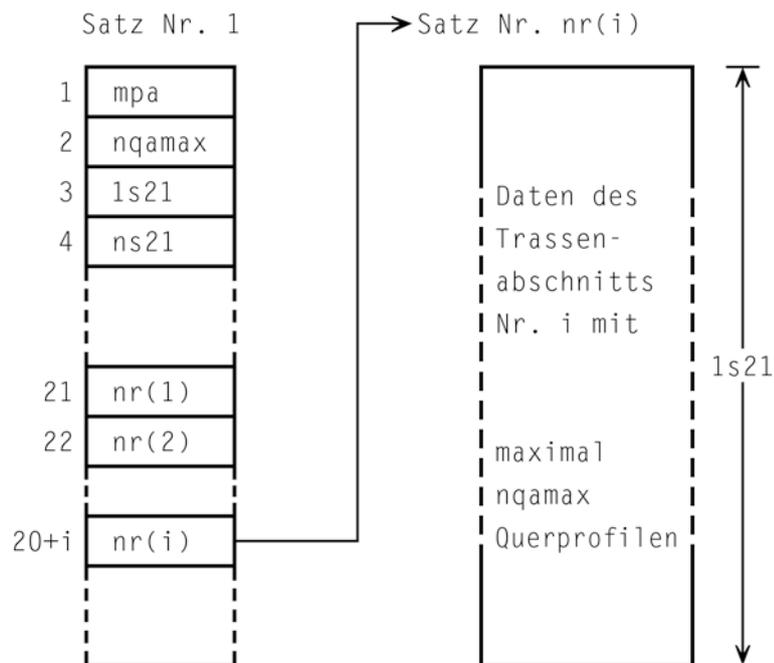
## 2.2. FILE21 - Abschnittsdaten der geglätteten Trasse

Unter Verwendung des von TROP10 aufgebauten FILE20 wird von TROP20 die Datei FILE21 erzeugt. Sie enthält 2 Arten von Sätzen:

- 1) 1 Kopfsatz
- 2) nsa Sätze mit Trassenabschnittsdaten; nsa = 1s21-20

### 2.2.1. Kopfsatz

Nr.	Name	Bedeutung
1	mpa	Anzahl Parameter je Querprofil
2	nqamax	Maximale Anzahl Querprofile je Abschnitt
3	1s21	Satzlänge in Worten
4	ns21	Anzahl vorhandener Sätze
5-20	RR	Reserve
21-1s21	NRSA	Physikalische Satznummern der Abschnitte



### 2.2.2. Satz mit Abschnittsdaten

Nr.	Name	Bedeutung
i,1	nrq	Querprofilnummer
i,2	$\tilde{r}_T$	Rechtswert
i,3	$\tilde{h}_T$	Hochwert
i,4	$\tilde{z}_T$	Geländehöhe
i,5	$r_T$	Rechtswert
i,6	$h_T$	Hochwert
i,7	$z_T$	Geländehöhe
i,8	nrsq	Nummer des Satzes von FILE20, der die zugehörigen Querprofildaten enthält
i,9	ix	Position des ersten Querprofildatums in diesem Satz
i,10	nrk	Kartenummer
i,11	$\Delta\tilde{s}$	Abstand vom vorangehenden Trassenpunkt für alte Trasse
i,12	$\Delta s$	Abstand vom vorangehenden Trassenpunkt für neue Trasse
i,13	$\tilde{\alpha}$	Neigungswinkel der alten Trasse im Grundriß
i,14	$\alpha$	Neigungswinkel der neuen Trasse im Grundriß
i,15	$\tilde{z}' = \frac{d\tilde{z}}{ds}$	Steigung der alten Trasse im Aufriß
i,16	$z' = \frac{dz}{ds}$	Steigung der neuen Trasse im Aufriß
i,17	$\Delta t_T$	Abstand des alten Trassenpunkts vom neuen
i,18	$\tilde{r}_K$	alter Krümmungsradius
i,19	$r_K$	neuer Krümmungsradius
i,20	$\dot{z}_T = \frac{dz}{dt} \Big _{t=t_T}$	Geländequerneigung im neuen Trassenpunkt

---

i = 1, nqamax

### 2.3. FILE22 - Abschnittsdaten der geometrischen Trasse

FILE22 ist wie FILE21 aufgebaut, enthält jedoch als "neue" Trasse den in TROP25 eingegebenen geometrischen Grundriß mit dem dazugehörigen Gelände im Aufriß. Die alte Trasse ist wie in FILE21 die digitalisierte Trasse aus TROP10.

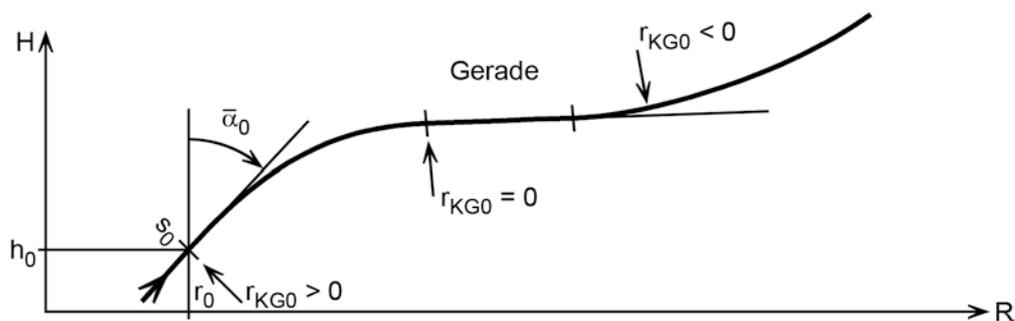
## 2.4. FILE24 - Eingabe des geometrischen Grundrisses

Für jedes Grundribelement werden in TROP25 folgende Daten eingegeben und auf FILE24 gespeichert.

Nr.	Name	Bedeutung
1	$s_0$	Stationierung des Anfangspunktes
2	$r_{KG0}$	Krümmungsradius Rechtskrümmung in Trassierungsrichtung: + Linkskrümmung in Trassierungsrichtung: - Gerade: 0
3	A	für klothoidenförmige Übergangsbögen: Parameter $A = \sqrt{r_{KG} \cdot s}$ für andere Übergangsbögen: ohne Bedeutung
4	$\bar{\alpha}_0$	Winkel der Tangente im Anfangspunkt zur Nordrichtung
5	$r_0$	Rechtswert
6	$h_0$	Hochwert
		} des Anfangspunkts
7	kzueb	Kennzahl für Form des Übergangsbogens: 0 = Klothoide 3 = kubische Parabel 4 = biquadratische Parabel 5 = Sinusoide

### Bemerkungen:

1. FILE24 enthält in einem Satz die Werte eines Grundribelements.
2. FILE24 kann die geometrischen Grundrisse mehrerer Varianten eines Bildes enthalten; eine Variante wird durch  $s_0 = -1$ . abgeschlossen.

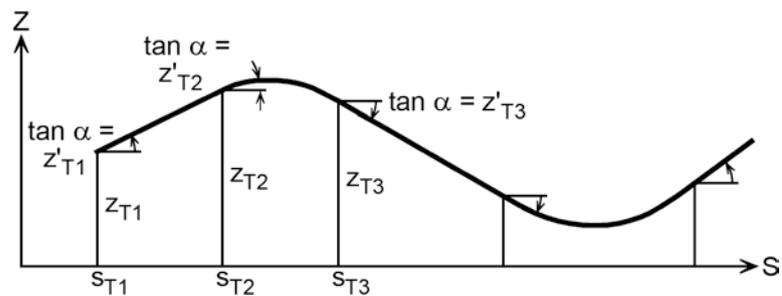


## 2.5. FILE26 - Tangentenberührungspunkte im geometrischen Aufriß

Der geometrische Aufriß wird durch die Koordinaten der Tangentenschnittpunkte und die Ausrundungsradien definiert. Die Koordinaten der Tangenten-Berührungspunkte - dies sind diejenigen Punkte, in denen der Ausrundungskreis die Tangenten berührt - werden in FILE26 abgespeichert.

Auf FILE26 können die Koordinaten der Tangenten-Berührungspunkte mehrerer Varianten abgespeichert werden. Die Koordinaten einer Varianz werden durch  $s_T = -1$ . abgeschlossen.

Nr.	Name	Bedeutung
1	$s_T$	Stationierung des Tangenten-Berührungspunkts
2	$z_T$	Höhe des Tangenten-Berührungspunkts
3	$z'_T$	Steigung im Tangenten-Berührungspunkt



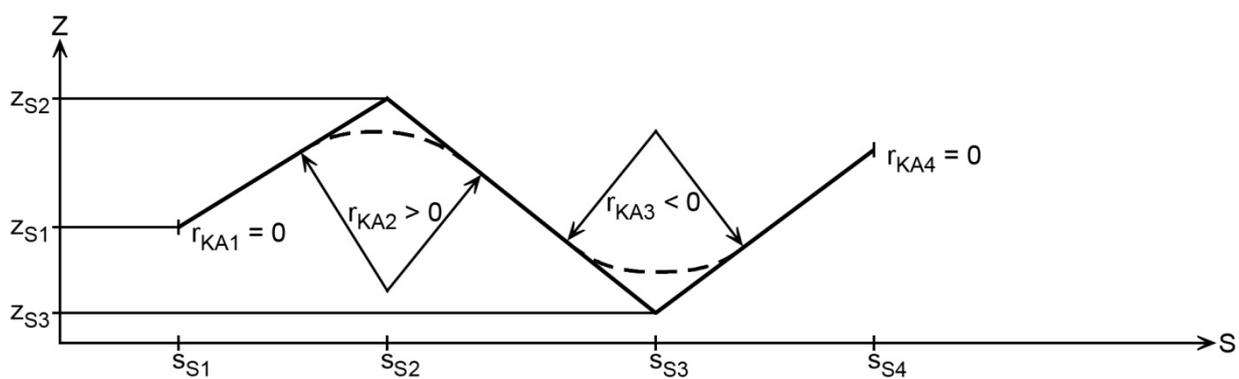
## 2.6. FILE27 - Eingabe des geometrischen Aufrisses

Für jedes Aufribelement werden in TROP25 folgende Daten eingegeben und auf FILE27 gespeichert:

Nr.	Name	Bedeutung
1	$s_s$	Stationierung des Tangentenschnittpunkts
2	$z_s$	Höhe des Tangentenschnittpunkts
3	$r_{KA}$	Ausrundungsradius: Kuppe: + Wanne: - Gerade: $\emptyset$

### Bemerkungen:

1. FILE27 enthält in einem Satz die Werte eines Aufribelements.
2. FILE27 kann die geometrischen Aufrisse mehrerer Varianten eines Bildes enthalten; eine Variante wird durch  $s_s = -1$ . abgeschlossen.



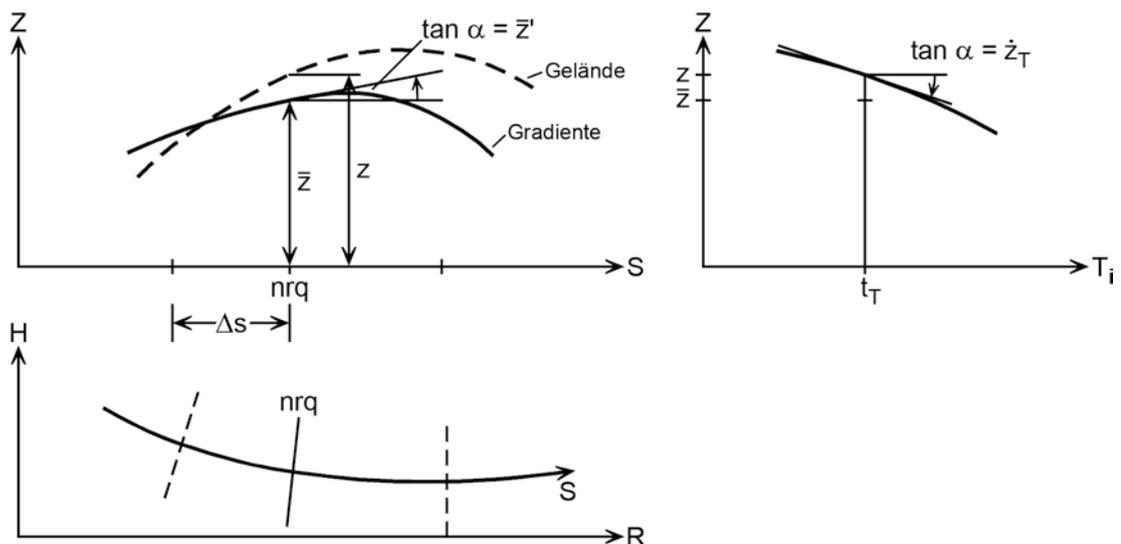
## 2.7. FILE28 - Stationsdaten des geometrischen Aufrisses

FILE28 enthält die Stationsdaten des geometrischen Aufrisses.

Nr.	Name	Bedeutung
1	nrq	Querprofilnummer
2	s	Stationierung
3	$\Delta s$	Abstand zur vorangehenden Station
4	$\bar{z}$	Höhe des geometrischen Aufrisses
5	$\bar{z}' = \frac{d\bar{z}}{ds}$	Längsneigung des geometrischen Aufrisses
6	z	Geländehöhe
7	$\frac{1}{z_T} = \frac{1}{\frac{dz}{dt} \Big _{t=t_T}}$	Querneigung im Trassenpunkt
8	nrk	Kartenummer
9	sqtyp	Sonderquerprofiltyp

### Bemerkungen:

1. Jeder Satz von FILE28 enthält die Daten eines Stationpunktes.
2. In FILE28 sind auch die Sonderquerprofile enthalten. Für Sonderquerprofile, die nicht mit TROP10 aufgenommen worden sind, haben die Parameter 1, 6, 7 die Werte Null.



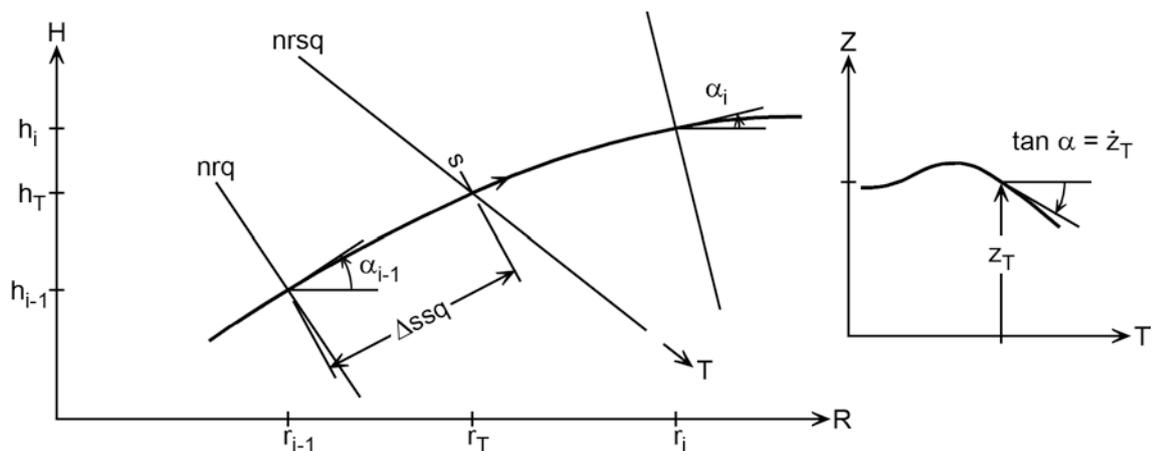
## 2.8. FILE29 - Sonderquerprofildaten

Für jedes Sonderquerprofil werden folgende Daten abgespeichert:

Nr.	Name	Bedeutung
1	sotyp	2 Zeichen als Kurzbezeichnung des Sonderquerprofils
2	nrsq	Nummer des Sonderquerprofils
3	nrq	Nummer des voranliegenden Regelquerprofils
4	$r_T$	Rechtswert
5	$h_T$	Hochwert
		} des neuen Trassenpunkts
6	$\Delta ssq$	Abstand des Trassenpunkts vom Trassenpunkt des voranliegenden Regelquerprofils
7	$z_T$	Geländehöhe im Trassenpunkt
8	$\frac{1}{z_T} = \frac{1}{\frac{dz}{dt} \Big _{t=t_T}}$	Querneigung im Trassenpunkt
9	nrk	Kartenummer

### Bemerkungen:

1. Die Koordinaten  $r_T$ ,  $h_T$  werden durch Spline-Interpolation zwischen den Trassenpunkten der benachbarten Regelquerprofile bestimmt.
2. Das Sonderquerprofil muß mit TROP10 aufgenommen worden sein.
3. Die Geländehöhe im Trassenpunkt wird durch Spline-Interpolation im Sonderquerprofil bestimmt.



## 2.9. FILE31

FILE31 enthält die geometrischen Grundrisse permanent gespeicherter Varianten. Es sind 2 Arten von Sätzen vorhanden:

- 1) Kopfsatz
- 2) maximal  $0,5 \cdot 1s31$  Varianten ;  $1s31$  = Satzlänge von FILE31

### 2.9.1 Kopfsatz

Nr.	Name	Bedeutung
1,i	namg	Variantenname (max. 6 alphanumerische Zeichen)
2,i	neg	Anzahl geometrischer Grundribelemente der zugehörigen Variante

$i = 1, 0,5 \cdot 1s31$

### 2.9.2 Sätze mit geometrischen Grundrissen

Für jede Variante ist 1 Satz mit den Daten von neg geometrischen Grundribelementen entsprechend 2.4. gespeichert.

## 2.10. FILE32

FILE32 enthält die geometrischen Aufrisse permanent gespeicherter Varianten. Es sind 2 Arten von Sätzen vorhanden:

- 1) Kopfsatz
- 2) maximal  $0,5 \cdot 1s32$  Varianten ;  $1s32 = \text{Satzlänge von FILE32}$

### 2.10.1 Kopfsatz

Nr.	Name	Bedeutung
1,i	nama	Variantenname (max. 6 alphanumerische Zeichen)
2,i	nea	Anzahl geometrischer Aufribelemente der zugehörigen Variante

$i = 1, 0,5 \cdot 1s32$

### 2.10.2 Sätze mit geometrischen Aufrissen

Für jede Variante ist 1 Satz mit den Daten von nea geometrischen Aufribelementen entsprechend 2.6. gespeichert.

### 3. Programmsystem TROP10

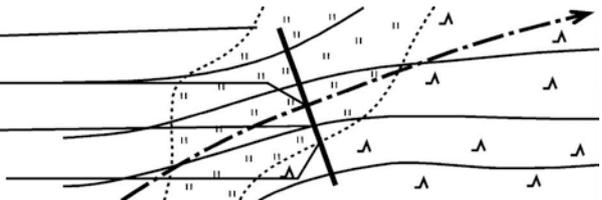
#### 3.1. Allgemeine Erläuterungen

##### 3.1.1. Programmfunktion

###### 3.1.1.1. Grafische Eingabe von Querprofilen

Mit dem Programm TROP10 werden am Digitalisiergerät von einer Landkarte Querprofile aufgenommen, die annähernd senkrecht zum Verlauf einer Trasse liegen. Es werden folgende Punkte erfaßt:

- Linker und rechter Querprofilendpunkt,
- Trassenpunkt,
- Höhenpunkte auf dem Querprofil,
- Nutzungsartpunkte auf dem Querprofil.



Höhenpunkte sind in der Regel die Schnittpunkte des Querprofils mit den Höhenlinien der Karte. In diesen Punkten wird die Geländehöhe aufgenommen. In den Nutzungsartpunkten ändert sich die Nutzung des Geländes (z.B. Wald Ackerfläche) oder es liegt eine Punktnutzung (z.B. Verkehrsweg, Stromleitung) vor. An diesen Punkten wird mit einer Kennziffer die neue Nutzungsart gespeichert.

Es werden zwei Arten von Querprofilen unterschieden:

###### a) Regelquerprofile

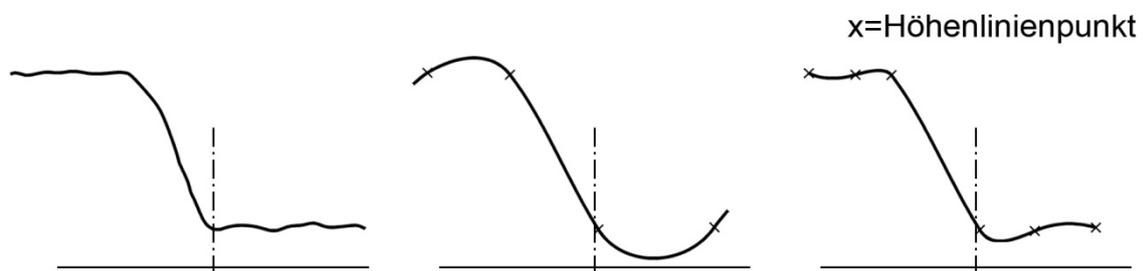
Diese Querprofile werden für die weitere Verarbeitung in Abschnitten zusammengefaßt (s. TROP20). Der Abstand dieser Regelquerprofile voneinander ist annähernd konstant.

###### b) Sonderquerprofile

Diese Querprofile stellen z.B. kreuzende Verkehrswege oder Flußläufe dar, die die Trasse nicht unbedingt annähernd senkrecht kreuzen und beliebig zwischen Regelquerprofilen liegen können. Sie werden im Programm TROP20 nicht in die Abschnittsdefinition einbezogen und können nur einzeln, mit Darstellung der neuen Trassenlage, graphisch ausgegeben werden.

Jedes Querprofil erhält zur Identifikation eine Querprofilnummer. Die Wahl der Nummer ist beliebig, zweckmäßig ist es jedoch, die Regelquerprofile mit äquidistanten Nummern zu versehen und den Sonderquerprofilen Zwischennummern zuzuordnen. Die Regelquerprofile werden in Zehnerschritten numeriert, wenn man die Querprofilnummern mit "0" angibt.

Nach der Aufnahme einer Reihe von Höhen- und Nutzungsartpunkten kann das Querprofil graphisch dargestellt werden. Falls die Darstellung vom realen Gelände unzulässig stark abweicht, können anschließend weitere Höhenpunkte aufgenommen werden. Diese ergänzende Aufnahme kann beliebig oft wiederholt werden. Abweichungen vom realen Gelände können insbesondere im Bereich von Geländeabbruchkanten auftreten, wenn dort der Abstand der Höhenpunkte nicht genügend klein gewählt wurde.



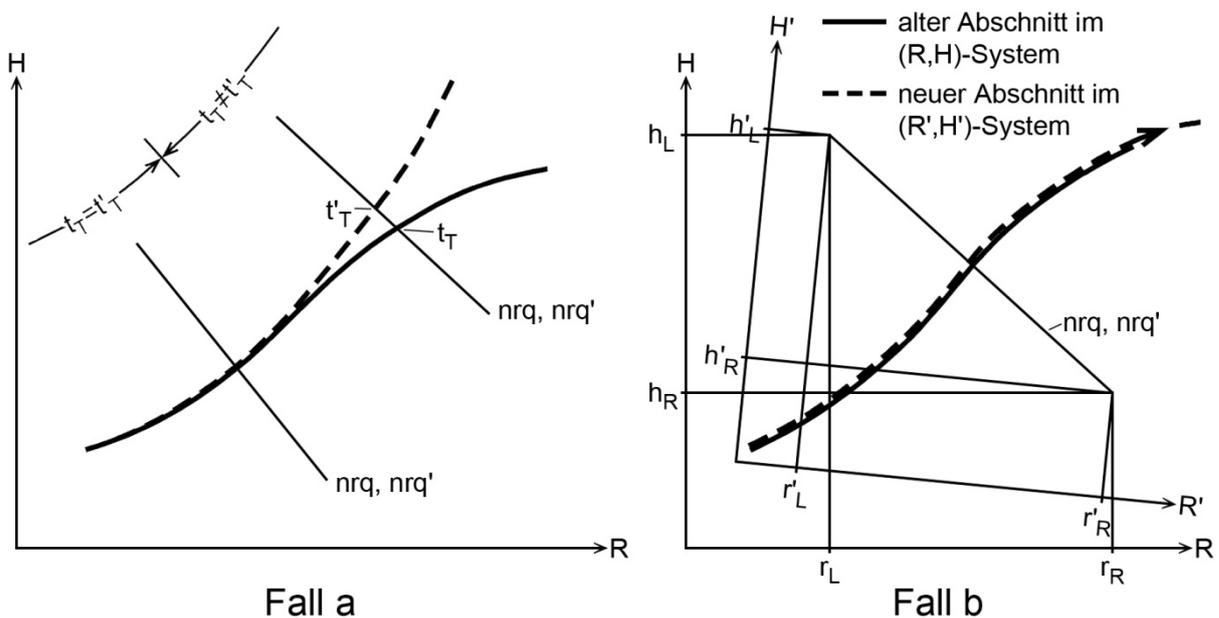
Die Folge, in der die Querprofile aufgenommen werden, ist beliebig. Die Querprofildaten werden in der Reihenfolge der Aufnahme für die weitere Verarbeitung in FILE20 gespeichert. Fehlerhaft eingegebene Querprofile können nachträglich erneut aufgenommen werden, die alten Querprofildaten werden dann überschrieben.

### 3.1.1.2. Numerische Eingabe (Gleichsetzen) von Querprofilen

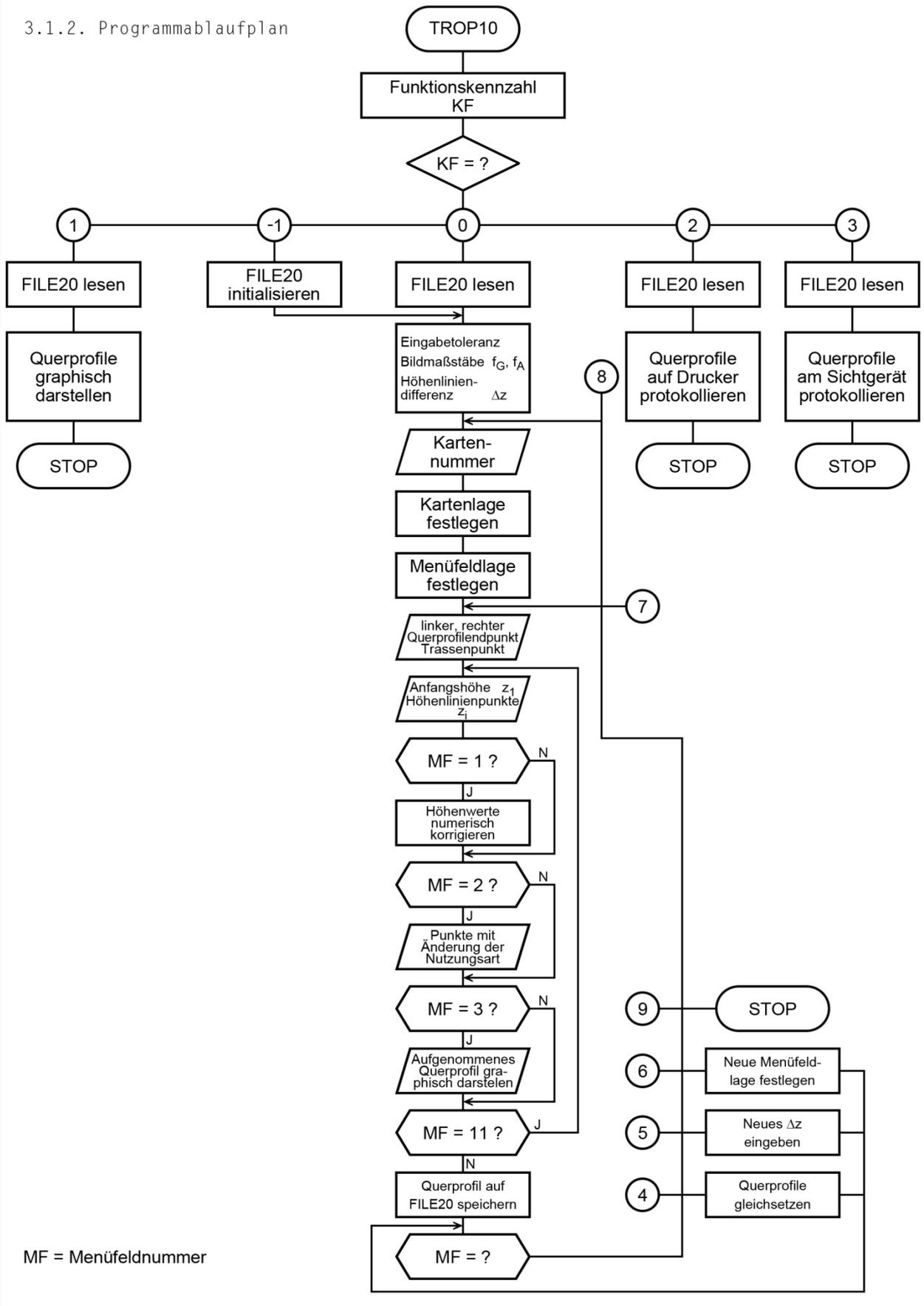
Querprofile werden gleichgesetzt, wenn ein bereits aufgenommenes "altes" Querprofil nrq mit neuer Querprofilnummer nrq' nochmals auf FILE20 abgespeichert wird. Dies kann in folgenden zwei Fällen erforderlich sein:

a) im Verzweigungsbereich der Trasse:  
 Hier sind zwei Abschnitte (s. TROP20) vorhanden, die sich teilweise überdecken, so daß topographisch identische Querprofile mit verschiedenen Querprofilnummern und evtl. unterschiedlicher Trassenlage vorhanden sind. Nachdem Querprofil nrq aufgenommen worden ist, kann Querprofil nrq' unter Verweis auf nrq auf FILE20 abgespeichert werden; evtl. ist am Digitalisiergerät die neue Trassenlage einzugeben.

b) im Übergangsbereich von Landeskoordinatensystemen:  
 In diesen Bereichen überlappen sich zwei Abschnitte. Die Querprofile des "alten" Abschnitts sind im "alten" Koordinatensystem aufgenommen. Die Querprofile des "neuen" Abschnitts sind im Überlappungsbereich topographisch mit denen des "alten" Abschnitts identisch, Endpunkte und Trassenpunkt haben jedoch andere Landeskoordinaten. Um über die Transformationsbeziehungen (3.3.1) diese Koordinaten berechnen zu können, sind die Querprofilendpunkte am Digitalisiergerät neu einzugeben. Dafür muß die Karte im neuen Koordinatensystem definiert sein.



3.1.2. Programmablaufplan



### 3.1.3. Koordinatensysteme

Es werden folgende Koordinatensysteme verwendet:

1) Gerätekoordinaten (X,Y) [°]

Dies sind die Gerätekoordinaten des Digitalisiergeräts. Der Koordinatenursprung liegt in der linken unteren Ecke der Digitalisierfläche.

2) Landeskoordinaten (R,H,Z) [m]

R,H sind die Koordinaten, in denen Punkte von der Landkarte aufgenommen werden, Z ist die Geländehöhe.

Hat eine Strecke im Gerätekoordinatensystem die Länge  $l_G$  [°] und im Landeskoordinatensystem die Länge  $l_K$  [m] und ist  $\delta$  [cm] der Abstand zweier Meßdrähte des Digitalisiertisches, so ergibt sich

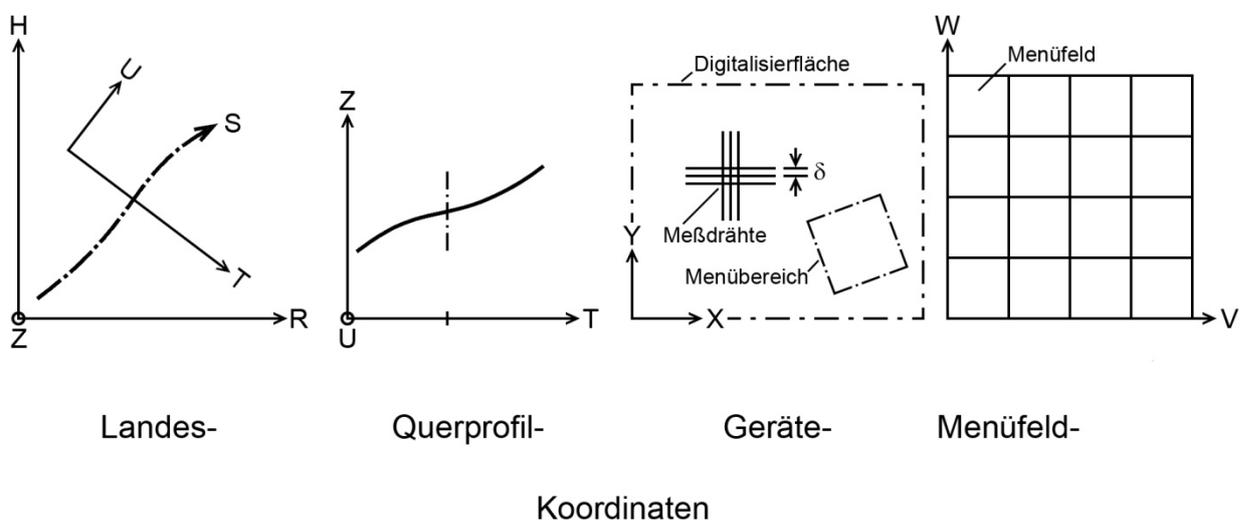
der Kartenmaßstab in der Form  $1 \text{ cm} = f_L \text{ m}$  zu  $f_L = \frac{l_K}{\delta \cdot l_G}$

3) Querprofilkoordinaten (T,U,Z) [m]

Jedem Querprofil ist ein Querprofil-Koordinatensystem zugeordnet. Die T-Achse ist vom linken zum rechten Querprofilendpunkt gerichtet, die U-Achse zeigt in Trassenrichtung.

4) Menüfeldkoordinaten (V,W) [°]

Dies sind die Koordinaten, in denen Menüfeldpunkte aufgenommen werden.



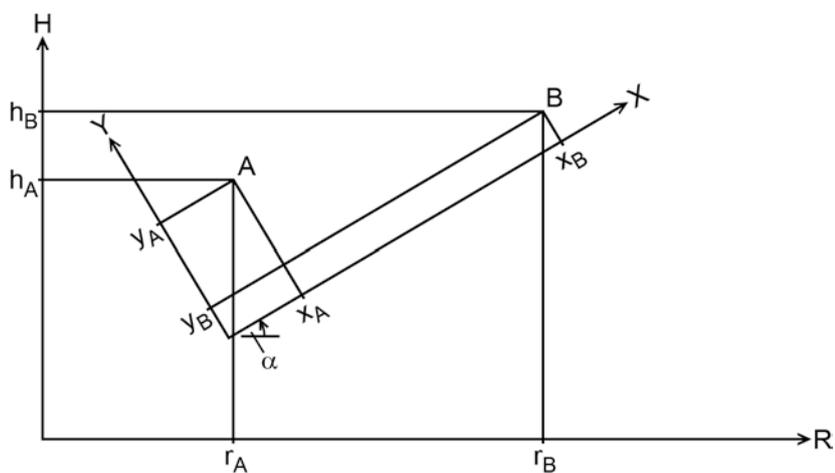
### 3.2. Datenstruktur

#### 3.2.1. COMMON-Blöcke

##### 3.2.1.1. COMMON DIGC1

COMMON DIGC1 enthält die Parameter für die Koordinatentransformation von den Gerätekoordinaten des Digitalisiergeräts in Landeskoordinaten.

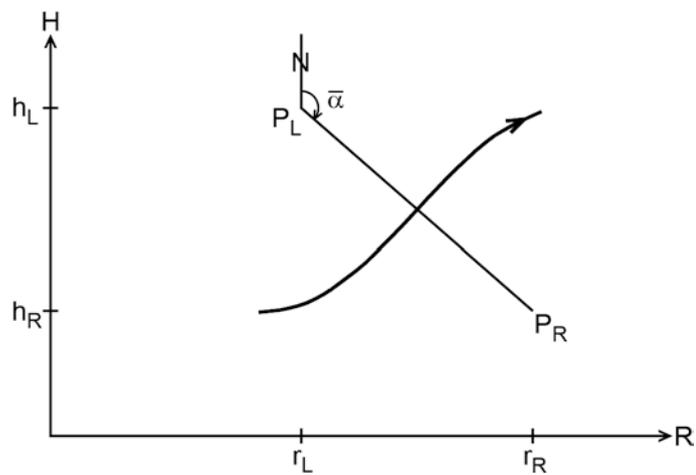
Nr.	Name	Bedeutung
1	$x_A$	} Punkt A in Gerätekoordinaten
2	$y_A$	
3	$x_B$	} Punkt B in Gerätekoordinaten
4	$y_B$	
5	$r_A$	} Punkt A in Landeskoordinaten
6	$h_A$	
7	$r_B$	} Punkt B in Landeskoordinaten
8	$h_B$	
9	$\lambda$	Verhältnis $\frac{\overline{AB} \text{ in Gerätekoordinaten}}{\overline{AB} \text{ in Landeskoordinaten}}$
10	$\sin \alpha$	} $\alpha =$ Drehwinkel des Gerätekoordinatensystems bzw. des Landeskoordinatensystems
11	$\cos \alpha$	
12	$\varepsilon$	Toleranz für Punkteingabe am Digitalisiergerät



### 3.2.1.2. COMMON DIGC2

COMMON DIGC2 enthält die Lage des aktuell bearbeiteten Querprofils.

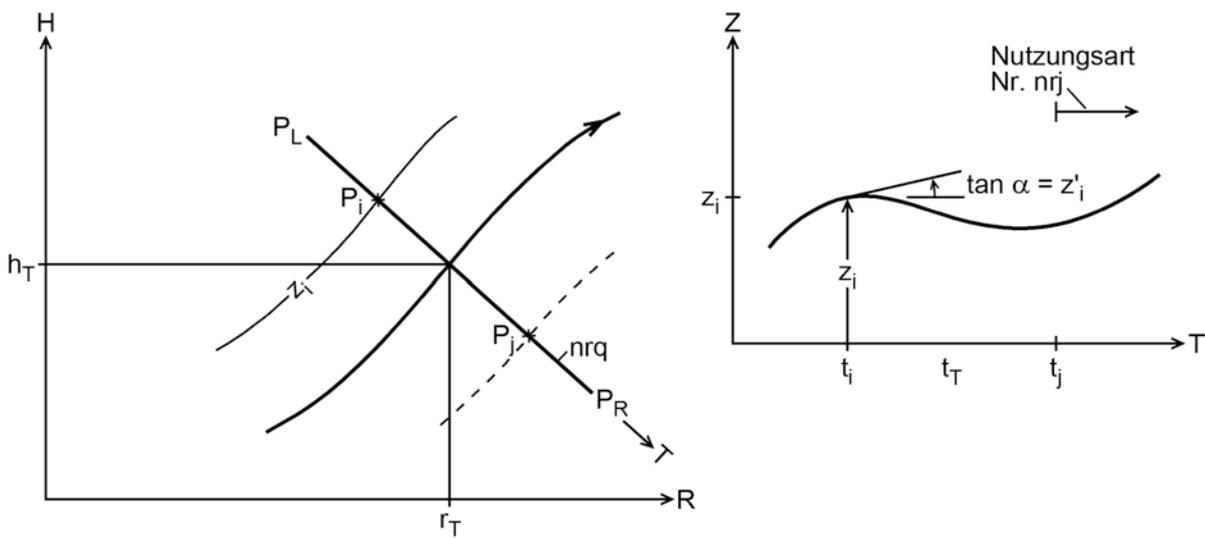
Nr.	Name	Bedeutung	
1	$r_L$	} linker Querprofilendpunkt	
2	$h_L$		} in Landeskoordinaten
3	$r_R$	} rechter Querprofilendpunkt	
4	$h_R$		
5	$\sin \bar{\alpha}$	} $\bar{\alpha}$ = Richtungswinkel des Querprofils zur Nordrichtung (H-Richtung)	
6	$\cos \bar{\alpha}$		



### 3.2.1.3. COMMON DIGC3

COMMON DIGC3 enthält die aktuellen Querprofildaten.

Nr.	Name	Bedeutung
1	nrq	Querprofilnummer
2	$r_T$	} Koordinaten des Trassenpunkts
3	$h_T$	
4-23		Variable Nr ix-(ixhlp-1) in 2.1.3
24-473	$t_i, z_i, \dot{z}_i, i=1,150$	Koordinaten von maximal 30 Nutzungsartpunkten



### 3.2.1.4. COMMON DIGC4

COMM DIGC4 enthält den Kopfsatz der Querprofildaten entsprechend 2.1.1.

### 3.2.2. Felder

Da im Programmsystem TROP10 die Datenübertragung zwischen den Unterprogrammen hauptsächlich über COMMON-Blöcke erfolgt, die die Daten des aktuell bearbeiteten Querprofils enthalten, werden nur wenige zusätzliche Felder benötigt.

#### 3.2.2.1. Feldgrößenparameter

Nr.	Name	Bedeutung
1	1s20	Satzlänge FILE20
2	mqp	Anzahl Parameter je Querprofil
3	nqpmax	Maximale Anzahl Querprofile je Satz Querprofilparameter

#### 3.2.2.2. Felder

Nr.	Name	Bedeutung
1	QPAR (mqp,nqpmax)	Aktuelle Querprofilparameter
2	QPARA (mqp,nqpmax)	Alte Querprofilparameter bei Gleichsetzen von Querprofilen
3	QDAT (1s20)	Aktuelle Querprofildaten
4	QDATA (1s20)	Alte Querprofildaten beim Gleichsetzen von Querprofilen

### 3.3. Algorithmen

#### 3.3.1. Transformation von Geräte- in Landeskoordinaten

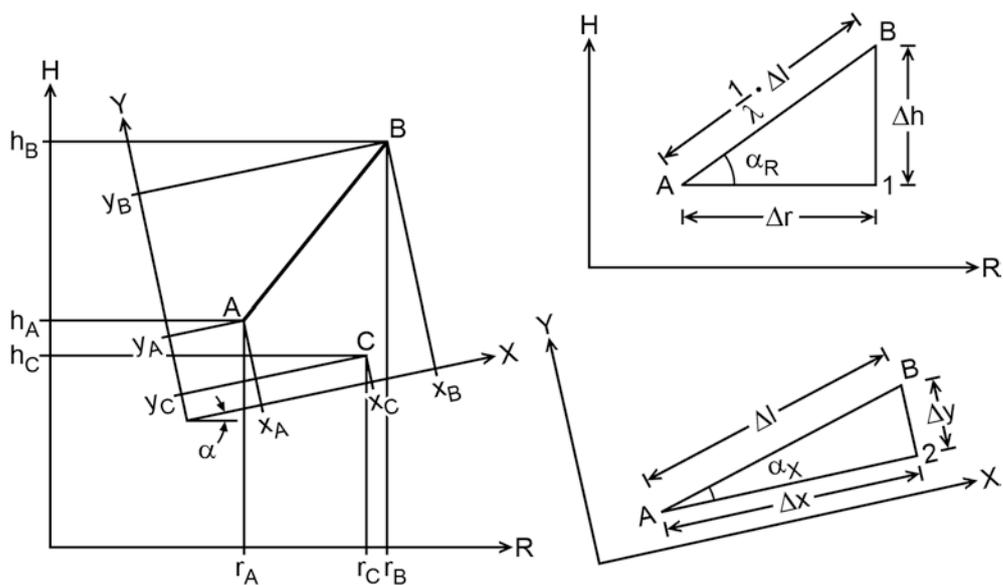
Am Digitalisiergerät werden mit dem Fadenkreuz markierte Punkte in Gerätekoordinaten aufgenommen. Die Gerätekoordinaten werden mittels Transformationsgleichungen, die eine ebene Translation, Rotation und Maßstabsverzerrung beschreiben, in Landeskoordinaten umgeformt. Zur Herleitung dieser Transformationsbeziehungen werden 3 Punkte  $A(r_A, h_A)$ ,  $B(r_B, h_B)$ ,  $C(r_C, h_C)$  numerisch in Landeskoordinaten eingegeben. Dieselben Punkte werden von der am Digitalisiergerät befestigten Karte graphisch in Gerätekoordinaten  $A(x_A, y_A)$ ,  $B(x_B, y_B)$ ,  $C(x_C, y_C)$  aufgenommen. Da zwei Punkte A, B zur Herleitung der Transformationsbeziehungen ausreichen, können die Landeskoordinaten des Punktes C ( $\tilde{r}_C, \tilde{h}_C$ ) aus den Gerätekoordinaten berechnet werden:

$$\tilde{r}_C = r_A + \frac{1}{\lambda} \cdot [\cos \alpha \cdot (x_C - x_A) - \sin \alpha \cdot (y_C - y_A)]$$

$$\tilde{h}_C = h_A + \frac{1}{\lambda} \cdot [\sin \alpha \cdot (x_C - x_A) + \cos \alpha \cdot (y_C - y_A)]$$

$$\lambda = \frac{\Delta x^2 + \Delta y^2}{\Delta r^2 + \Delta h^2} \quad ; \quad \Delta x = x_B - x_A \quad , \quad \Delta y = y_B - y_A$$

$$\Delta r = r_B - r_A \quad , \quad \Delta h = h_B - h_A$$



Aus den beiden rechtwinkligen Dreiecken A1B und A2B erhält man

$$\cos \alpha = \cos(\alpha_R - \alpha_X) = \lambda \cdot \frac{\Delta r \cdot \Delta x + \Delta h \cdot \Delta y}{\Delta l^2}$$

$$\sin \alpha = \sin(\alpha_R - \alpha_X) = \lambda \cdot \frac{\Delta h \cdot \Delta x + \Delta r \cdot \Delta y}{\Delta l^2}$$

Die berechneten Koordinaten  $\tilde{r}_C, \tilde{h}_C$  werden mit den eingegebenen verglichen. Ist  $\Delta l = \sqrt{(r_C - \tilde{r}_C) \cdot (h_C - \tilde{h}_C)} > \epsilon$ , so ist die hier beschriebene Transformation mit numerisch und graphisch neu eingegebenen Punkten A, B, C zu wiederholen. Andernfalls werden die Transformationsparameter im COMMON DIGC1 abgespeichert und bleiben solange gültig, bis Menüfeld 8 -Neue Kartenlage- eingegeben wird.

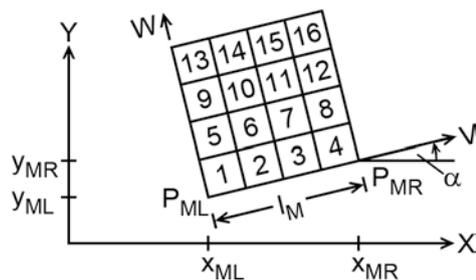
Die Landeskoordinaten eines Punktes P (r,h) berechnen sich damit aus den Gerätekoordinaten (x,y) zu

$$r = r_A + \frac{1}{\lambda} \cdot [\cos \alpha \cdot (x - x_A) - \sin \alpha \cdot (y - y_A)]$$

$$h = h_A + \frac{1}{\lambda} \cdot [\sin \alpha \cdot (x - x_A) + \cos \alpha \cdot (y - y_A)] .$$

### 3.3.2. Menüfeldtechnik

Während die Steuerung eines dialogfähigen Programms am Sichtgerät über die Eingabetastatur erfolgt, wird das Programm vom Digitalisiergerät aus über den Menübereich gesteuert. Als Menübereich bezeichnet man einen definierten Bereich der Digitalisierfläche, der in Menüfelder unterteilt ist. Die Ansteuerung eines Menüfeldes mit dem Digitizer-Fadenkreuz löst bestimmte Programmfunktionen aus. Hier wird ein quadratischer Menübereich mit quadratischen Menüfeldern verwendet. Er wird durch Ansteuerung der unteren Eckpunkte  $P_{ML}$  und  $P_{MR}$  und Angabe der Unterteilung  $m$  definiert.



$$m = 4$$

$$l_M = \sqrt{(x_{MR} - x_{ML})^2 + (y_{MR} - y_{ML})^2}$$

Die Menükoordinaten  $v, w$  eines Punktes  $P$  erhält man über die Transformationsbeziehungen der Translation und Rotation aus den Gerätekoordinaten  $x_M, y_M$  zu

$$v = \cos \alpha \cdot (x - x_{ML}) + \sin \alpha \cdot (y - y_{ML}) \quad ; \quad \cos \alpha = \frac{x_{MR} - x_{ML}}{l_M}$$

$$w = \sin \alpha \cdot (x - x_{ML}) + \cos \alpha \cdot (y - y_{ML}) \quad ; \quad \sin \alpha = \frac{y_{MR} - y_{ML}}{l_M}$$

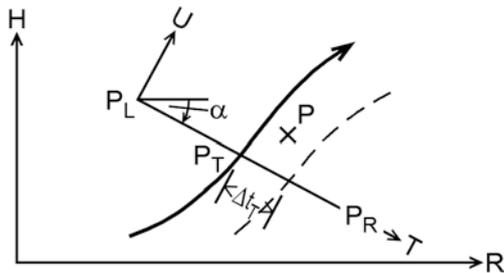
Dann ergibt sich die Menüfeldnummer  $mf$  mit dem obigen Nummerierungsschema zu

$$mf = m \cdot \left[ \frac{w}{\Delta l_M} \right] + \left[ \frac{v}{\Delta l_M} \right] + 1 \quad ; \quad \Delta l_M = \frac{l_M}{m}$$

Liegt  $P$  außerhalb des Menüfeldes, so wird  $mf = 0$  gesetzt.

[  $a$  ] = größte ganze Zahl kleiner als  $a$

### 3.3.3. Transformation von Landes- in Querprofilkoordinaten



Die Querprofilanlage wird durch Eingabe der Querprofilendpunkte  $P_L$  und  $P_R$  am Digitalisiergerät festgelegt. Die Landeskoordinaten der Endpunkte ergeben sich aus der Transformation (3.3.1) zu  $r_L$ ,  $h_L$ ,  $r_R$ ,  $h_R$ . Einen beliebigen Punkt  $P(r,h)$  im Querprofil-Koordinatensystem  $(t,u)$  erhält man dann zu

$$t = \cos\alpha \cdot (r - r_L) + \sin\alpha \cdot (h - h_L) \quad (3.3.3.1)$$

$$u = -\sin\alpha \cdot (r - r_L) + \cos\alpha \cdot (h - h_L)$$

$$\cos\alpha = \frac{r_R - r_L}{l_0} \quad ; \quad \sin\alpha = \frac{h_R - h_L}{l_0} \quad ; \quad l_0 = \sqrt{(r_R - r_L)^2 + (h_R - h_L)^2}$$

Der Punkt  $P$  liegt auf dem Querprofil, wenn  $|u| \leq \varepsilon$  ist. Einen beliebigen Punkt  $P(t,u)$  im Landeskoordinatensystem  $(r,h)$  erhält man zu

$$r = r_L + \cos\alpha \cdot t - \sin\alpha \cdot u \quad (3.3.3.2)$$

$$h = h_L + \sin\alpha \cdot t + \cos\alpha \cdot u$$

Die Transformation (3.3.3.1) wird bei der graphischen Eingabe von Querprofilpunkten benötigt, die Transformation (3.3.3.2) findet bei der numerischen Eingabe des Trassenpunktes im Programm TROP20 durch Angabe von  $\Delta t_T$  Anwendung.

### 3.3.4. Eingabe der Höhenlinienpunkte

Die Höhenlinienpunkte werden im (X,Y)-Gerätekoordinatensystem aufgenommen und über die Transformation (3.3.1) ins (R,H)-Landeskoordinatensystem sowie über 3.3.3.1 in Querprofilkoordinaten (T,U) überführt. Ist  $|u| > \varepsilon$ , so wird der Punkt vom Programm nicht als Querprofilpunkt anerkannt und muß erneut eingegeben werden. Die Geländehöhe wird nicht direkt eingegeben, sondern es wird die Höhendifferenz zum vorher aufgenommenen Höhenlinienpunkt als Vielfaches der Standard-Höhenliniendifferenz  $\Delta z$  über die Tastatur des Digitalisier-Fadenkreuzes eingegeben.

Dies ist insbesondere bei der Aufnahme von Punkten mit äquidistanter Höhendifferenz zweckmäßig, wie es bei Höhenlinien in Landkarten i.a. der Fall ist. Für den zuerst aufgenommenen Höhenlinienpunkt wird numerisch die Anfangshöhe  $z_1$  eingegeben. Damit ergeben sich die Höhen  $z_i$  der Höhenlinienpunkte  $P_i$  zu

$$z_i = z_{i-1} + k \cdot \Delta z \quad ; \quad i = 2, \text{nhlp}$$

$$k = f \text{ (Fadenkreuztaste)}$$

Im Programm ist folgende Belegung der Fadenkreuz-Tastatur vorgesehen:

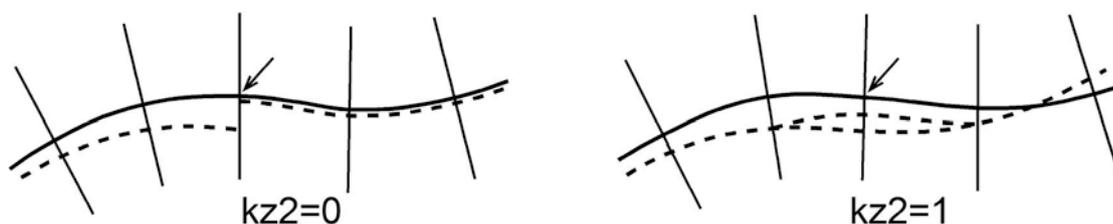
Taste	1	2	3	4	5	6	>6
k	1	2	4	-1	-2	-4	0

Die auf diese Weise aufgenommenen Geländehöhen können nach Beendigung der Aufnahme von Höhenlinienpunkten durch numerische Eingabe der Geländehöhe - Menüfeld 2 - korrigiert werden.



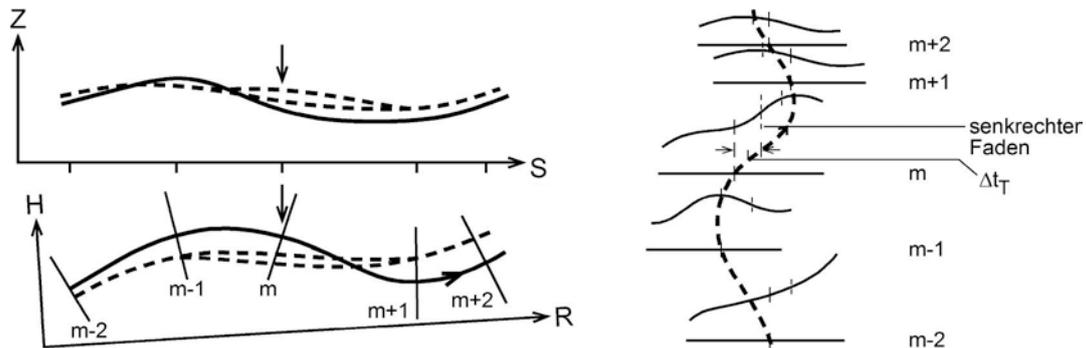
#### 4.1.1.2. Graphische Korrektur der Trassenlage

Ein Ausschnitt des Trassenverlaufs der zwei Abschnitte wird auf dem Bildschirm in Grund- und Aufriß dargestellt. Zwischen den Abschnitten wird ein stetiger Übergang durch Spline-Interpolation über 7 Punkte im Grundriß nach 6.3 und im Aufriß nach 6.2 hergestellt. Eine vorgegebene mittlere Station, die in der Mitte des Ausschnitts liegt, wird durch einen Pfeil markiert. Die digitalisierte Trasse wird mit durchgezogener, die mit TROP20 "geglättete" Trasse mit gestrichelter Linie dargestellt. Bevor mit TROP20 Trassenkorrekturen durchgeführt worden sind, ist die geglättete mit der digitalisierten Trasse identisch. In Abhängigkeit vom Wert einer Kennzahl  $kz2$  wird die geglättete Trasse nur bis zur Station vor dem mittleren Querprofil oder für den gesamten Trassenverlauf dargestellt. Die erste Version ( $kz2=0$ ) wird benötigt, wenn die Trasse schrittweise von Querprofil zu Querprofil verbessert wird und aktuell nur bis zur Station vor dem mittleren Querprofil definiert ist. Die zweite Version ( $kz2=1$ ) ist vorgesehen für den Fall, daß die Trasse bereits in einem größeren Bereich geglättet worden ist und nur noch in einzelnen Querprofilen geringfügig verschoben werden soll.



Die Trassenlage kann in der mittleren Station graphisch korrigiert werden. Dazu werden 5 Querprofile übereinander dargestellt. Die beiden unteren Querprofile liegen vor der mittleren Station, die beiden oberen dahinter. Die Spline-Kurve, die die Trassenpunkte in den Querprofil-Koordinatenachsen  $T_j$  verbindet, stellt einen Trassenausschnitt im Querprofil-Längenmaßstab dar. Mittels einer Kennzahl  $kz1$  kann der Abstand der dargestellten Querprofile verändert werden; das entspricht einer Maßstabsverzerrung in Trassierungsrichtung. Ohne Veränderung des Querprofilabstands können sich u.U. die Querprofile überschneiden, oder es können nicht alle Querprofile dargestellt

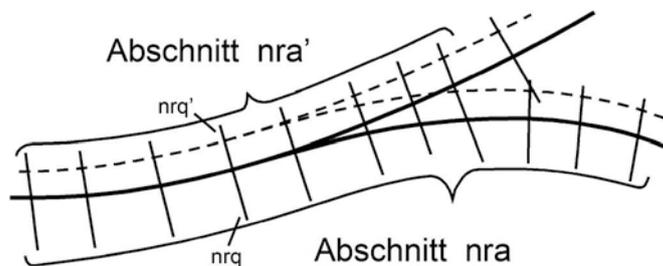
werden. In den Querprofilen wird die Lage der digitalisierten Trasse durchgezogen, die der geglätteten Trasse gestrichelt dargestellt.



Nachdem die oben beschriebene Graphik auf dem Bildschirm erzeugt worden ist, erscheint ein Fadenkreuz. Mit einer Rändelschraube wird der senkrechte Faden im mittleren Querprofil in die gewünschte neue Trassenlage verschoben, die dann durch Tastendruck ans Programm übergeben wird. Anschließend wird diese neue Trassenlage im Grund- und Aufriß sowie in den Querprofilen gestrichelt eingetragen.

#### 4.1.1.3. Numerische Korrektur der Trassenlage im Verzweigungsbereich

Im Bereich einer Verzweigung seien zwei topographisch identische Querprofile  $nrq$  und  $nrq'$ , die den Abschnitten  $nra$  und  $nra'$  angehören, vorhanden. Ist die Trasse im Querprofil  $nrq$  verschoben worden, so kann diese neue Trassenlage für das Querprofil  $nrq'$  unter Bezug auf die Abschnittsnummer  $nra$  und die Querprofilnummer  $nrq$  übernommen werden.

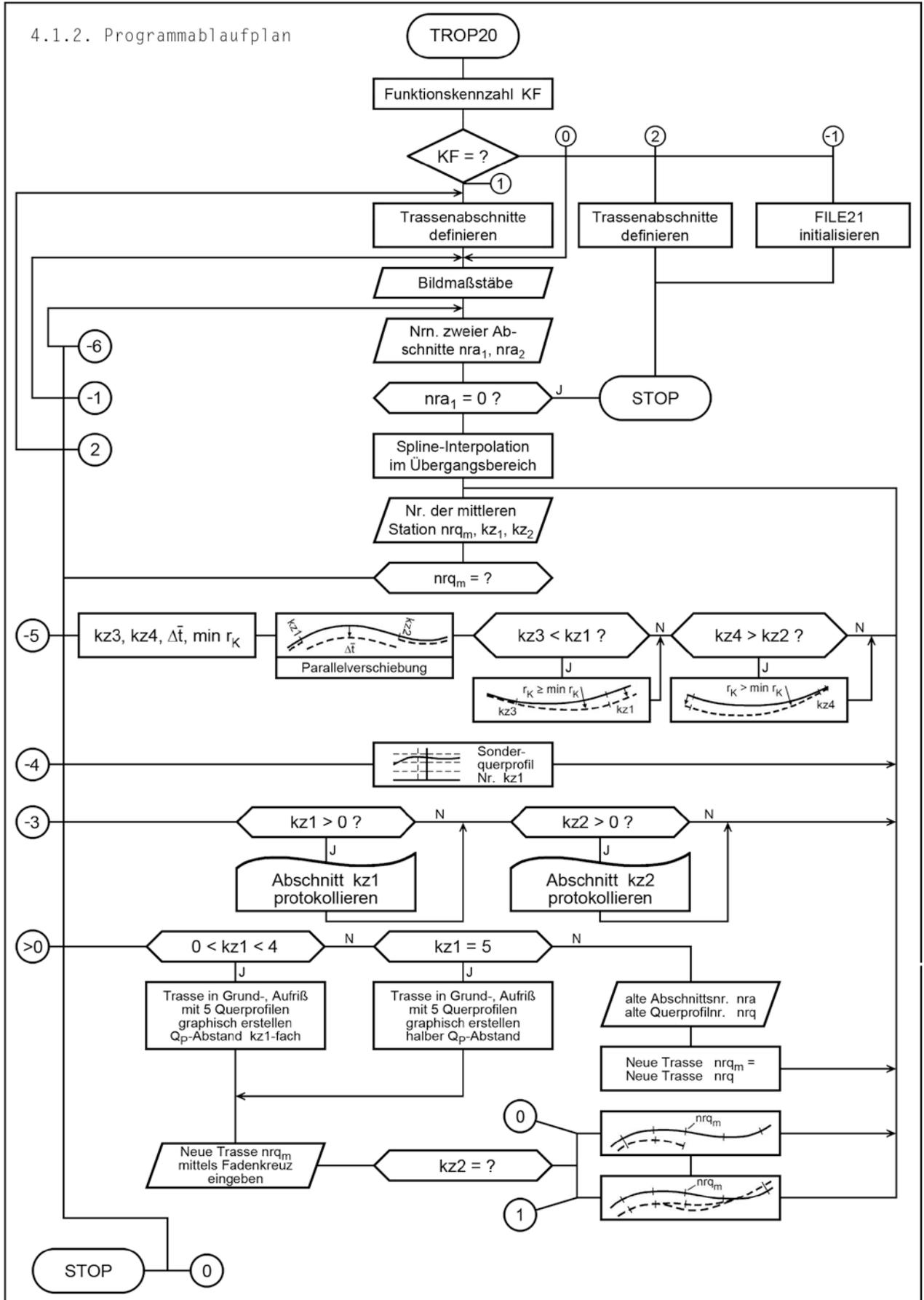


Trassenverschiebung im Verzweigungsbereich

#### 4.1.1.4. Numerische Korrektur der Trassenlage durch Parallelverschiebung

Die Trasse kann auch in einem anzugebenden Bereich senkrecht zur alten Trasse um  $\Delta \bar{x}$  verschoben und an einem Ende des Bereichs oder an beiden mit kubischen Parabeln an die digitalisierte Trasse angeschlossen werden. Die Längen der Übergangsbereiche werden unter Einhaltung von Maximalwerten so bestimmt, daß vorgegebene Mindestkrümmungsradien nicht überschritten werden. Reicht die Maximallänge für die Einhaltung des Mindestkrümmungsradius nicht aus, so wird eine Warnung ausgegeben. Die Parallelverschiebung mit vorderem Übergangsbereich entspricht der graphischen Trassenkorrektur mit  $kz2=0$ .

4.1.2. Programmablaufplan



## 4.2. Datenstruktur

### 4.2.1. COMMON - Blöcke

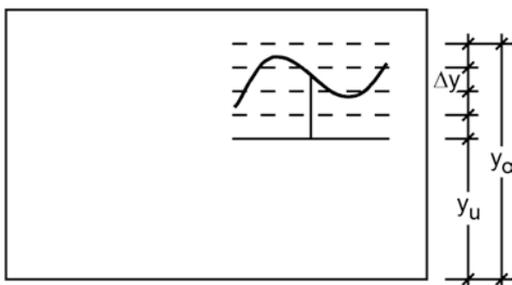
#### 4.2.1.1. COMMON GRC1

COMMON GRC1 enthält den Kopfsatz der Trassenabschnittsdaten entsprechend 2.2.1.

#### 4.2.1.2. COMMON GRC2

Nr.	Name	Bedeutung
1	$y_u$	Abstand der untersten Höhenlinie vom unteren Bildrand [cm]
2	$y_o$	Abstand der obersten Höhenlinie vom unteren Bildrand [cm]
3	$\Delta y$	Höhenlinienabstand in Querprofilardarstellung [cm]

Zusätzlich werden noch die COMMON-Blöcke DIGC2, DIGC3, DIGC4 aus TROP10 verwendet.



#### 4.2.2. Felder

Der Arbeitsspeicher wird für zwei Programmfunktionen jeweils neu aufgebaut:

- 1) Erzeugung von Trassenabschnitten
- 2) Trassenglättung

##### 4.2.2.1. Feldgrößenparameter

Nr.	Name	Bedeutung
1	mpa	Anzahl Parameter je Stationspunkt
2	nqamax	Maximale Anzahl Stationen je Abschnitt

Die übrigen Feldgrößenparameter sind unter 3.2.2.1 erläutert.

##### 4.2.2.2. Felder für Trassenglättung

Nr.	Name	Bedeutung
1	ADAT (2,mpa,nqamax)	Daten zweier Trassenabschnitte (s. 2.2.2)
2	ADATA (mpa,nqamax)	Daten des "alten" Trassenabschnitts bei Trassenverschiebungen im Verzweigungsbereich (s. 2.2.2)
3	QPAR (5,1s20)	Sätze mit den Daten der 5 darzustellenden Querprofile (s. 2.1.3)

#### 4.2.2.3. Felder für Erzeugung von Trassenabschnitten

Nr.	Name	Bedeutung
1	QPAR (nqp,nqpmx)	Querprofilparameter (s. 2.1.2)
2	QDAT (1s20)	Querprofildaten (s. 2.1.3)
3	NRQ (nqamax)	Querprofilnummern
6	ADAT1 (mpa,nqamax)	Daten des Trassenabschnitts 1 (s. 2.2.2)
7	ADAT2 (mpa,nqamax)	Daten des Trassenabschnitts 2 (s. 2.2.2)
8	P (3,nqamax)	Hilfsfeld für Spline-Interpolation in Grund- und Aufriß
9	PQ (3,150)	Hilfsfeld für Spline-Interpolation in den Querprofilen

### 4.3. Algorithmen

#### 4.3.1. Berechnung des Krümmungsradius

Der Radius des Krümmungskreises wird folgendermaßen definiert:

##### a) Definition durch 3 Trassenpunkte

$$\underline{r}_1 = \{r_1, h_1\}, \quad \underline{r}_2 = \{r_2, h_2\}, \quad \underline{r}_3 = \{r_3, h_3\}$$

$$\underline{r}_{12} = \frac{1}{2} (\underline{r}_1 + \underline{r}_2), \quad \underline{r}_{23} = \frac{1}{2} (\underline{r}_2 + \underline{r}_3)$$

$$\underline{s}_{12} = \underline{r}_2 - \underline{r}_1, \quad \underline{s}_{13} = \underline{r}_3 - \underline{r}_1, \quad \underline{s}_{23} = \underline{r}_3 - \underline{r}_2$$

$$\underline{s}'_{12} \doteq \underline{s}_{12}^\top \cdot \underline{s}'_{12} = 0$$

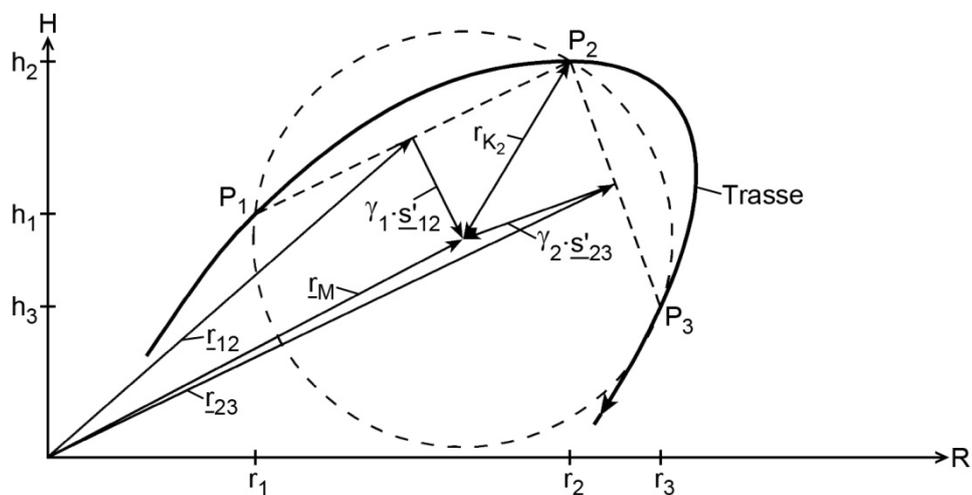
$$\underline{s}'_{23} \doteq \underline{s}_{23}^\top \cdot \underline{s}'_{23} = 0$$

$$\underline{r}_M = \underline{r}_{12} + \gamma_1 \cdot \underline{s}'_{12} = \underline{r}_{23} + \gamma_2 \cdot \underline{s}'_{23}$$

$$\gamma_2 = \frac{(\underline{r}_{12} - \underline{r}_{23})^\top \cdot \underline{s}'_{12}}{\underline{s}_{12}^\top \cdot \underline{s}'_{23}}$$

$$|r_{K_2}| = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \underline{s}_{23}^\top \cdot \underline{s}_{23} + \gamma_2^2 \cdot \underline{s}'_{23}^\top \cdot \underline{s}'_{23}}$$

$r_{K_2}$  hat das Vorzeichen der z-Komponente von  $\underline{s}_{23} \times \underline{s}_{12}$ . Liegen die drei Punkte näherungsweise auf einer Geraden, d.h.  $\underline{s}_{12}^\top \cdot \underline{s}'_{23} \approx 0$ , so wird  $r_{K_2} = 0$  gesetzt.



b) Definition durch 2 Trassenpunkte und die Steigung links

$$\underline{e}_{T_1} = \{\cos \alpha_1, \sin \alpha_1\}$$

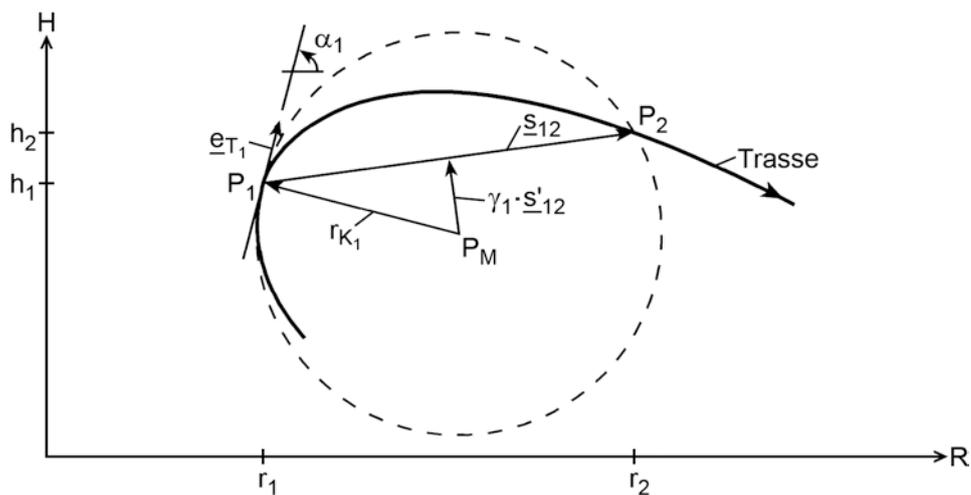
$$\underline{r}_{K_1} = -\frac{1}{2} \cdot \underline{s}_{12} + \gamma_1 \cdot \underline{s}'_{12}$$

$$\underline{r}_{K_1}^T \cdot \underline{e}_{T_1} = 0$$

$$\gamma_1 = \frac{\underline{s}_{12}^T \cdot \underline{e}_{T_1}}{2 \cdot \underline{s}'_{12} \cdot \underline{e}_{T_1}}$$

$$|r_{K_1}| = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \underline{s}_{12}^T \cdot \underline{s}_{12} + \gamma_1^2 \cdot \underline{s}'_{12} \cdot \underline{s}'_{12}}$$

$r_{K_1}$  hat das Vorzeichen der z-Komponente von  $\underline{s}_{12} \times \underline{e}_{T_1}$ .



c) Definition durch 2 Trassenpunkte und die Steigung rechts

$$\underline{e}_{T_2} = \{\cos \alpha_2, \sin \alpha_2\}$$

$$\underline{r}_{K_2} = -\frac{1}{2} \cdot \underline{s}_{12} + \gamma_1 \cdot \underline{s}'_{12}$$

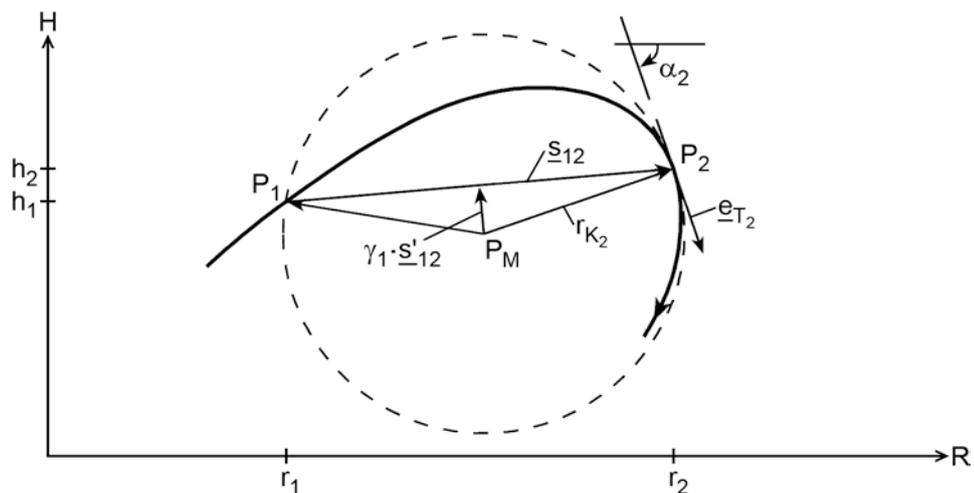
$$\underline{r}_{K_2}^T \cdot \underline{e}_{T_2} = 0$$

$$\gamma_1 = \frac{\underline{s}_{12}^T \cdot \underline{e}_{T_2}}{2 \cdot \underline{s}'_{12}^T \cdot \underline{e}_{T_2}}$$

$$|\underline{r}_{K_2}| = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \underline{s}_{12}^T \cdot \underline{s}_{12} + \gamma_1^2 \cdot \underline{s}'_{12}^T \cdot \underline{s}'_{12}}$$

$r_{K_2}$  hat das Vorzeichen der z-Komponente von  $\underline{e}_{T_2} \times \underline{s}_{12}$ .

Definition a wird für die digitalisierte Trasse mit Ausnahme der ersten und letzten Station benutzt, Definition b für die erste und Definition c für die letzte Station. Für die geglättete Trasse im mittleren Stationspunkt findet Definition a für  $Kz_2 = 1$  und Definition c für  $Kz_2 = 0$  Anwendung.



### 4.3.2. Parallelverschiebung

Die Trasse wird entlang der Normalenrichtung  $\bar{T}$  um  $\Delta\bar{t}$  verschoben. Die Landeskoordinaten von  $\bar{P}_T$  erhält man mit der Koordinatentransformation

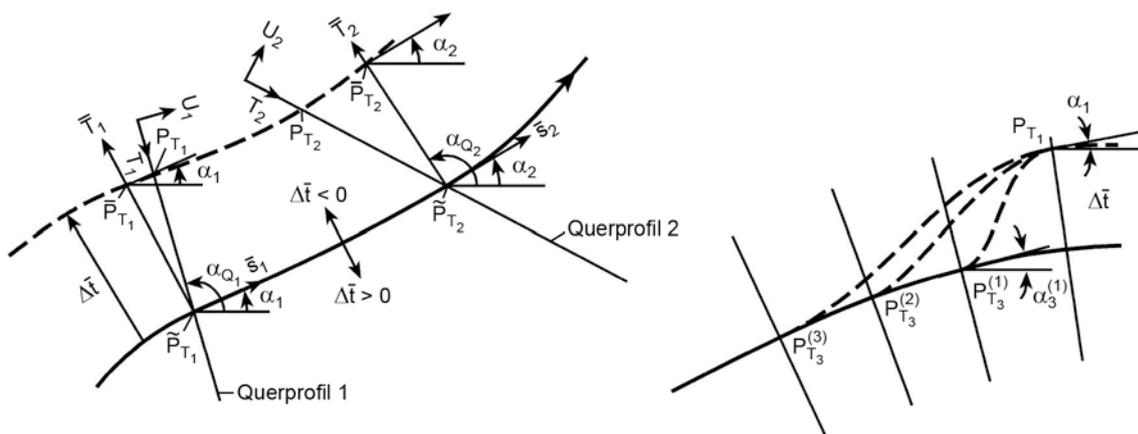
$$\bar{r}_T = r_T + \Delta\bar{t} \cdot \sin \alpha_1$$

$$\bar{h}_T = h_T - \Delta\bar{t} \cdot \cos \alpha_1$$

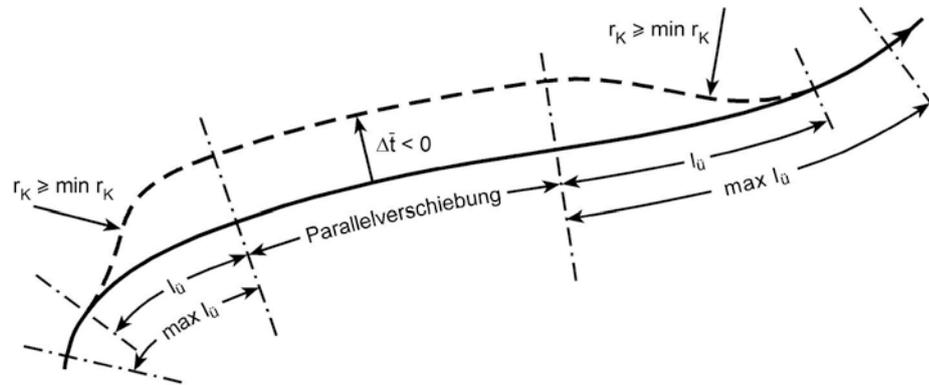
Durch die in den Punkten  $\bar{P}_{T1}$ ,  $\bar{P}_{T2}$  gegebenen Ordinaten  $\bar{h}_{T1}$ ,  $\bar{h}_{T2}$  und die Neigungswinkel  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  ist ein kubisches Polynom definiert, dessen Schnitte mit den Querprofilrichtungen  $T_1$ ,  $T_2$  die neuen Trassenpunkte  $P_{Ti}$  sind. Durch Spline-Interpolation im Querprofil nach 6.1 erhält man die neuen Geländehöhen  $z_{Ti}$  und die neuen Geländequerneigungen  $\dot{z}_{Ti}$ .

Im Übergangsbereich der Parallelverschiebung ist durch die Ordinaten der Randpunkte  $\tilde{P}_{T3}$ ,  $P_{T1}$  und durch die Neigungswinkel in diesen Punkten ein kubisches Polynom definiert, dessen Schnittpunkte mit den Querprofilen des Übergangsbereichs die neuen Trassenpunkte sind. Im Folgenden wird der vordere Übergangsbereich betrachtet:

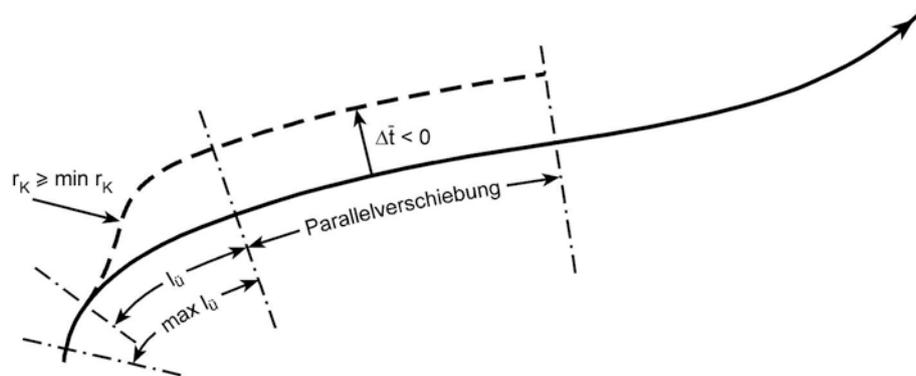
Im ersten Schritt wird ein kubisches Polynom durch die Randpunkte  $P_{T3}^{(1)}$ ,  $P_{T1}$  und die Randsteigungen  $\alpha_3^{(1)}$ ,  $\alpha_1$  definiert. Ist einer Krümmungsradien  $r_{K1}$ ,  $r_{K3}^{(1)}$  kleiner als  $\min r_K$ , so wird im nächsten Schritt das kubische Polynom durch die Randpunkte  $P_{T3}^{(2)}$ ,  $P_{T1}$  und die Randsteigungen  $\alpha_3^{(2)}$ ,  $\alpha_1$  definiert.  $P_{T3}^{(1)}$  wird interpoliert. Ist jetzt einer der neu berechneten Krümmungsradien  $r_{K1}$ ,  $r_{K3}^{(1)}$ ,  $r_{K3}^{(2)}$  kleiner als  $\min r_K$ , so wird im nächsten Schritt das kubische Polynom durch  $P_{T3}^{(3)}$ ,  $P_{T1}$  definiert, usw.



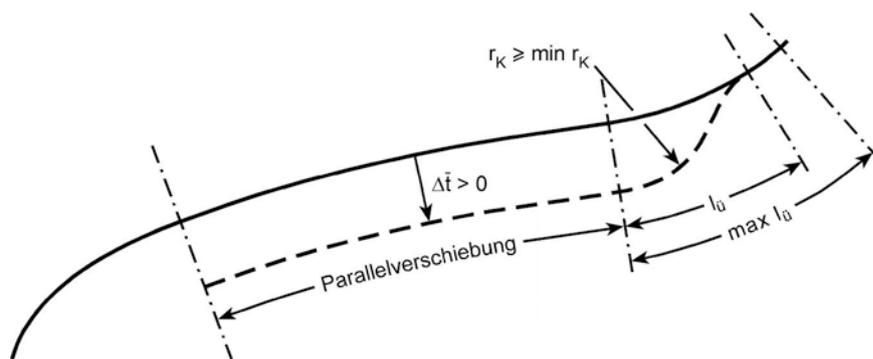
$l_{\ddot{u}}$  = vorhandene Länge des Übergangsbereichs  
 $\max l_{\ddot{u}}$  = maximale Länge des Übergangsbereichs



Parallelverschiebung mit beidseitigem Übergangsbereich



Parallelverschiebung mit vorderem Übergangsbereich



Parallelverschiebung mit hinterem Übergangsbereich

## 5. Programm TROP25

### 5.1. Allgemeine Erläuterungen

#### 5.1.1. Programmfunktionen

Das Programm TROP25 stellt die mit TROP20 geglättete Trasse oder eine im Grundriß oder im Grund- und Aufriß durch geometrische Elemente definierte Trasse graphisch dar. Die Trasse ist in Form von Varianten (s. 1.1.3) definiert. Auf einem Bild können eine Hauptvariante und maximal 5 Nebenvarianten mit verschiedenen Stift- und Linientypen gezeichnet werden. Die Hauptvariante bestimmt die Lage des im Bild dargestellten Trassenausschnitts. Die Varianten werden im Grund- und Aufriß dargestellt; der Bezug zwischen Grund- und Aufriß wird durch einen Orientierungspunkt hergestellt, dessen Grund- und Aufrißdarstellung genau übereinander liegen. Er wird durch einen Pfeil mit darübersetzter Stationsnummer markiert.

##### 5.1.1.1. Grundrißdarstellung

Die Grundrißdarstellung wird so gedreht, daß die erste und die mittlere Station des dargestellten Bereichs der Hauptvariante auf halber Höhe der Grundriß-Zeichenfläche liegen. Der Orientierungspunkt der Hauptvariante ist ihre mittlere Station; er liegt annähernd im Mittelpunkt der Grundriß-Zeichenfläche. Der Orientierungspunkt einer Nebenvariante ist diejenige Station, die im Orientierungspunkt der Hauptvariante in der gedrehten Grundrißdarstellung am nächsten liegt.

In der geglätteten Trasse aus TROP20 wird die erste Station in jedem Abschnitt markiert. Der geometrische Grundriß wird mit einer fortlaufenden Kilometrierung versehen, außerdem werden Anfang und Ende der Übergangsbögen mit Kilometrierung markiert. Die Radien der Kreisbögen werden eingetragen und es werden ggf. die Tangentschnittpunkte des geometrischen Aufrisses mit Angabe der Steigung markiert.

#### 5.1.1.2. Aufrißdarstellung

Der Aufriß wird über dem die Trassenpunkte verbindenden, abgewickelten Polygonzug dargestellt. Die mittlere Höhenkote des dargestellten Bereichs der Hauptvariante liegt ungefähr auf halber Höhe der Aufriß-Zeichenfläche. Hat die Hauptvariante einen geometrischen Aufriß, so wird über der Gradienten ein Steigungsband gezeichnet, in dem Ausrundungsradien, Höhen und Abstände der Tangentenschnittpunkte und Steigungen angegeben werden. Liegt ein geometrischer Grundriß vor, so werden die Anfangs- und Endpunkte der Übergangsbögen markiert und mit der Differenz zwischen Gelände- und Gradientenhöhe und der Kilometrierung beschriftet.

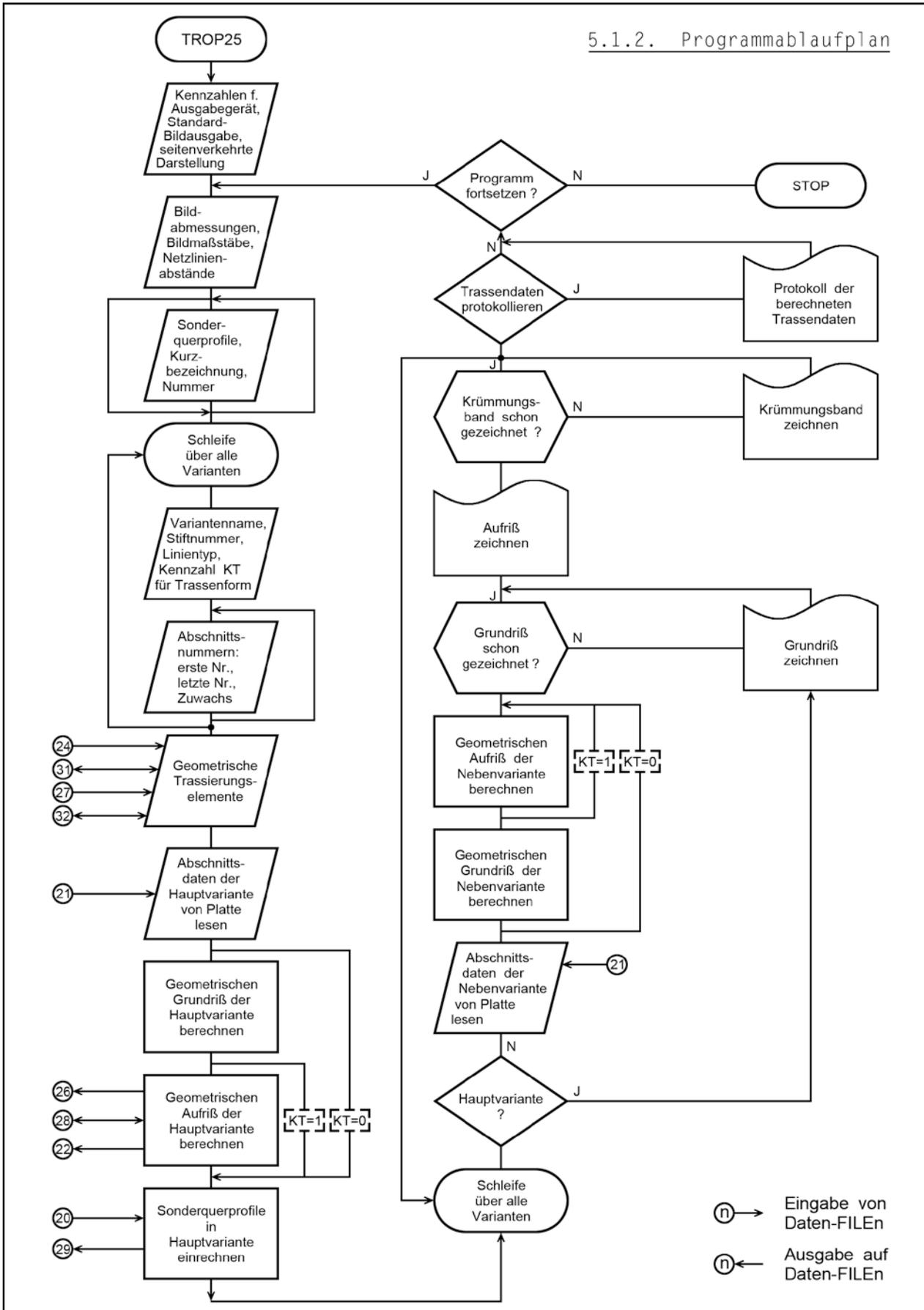
Falls die Hauptvariante eine geglättete Trasse aus TROP20 ist, wird unter der Aufrißdarstellung ein Maßstab in km-Teilung gezeichnet, dessen Ursprung im Orientierungspunkt liegt. Handelt es sich bei der Hauptvariante um eine geometrische Trasse, so wird die zugehörige fortlaufende Kilometrierung angegeben.

Darunter werden alle Stationen der Hauptvariante markiert; jede zehnte Station wird mit der Stationsnummer versehen.

Schließlich wird in einem Kreuzungsband die Lage von Sonderquerprofilen mit einer Kurzbezeichnung für die Art des Profils angegeben.

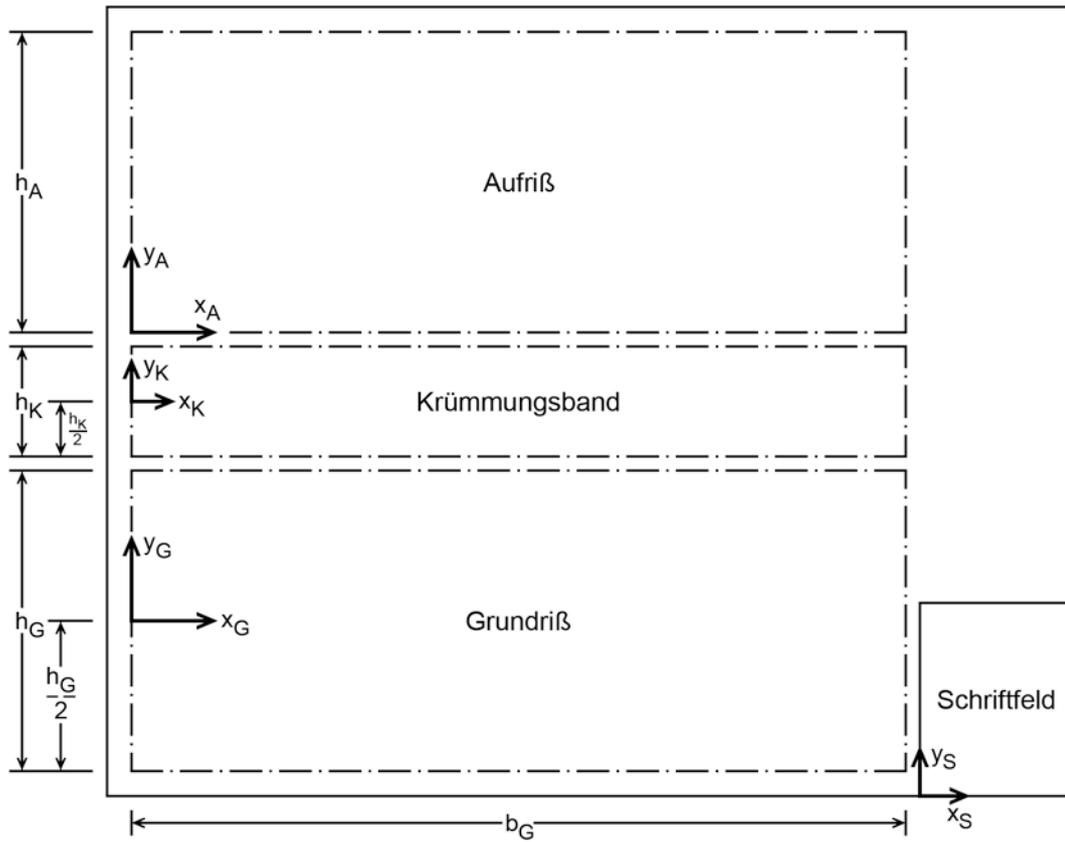
Unter dem Kreuzungsband wird - falls die Hauptvariante einen geometrischen Grundriß besitzt - der Krümmungsverlauf mit Kilometrierung der Anfangs- und Endpunkte der Übergangsbögen dargestellt.

5.1.2. Programmablaufplan



### 5.1.3. Verwendete Koordinatensysteme

In der graphischen Darstellung werden Koordinatensysteme entsprechend folgender Darstellung verwendet:



## 5.2. Datenstruktur

### 5.2.1. COMMON-Blöcke

#### 5.2.1.1. COMMON GRPC1

Dieser COMMON-Bereich enthält Informationen über die Aufteilung eines Bildes in die Teilbilder Grundriß, Aufriß und Krümmungsband.

Außer diesem COMMON-Bereich wird noch der COMMON-Block GRC1 benötigt.

### 5.2.2. Felder

#### 5.2.2.1. Feldgrößenparameter

Nr.	Name	Bedeutung
1	nsmax	Maximale Stationszahl einer Variante
2	namax	Maximale Anzahl Abschnitte in einer Variante
3	nkmax	Maximale Anzahl Kartenblätter auf einer Zeichnung
4	nvmax	Maximale Anzahl Varianten auf einer Zeichnung
5	msqp	Anzahl Parameter für ein Sonderquerprofil
6	nsqmax	Maximale Anzahl Sonderquerprofile
7	mps	Anzahl Parameter je Stationspunkt
8	nsmax	Maximale Anzahl Stationen je Abschnitt
9	mpg	Anzahl Parameter für ein Grundribelement
10	negmax	Maximale Anzahl Grundribelemente
11	mpa	Anzahl Parameter für ein Aufribelement
12	neamax	Maximale Anzahl Aufribelemente
13	nvgmax	Maximale Anzahl auf FILE31 gespeicherter Grundrißvarianten
14	nvamax	Maximale Anzahl auf FILE32 gespeicherter Aufribelemente
15	1s20	Satzlänge von FILE20

#### 5.2.2.2. Felder

Nr.	Name	Bedeutung
1	PG (3,nsmax)	für alle Stationen einer Variante: 1. r Rechtswert 2. h Hochwert 3. $\alpha$ Neigungswinkel im Grundriß
2	PA (3,nsmax)	für alle Stationen einer Variante: 1. s Stationierung 2. z Gelände- oder Gradientenhöhe 3. z' Steigung im Aufriß
3	PGH (3,nsmax)	wie PG für Hauptvariante
4	PH (3,nsmax)	Hilfsfeld für innerhalb der Zeichenfläche liegende Teile des Grund- oder Aufrisses
5	PKR (nsmax)	für alle Stationen einer Variante: $r_K$ Krümmungsradius
6	NRQ (2,nsmax)	für alle Stationen einer Variante: 1. nrq Stationsnummer 2. nrk Kartenummer
7	NRQ1 (namax)	Zeiger zur ersten Station eines Abschnitts in PG, PA, PGH, PKR, NRQ
8	NRKBG (nkmax)	Nummern der im Grundriß verwendeten Kartenblätter
9	NRKBA (nkmax)	Nummern der im Aufriß verwendeten Kartenblätter
10	NAM (nvmax)	Variantennamen der auf einer Zeichnung dargestellten Varianten
11	KZT (nvmax)	$\emptyset$ = TROP2 $\emptyset$ - Variante in Grund- und Aufriß 1 = Geometrischer Grundriß mit zugehörigem Aufriß 2 = Geometrischer Grund- und Aufriß

Nr.	Name	Bedeutung
12	NRL (nvmax)	Linientyp für graphische Darstellung der Varianten: $\emptyset = \text{—————}$ , 1 = $\text{— - - - -}$ , 2 = $\text{-----}$
13	NRS (nvmax)	Stiftnummer für graphische Darstellung der Varianten in unterschiedlichen Farben
14	NRT (nvmax, namax)	Nummern der Abschnitte für jede Variante
15	NRT1 (namax)	Nummern der Abschnitte für aktuell dargestellte Variante
16	NAV (nvmax)	Abschnittszahl für jede Variante
17	SQ (msqp, nsqmax)	Sonderquerprofildaten (s. 2.8)
18	ADAT (mps, nsmax)	Trassenabschnittsdaten (s. 2.2.2)
19	GPARG (mpq, negmax)	Grundriß-Elementdaten (s. 2.4)
20	APARG (mpa, neamax)	Aufriß-Elementdaten (s. 2.6)
21	NAMG (2, negmax)	Grundriß-Elementparameter (s. 2.9.1)
22	NAMA (2, neamax)	Aufriß-Elementparameter (s. 2.10.1)
23	QDAT (5, 1s2 $\emptyset$ )	5 Sätze mit Querprofildaten (s. 2.1.1.3)

### 5.3. Algorithmen

#### 5.3.1. Koordinatentransformationen

##### 5.3.1.1. Koordinatentransformation für den Grundriß

Gegeben sei die Hauptvariante mit ns Stationen. Die mittlere Station  $P_M(r_M, h_M)$  wird im Mittelpunkt angeordnet. Die erste Station des dargestellten Bereichs  $P_L(r_L, h_L)$  ergibt sich aus

$$\sqrt{(r_M - r_L)^2 + (h_M - h_L)^2} \leq 0,5 \cdot f_G \cdot b_G$$

$b_G$  = Breite des Grundrisses [cm]

Die Station  $P_L$  wird im Ursprung des Koordinatensystems  $(x_G, y_G)$  angeordnet. Damit ergibt sich für die Transformation von Landes- in Bildkoordinaten

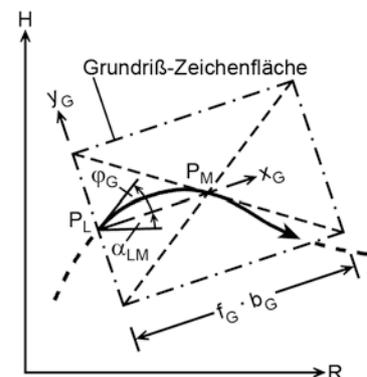
$$x_G = \frac{1}{f_G} \cdot (\cos \alpha_{LM} \cdot (r - r_L) + \sin \alpha_{LM} \cdot (h - h_L)) \quad [\text{cm}]$$

$$y_G = \frac{1}{f_G} \cdot (-\sin \alpha_{LM} \cdot (r - r_L) + \cos \alpha_{LM} \cdot (h - h_L)) \quad [\text{cm}]$$

$$\varphi_G = \alpha - \alpha_{LM}$$

$$f_G = \text{Grundrißmaßstab} \quad [1 \text{ cm} = f_G \text{ m}]$$

$$\alpha_{LM} = \text{Neigungswinkel von } \overrightarrow{P_L P_M}$$



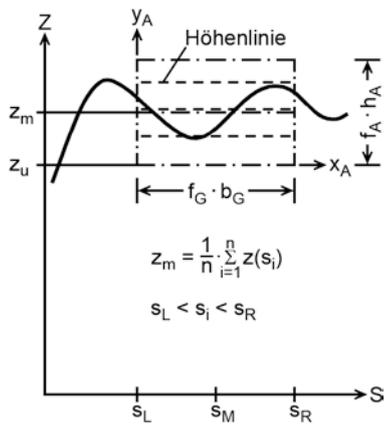
##### 5.3.1.2. Koordinatentransformation für den Aufriß

Gegeben sei eine beliebige Variante mit ns Stationen. Die mittlere Station  $P_M(r_M, h_M)$  wird über der Grundrißdarstellung angeordnet. Die erste Station des dargestellten Bereichs ergibt sich aus

$$s_M - s_L \leq 0,5 \cdot f_G \cdot b_G$$

Für die Transformation von Stations- in Bildkoordinaten erhält man

$$x_A = \frac{1}{f_G} \cdot (s - s_L)$$



$$y_A = \frac{1}{f_A} \cdot (z - z_u)$$

$$\varphi_A = \text{atan} \left( \frac{f_G}{f_A} \cdot z' \right)$$

$$f_A = \text{Aufrißmaßstab} \quad [1 \text{ cm} = f_A \text{ m}]$$

$$z_u = \text{Kote der untersten dargestellten Höhenlinie}$$

### 5.3.1.3. Koordinatentransformation für das Krümmungsband

Es werden die Krümmungen  $k = \frac{1}{r_k}$  dargestellt. Entsprechend 5.3.1.2 erhält man zunächst

$$x_k = \frac{1}{f_G} \cdot (s - s_L)$$

und weiter

$$y_k = 0 \quad \text{für } r_k \neq 0 \text{ (Gerade)}$$

$$y_k = \frac{1}{f_k \cdot r_k} \quad \text{für } r_k \neq 0$$

$$\varphi_k = \text{aus Spline-Interpolation über } P(x_k, y_k) \text{ nach 6.2}$$

Der Krümmungsmaßstab  $f_k$  kann wahlweise berechnet werden:

$$f_k = \frac{2}{r_{kmin} \cdot h_k}$$

$$r_{kmin} = \text{Min} \{ |r_k|, r_k \neq 0 \}$$

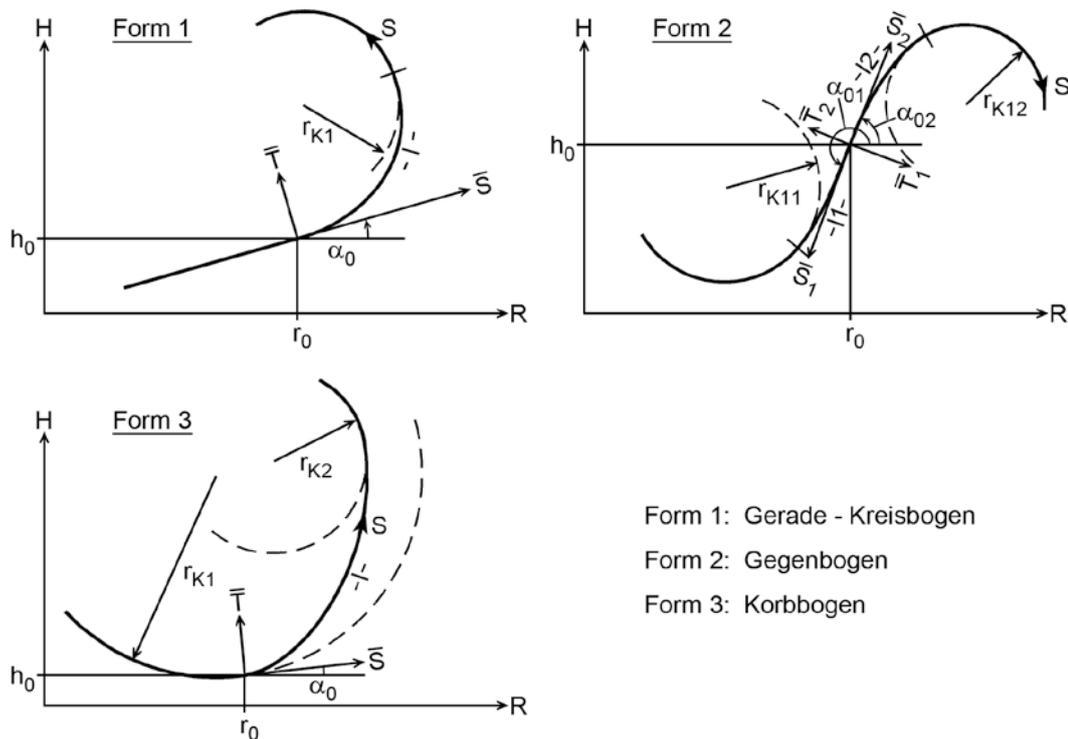
## 5.3.2. Berechnung der Übergangsbögen

### 5.3.2.1. Allgemeines

In der vorliegenden Form des Programmsystems sind Übergangsbögen mit sinusförmigem Verlauf der Krümmung vorgesehen. Diese haben z.B. im Vergleich mit kubischen Übergangsbögen den Vorteil, daß der Krümmungsverlauf am Beginn und Ende des Übergangsbogens eine stetige Tangente besitzt. Die Form des Übergangsbogens wird in einem lokalen  $\bar{S}$ - $\bar{T}$ -Koordinatensystem formuliert, dessen Ursprung in demjenigen Endpunkt des Übergangsbogens liegt, der die kleinere Krümmung aufweist, und dessen Abszissenrichtung mit der Richtung der Tangente an die Trasse in diesem Punkt identisch ist. Die Abszisse ist in bzw. entgegen der Trassierungsrichtung orientiert, wenn der Ursprung des  $\bar{S}$ - $\bar{T}$ -Koordinatensystems am Beginn bzw. am Ende des Übergangsbogens liegt.

Für betragsmäßig kleine Abrückungen  $\bar{T}$  kann die Koordinate  $\bar{S}$  durch die Bogenlänge  $S$  ersetzt werden. Das Gleichheitszeichen in den folgenden Formeln gilt daher näherungsweise.

Die folgenden Formeln wurden [1] entnommen.



### 5.3.2.2. Übergangsbogen zwischen Gerade und Kreisbogen

$$\bar{t} = \frac{s^3}{6 \cdot r_{K1} \cdot l} - \frac{l}{4 \cdot \pi^2 \cdot r_{K1}} \cdot \left( s - \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sin \frac{2 \cdot \pi \cdot s}{l} \right)$$

$$\bar{t}' = \frac{s^2}{2 \cdot r_{K1} \cdot l} - \frac{l}{4 \cdot \pi^2 \cdot r_{K1}} \cdot \left( 1 - \cos \frac{2 \cdot \pi \cdot s}{l} \right)$$

$$k = \frac{s}{r_{K1} \cdot l} - \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_{K1}} \cdot \sin \frac{2 \cdot \pi \cdot s}{l} \quad ; \quad k(0) = 0, k(l) = \frac{1}{r_{K1}}$$

$$k' = \frac{1}{r_{K1} \cdot l} \cdot \left( 1 - \cos \frac{2 \cdot \pi \cdot s}{l} \right) \quad ; \quad k'(0) = k'(l) = 0$$

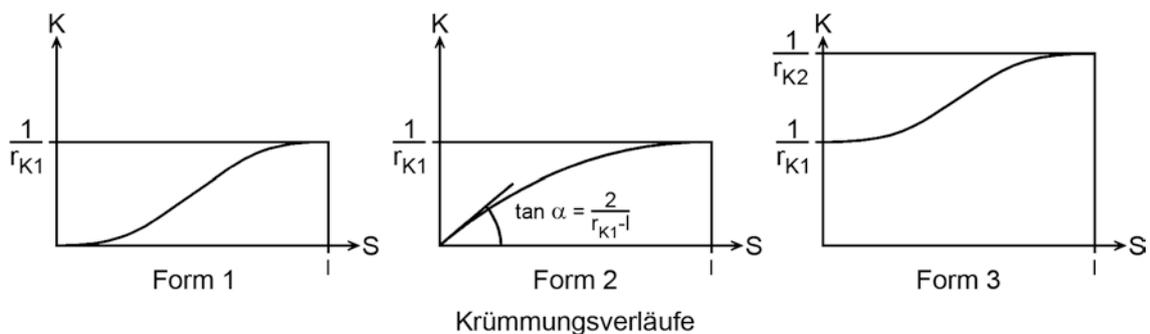
### 5.3.2.3. Gegenbogen

$$\bar{t} = \frac{s^3}{6 \cdot r_{K1} \cdot l} + \frac{l}{\pi^2 \cdot r_{K1}} \cdot \left( s - \frac{1}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi \cdot s}{l} \right)$$

$$\bar{t}' = \frac{s^2}{2 \cdot r_{K1} \cdot l} + \frac{l}{\pi^2 \cdot r_{K1}} \cdot \left( 1 - \cos \frac{\pi \cdot s}{l} \right)$$

$$k = \frac{s}{r_{K1} \cdot l} + \frac{1}{\pi \cdot r_{K1}} \cdot \sin \frac{\pi \cdot s}{l} \quad ; \quad k(0) = 0, k(l) = \frac{1}{r_{K1}}$$

$$k' = \frac{1}{r_{K1} \cdot l} + \frac{1}{r_{K1} \cdot l} \cdot \left( 1 - \cos \frac{\pi \cdot s}{l} \right) \quad ; \quad k'(0) = \frac{2}{r_{K1} \cdot l} \quad ; \quad k'(l) = 0$$



#### 5.3.2.4. Korbboogen

$$\bar{t} = \frac{s^3 \cdot (r_{K1} - r_{K2})}{6 \cdot l \cdot r_{K1} \cdot r_{K2}} - \frac{l \cdot (r_{K1} - r_{K2})}{4 \cdot \pi^2 \cdot r_{K1} \cdot r_{K2}} \cdot \left( s - \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sin \frac{2 \cdot \pi \cdot s}{l} \right)$$

$$\bar{t}' = \frac{s^2 \cdot (r_{K1} - r_{K2})}{2 \cdot l \cdot r_{K1} \cdot r_{K2}} - \frac{l \cdot (r_{K1} - r_{K2})}{4 \cdot \pi^2 \cdot r_{K1} \cdot r_{K2}} \cdot \left( 1 - \cos \frac{2 \cdot \pi \cdot s}{l} \right)$$

$$k = \frac{s \cdot (r_{K1} - r_{K2})}{l \cdot r_{K1} \cdot r_{K2}} - \frac{r_{K1} - r_{K2}}{2 \cdot \pi \cdot r_{K1} \cdot r_{K2}} \cdot \sin \frac{2 \cdot \pi \cdot s}{l} + \frac{1}{r_{K1}} ;$$

$$k(\emptyset) = \frac{1}{r_{K1}} ; \quad k(l) = \frac{1}{r_{K2}}$$

$$k' = \frac{r_{K1} - r_{K2}}{l \cdot r_{K1} \cdot r_{K2}} - \frac{r_{K1} - r_{K2}}{l \cdot r_{K1} \cdot r_{K2}} \cdot \cos \frac{2 \cdot \pi \cdot s}{l} ;$$

$$k'(\emptyset) = k'(l) = \emptyset$$

In äquidistanten Punkten  $s_i = s_0 + (i-1) \cdot \frac{1}{n}$  mit gewählter Unterteilung  $n$  werden  $\bar{t}_i$ ,  $\bar{t}'_i$ ,  $k_i$ ,  $k'_i$  berechnet.  $s_i$ ,  $\bar{t}_i$ ,  $\bar{t}'_i$  werden in das Landeskoordinatensystem transformiert.

$$r_i = r_0 + \cos \alpha_0 \cdot s_i - \sin \alpha_0 \cdot \bar{t}_i$$

$$h_i = h_0 + \sin \alpha_0 \cdot s_i + \cos \alpha_0 \cdot \bar{t}_i$$

$$\alpha_i = \alpha_0 + \text{atan}(\bar{t}'_i)$$

### 5.4. Berechnung des geometrischen Grundrisses

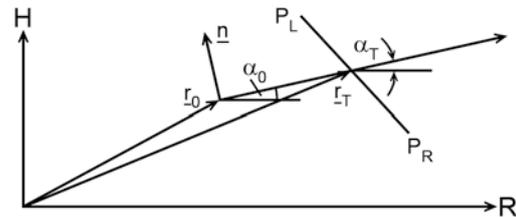
Zur Darstellung des geometrischen Grundrisses sind in TROP25 die Schnittpunkte  $\underline{r}_T$  der geometrischen Grundribelemente mit den Querprofilrichtungen, die durch die Querprofilendpunkte  $\underline{r}_L$ ,  $\underline{r}_R$  definiert sind, zu bestimmen.

#### 5.4.1. Grundribelement Gerade

Die Gerade ist durch die Koordinaten des Anfangspunkts  $\underline{r}_0\{r_0, h_0\}$  und den Winkel  $\alpha_0$  gegeben.

$$\underline{r}_T = \underline{r}_L + \gamma \cdot (\underline{r}_R - \underline{r}_L) \quad ; \quad \gamma = \frac{(\underline{r}_0 - \underline{r}_L)^T \cdot \underline{n}}{(\underline{r}_R - \underline{r}_L)^T \cdot \underline{n}} \quad ; \quad \underline{n}^T = [-\sin\alpha_0, \cos\alpha_0]$$

$$\alpha_T = \alpha_0$$



#### 5.4.2. Grundribelement Kreis

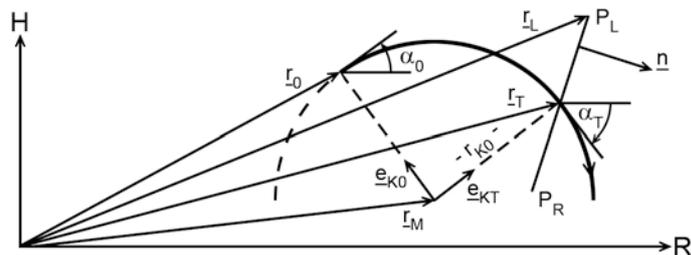
Der Kreis ist durch die Koordinaten des Anfangspunkts  $\underline{r}_0\{r_0, h_0\}$ , den Kreisradius  $r_{k0}$  und den Winkel  $\alpha_0$  gegeben.

$$\underline{r}_T = \underline{r}_M + r_{k0} \cdot \underline{e}_{kT} = \underline{r}_L + \gamma \cdot (\underline{r}_R - \underline{r}_L) \quad (a)$$

$$\underline{r}_M = \underline{r}_0 - r_{k0} \cdot \underline{e}_{k0}$$

$$\underline{e}_{k0}^T = \{-\sin\alpha_0, \cos\alpha_0\}$$

$$\underline{e}_{kT}^T = \{-\sin\alpha_T, \cos\alpha_T\}$$



Skalare Multiplikation von (a) mit  $\underline{n} = (\underline{r}_R - \underline{r}_L) \times \underline{e}_z$  ergibt

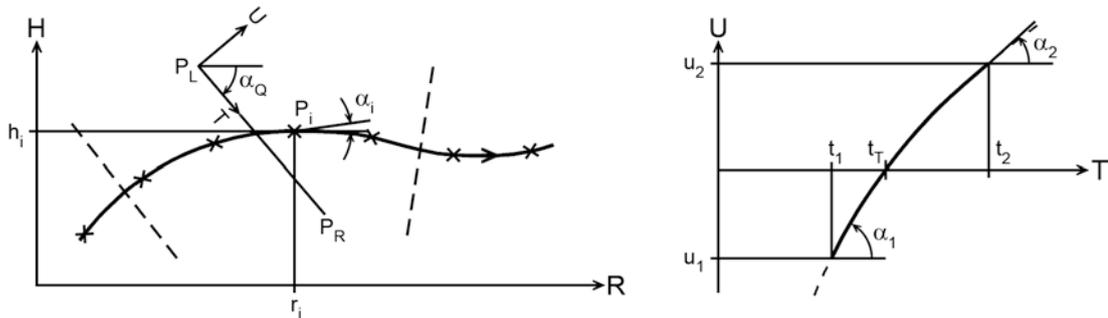
$$(\underline{r}_L - \underline{r}_M - r_{k0} \cdot \underline{e}_{kT})^T \cdot \underline{n} = 0$$

Dies liefert eine quadratische Gleichung für  $\sin\alpha_T$ . Im vorliegenden Anwendungsfall ist diejenige Lösung maßgebend, für die

$$0 < \gamma < 1 \quad \text{mit} \quad \gamma = \frac{(\underline{r}_T - \underline{r}_L)^T \cdot (\underline{r}_R - \underline{r}_L)}{|\underline{r}_R - \underline{r}_L|^2}$$

$$\alpha_T = \alpha \left\{ \underline{e}_R, \underline{e}_{kT}, \underline{e}_z \right\}$$

### 5.4.3. Grundrißelement Übergangsbogen



Der Übergangsbogen ist in den Punkten  $P_i(r_i, h_i, \alpha_i)$  definiert. Die Punkte  $P_i$  werden mit der Transformation (3.3.3.1) in Querprofilkoordinaten  $(t_i, u_i)$  transformiert. Zwischen den Punkten  $P_{i-1}$  und  $P_i$ , für die  $u_{i-1} \cdot u_i < 0$  gilt, schneidet das Querprofil den Übergangsbogen. Im Querprofil-Koordinatensystem ist durch  $u_1 = u_{i-1}$ ,  $\alpha_1 = \alpha_{i-1} - \alpha_0$ ,  $u_2 = u_i$ ,  $\alpha_2 = \alpha_i - \alpha_0$  ein kubisches Polynom definiert, dessen Nullstelle  $t_T$  mit der Regula falsa bestimmt wird. Mit (3.3.3.2) erhält man dann die Koordinaten des neuen Trassenpunkts im Landeskoordinatensystem.

## 6. Spline - Interpolation

In allen Programmen des Systems TROP werden Spline-Interpolationen zur Interpolation von Zwischenpunkten oder zur Berechnung von Steigungen verwendet. Hier finden kubische Spline-Kurven Anwendung, die zweimal stetig differenzierbar sind. Kubische Spline-Kurven zeichnen sich bei gleichen Randbedingungen gegenüber anderen Kurven dadurch aus, daß das Integral über das Quadrat der Krümmung, erstreckt über die Bogenlänge, zum Minimum wird:

$$\int_{s=0}^1 k^2(s) ds \rightarrow \text{Min.}$$

Bei der Spline-Interpolation von Zwischenpunkten sind in 2 Punkten die Ordinaten und Steigungen gegeben. Ordinate und Steigung in einem dazwischen liegenden Punkt werden berechnet. Bei der Berechnung von Steigungen sind in n Punkten die Koordinaten  $x_i, y_i$  gegeben. In den Randpunkten  $x_1, x_n$  werden zwei der Randbedingungen

$$y_1' = a, y_n' = b, y_1'' = c, y_n'' = d$$

vorgeschrieben. Die Steigungen in den inneren Punkten  $x_i, i=2, n-1$  und - falls sie dort nicht vorgeschrieben sind - in den Randpunkten  $x_i, x_n$ , werden berechnet.

### 6.1. Spline-Interpolation zwischen zwei Punkten

Die Spline-Interpolation zwischen zwei Punkten entspricht der Interpolation mittels eines kubischen Polynoms. Gegeben seien die Koordinaten zweier Punkte  $x_1, y_1, x_3, y_3$ , die Steigungen in diesen Punkten  $y_1', y_3'$  sowie die Abszisse  $x_2$  eines weiteren Punktes mit  $x_1 \leq x_2 \leq x_3$ . Dann erhält man mittels Spline-Interpolation die Ordinate  $y_2$  und die Steigung  $y_2'$  zu

$$\begin{aligned} \underline{y}_2 &= \underline{f}_2^T \cdot \underline{T}_2 \cdot \underline{y}_2 \\ \underline{y}_2' &= \underline{f}'_2^T \cdot \underline{T}'_2 \cdot \underline{y}_2 \end{aligned} \quad (6.1.1)$$

Mit dem Randvektor

$$\underline{y}_2^T = \{y_1, y_1', y_3, y_3'\}$$

und dem Funktionsvektor

$$\begin{aligned} \underline{f}_2^T &= \{1 - 3 \cdot t_2^2 + 2 \cdot t_2^3, 3 \cdot t_2^2 - 2 \cdot t_2^3, t_2 - 2 \cdot t_2^2 + t_2^3, -t_2^2 + t_2^3\} \\ \underline{f}'_2^T &= \{-6 \cdot t_2 + 6 \cdot t_2^2, 6 \cdot t_2 - 6 \cdot t_2^2, 1 - 4 \cdot t_2 + 3 \cdot t_2^2, -2 \cdot t_2 + 3 \cdot t_2^2\} \\ t_2 &= \frac{x_2 - x_1}{x_3 - x_1} \end{aligned}$$

sowie den diagonalen Transformationsmatrizen

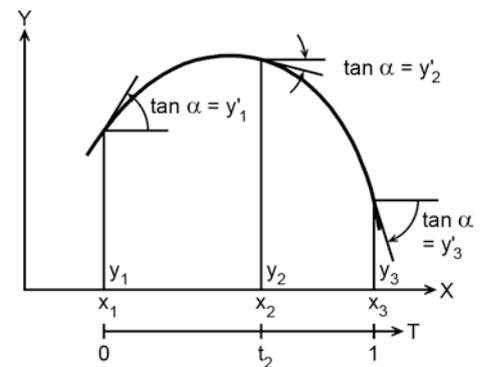
$$\begin{aligned} \underline{T}_2 &= [1, \Delta x, 1, \Delta x] \quad ; \quad \Delta x = x_3 - x_1 \\ \underline{T}'_2 &= \left[ \frac{1}{\Delta x}, 1, \frac{1}{\Delta x}, 1 \right] \end{aligned}$$

Die Komponenten des Funktionsvektors sind kubische Polynome im Einheitsintervall  $0 \leq t \leq 1$ , in denen jeweils einer der Randwerte  $f(0), \dot{f}(0) = \frac{df}{dt} \Big|_0, f(1), \dot{f}(1) = \frac{df}{dt} \Big|_1$  den Wert 1 hat und die restlichen 3 den Wert Null haben.

Weiterhin erhält man die Krümmung näherungsweise für betragsmäßig kleine Steigungen  $y'$

$$y''_2 = \underline{f}''_2^T \cdot \underline{T}''_2 \cdot \underline{y}_2$$

mit



$$f_2''^T = \{-6+12 \cdot t_2, 6-12 \cdot t_2, -4+6 \cdot t_2, -2+6 \cdot t_2\}$$

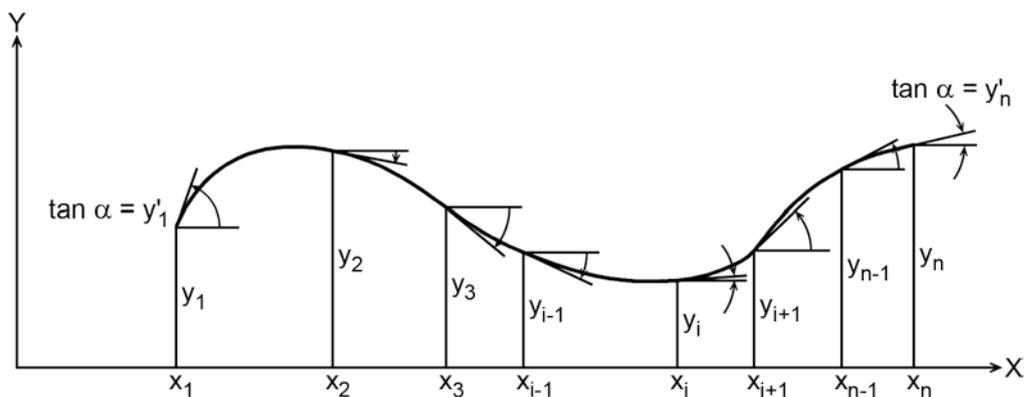
$$\underline{I}_2'' = \left[ \frac{1}{\Delta x^2}, 1, \frac{1}{\Delta x^2}, 1 \right]$$

## 6.2. Spline-Interpolation $y = f(x)$

Mit dieser Form der Spline-Interpolation werden die Steigungen einer Funktion  $y = f(x)$ , die punktweise gegeben ist, berechnet. Setzt man in 6.1  $x_1 = x_{i-1}$ ,  $x_2 = x_i$ ,  $x_3 = x_{i+1}$  und schreibt (6.1.1) für jeden inneren Punkt  $x_i$ ,  $i=2, n-1$  an, so erhält man jeweils eine Gleichung der Form (6.1.1), die die 3 unbekannt Steigungen  $y_{i-1}'$ ,  $y_i'$ ,  $y_{i+1}'$  enthält. Damit hat man ein System von  $n-2$  Gleichungen in Tridiagonalform für die  $n$  unbekannt Steigungen  $y_i'$ ,  $i=1, n$ . Die noch fehlenden zwei Gleichungen stellen jeweils zwei der folgenden Randbedingungen dar:

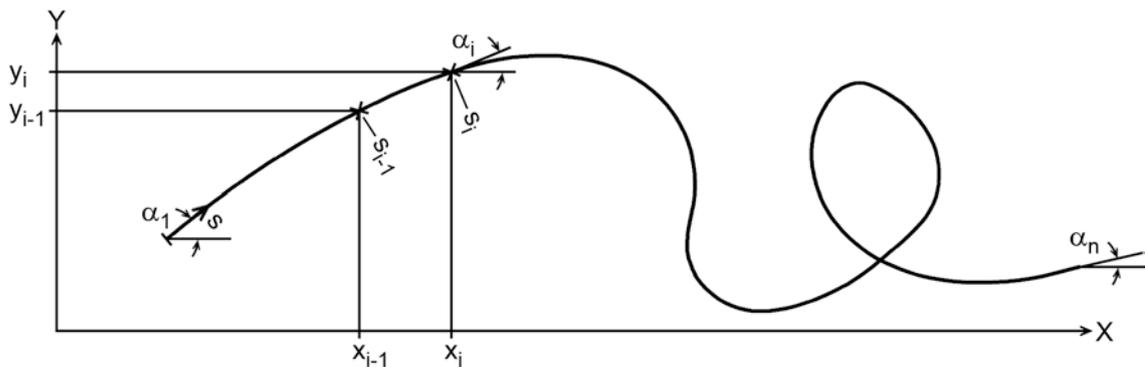
- a)  $y_1' = a$  :  $a = \underline{f}_1'^T \cdot \underline{I}_1' \cdot \underline{y}_1$   
 b)  $y_n' = b$  :  $b = \underline{f}_n'^T \cdot \underline{I}_n' \cdot \underline{y}_n$   
 c)  $y_1'' = c$  :  $c = \underline{f}_1''^T \cdot \underline{I}_1'' \cdot \underline{y}_1$   
 c)  $y_n'' = d$  :  $d = \underline{f}_n''^T \cdot \underline{I}_n'' \cdot \underline{y}_n$

Das Gleichungssystem wird mit dem Gauß'schen Algorithmus unter Berücksichtigung der Tridiagonalform der Koeffizientenmatrix gelöst.



### 6.3. Spline-Interpolation $x = x(s)$ , $y = y(s)$

Mit dieser Form werden die Neigungswinkel  $\alpha$  einer Kurve  $x = x(s)$ ,  $y = y(s)$  berechnet, die in Abhängigkeit von der Bogenlänge  $s$  als Parameter gegeben ist. Diese Form der Interpolation wird zum Zeichnen des Grundrisses benötigt, da hier die Trasse nicht unbedingt als Funktion der Bildkoordinate  $x_G$  gegeben ist.



Gegeben seien  $n$  Punkte einer Kurve mit den Koordinaten  $x_i, y_i, i=1, n$ . Gesucht sind die Neigungswinkel  $\alpha_i$  in diesen Punkten. Die Koordinaten  $x_i$  und  $y_i$  werden als Funktion der Polygonzuglänge

$$s_i = s_{i-1} + \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2} \quad ; \quad i=2, n \quad ; \quad s_1 = 0$$

dargestellt. Für die Funktionen  $x_i(s_i), y_i(s_i)$  erhält man mit Hilfe der im vorigen Kapitel dargestellten Form der Spline-Interpolation die Steigungen  $\dot{x}_i = \frac{dx}{ds} \Big|_i, \dot{y}_i = \frac{dy}{ds} \Big|_i$ .

Für diese Steigungen muß  $|\dot{x}_i| \leq 1, |\dot{y}_i| \leq 1$  gelten; durch Rundungsfehler entstehende Werte, die betragsmäßig größer als 1 sind, werden im Programm auf 1 gesetzt.

Damit erhält man die Neigungswinkel  $\alpha_i$  zu

$$\alpha_i = \operatorname{atan} \frac{\dot{y}_i}{\dot{x}_i} \quad \text{für } \dot{x}_i > 0, \operatorname{atan} \frac{\dot{y}_i}{\dot{x}_i} > 0$$

$$\alpha_i = \operatorname{atan} \frac{\dot{y}_i}{\dot{x}_i} + 2 \cdot \pi \quad \text{für } \dot{x}_i > 0, \operatorname{atan} \frac{\dot{y}_i}{\dot{x}_i} < 0$$

$$\alpha_i = \operatorname{atan} \frac{\dot{y}_i}{\dot{x}_i} + \pi \quad \text{für } \dot{x}_i < 0$$

Ist der linke Winkel mit  $\alpha_l = a$  vorgegeben, so erhält man für die Spline-Interpolation von  $x = x(s)$  und  $y = y(s)$  die Randbedingungen

$$\dot{x}_1 = \cos a$$

$$\dot{y}_1 = \sin a .$$

Ist der rechte Winkel mit  $\alpha_r = b$  vorgegeben, so erhält man

$$\dot{x}_n = \cos b$$

$$\dot{y}_n = \sin b .$$

Für  $n > 33$  wird die Spline-Interpolation jeweils in Abschnitten mit maximal 33 Punkten durchgeführt. Diese Abschnitte überlappen sich in einem Bereich von 4 Punkten, um einen stetigen Übergang zwischen den Abschnitten herzustellen.

### Literaturverzeichnis

[1] R. Zurek, P. Mölzer

"Trassierungselemente für Schnellbahnen mit elektromagnetischer Schwebetechnik"

Eisenbahntechnische Rundschau 4/1977, S. 197 - 206

## EINSATZ BILDLICHER DARSTELLUNGSTECHNIKEN IM LAUFE DER UNTERSUCHUNG UND BEI DER DOKUMENTATION DER ERGEBNISSE

Mac Kneißl

---

Im Rahmen der durchgeführten Planungsstudien wurde eine Reihe von Darstellungstechniken angewandt, sowohl zur Erstellung der Bearbeitungsgrundlagen für die einzelnen Arbeitsschritte, als auch zur Dokumentation der Untersuchungsergebnisse. Die Darstellungen dienten dabei gleichsam als "visuelle Datenspeicher". Sie visualisieren orts- und themabezogene Grund-, Entwurfs- und Bewertungsdaten sowie Einzel- und Aggregationsdaten der Ergebnisse und erlaubten somit, die wesentlichen Zusammenhänge zu veranschaulichen.

Vor der Betrachtung der einzelnen bildlichen Darstellungstechniken im Arbeitsablauf soll zunächst kurz auf die Anforderungen an die visuellen Darstellungen im Rahmen der bearbeiteten Planungsstudien eingegangen werden. Schließlich werden dann noch Fragen der Reproduktion berührt.

### 1. Anforderungen an visuelle Darstellungen im Rahmen der Untersuchungen

An die bildlichen Darstellungen ist, aus Gründen allgemeiner Verständlichkeit und rationeller Bearbeitungsmöglichkeit, eine Reihe von Anforderungen zu stellen, die kurz zusammengefaßt in etwa folgendermaßen aufzulisten wären:

- weitgehendste Verwendung vorhandener Darstellungen, möglichst im Bearbeitungsmaßstab; hierbei handelt es sich primär um Kartenmaterial, wie z.B. Katasterkarten, thematische Karten oder Planungskarten;
- Beachtung der planzeichenrelevanten Vorschriften bzw. der geübten Praxis bei der Weiterverarbeitung des Grundmaterials;
- weitgehende Möglichkeit der stufenweise Weiterentwicklung und Weiterverwendung der Darstellungen als Entwurfsgrundlagen, als Entwurfs- und Bewertungsunterlagen, als Unterlagen für Präsentationen von Zwischenergebnissen, als visuelle Kommunikationsmittel zwischen den Beteiligten in interdisziplinären Bearbeitungsteams und schließlich als visualisiertes Planungsergebnis in Form von reproduzierbaren Ergebnisunterlagen;
- Möglichkeit der Verkleinerung, möglichst innerhalb der Formatschritte des

- DIN A 4 - Systems;
- Möglichkeit der Darstellung in Farbe und Schwarz/Weiß;
  - einheitliche graphische Gestaltung soweit möglich zur Erreichung eines geschlossenen visuellen Gesamterscheinungsbildes.

## 2. Visuelle Darstellungen im Rahmen des Arbeitsablaufes der Studien

Da bei der Bearbeitung der Planungsstudien besonderer Wert auf die Nachvollziehbarkeit der Planungsergebnisse gelegt wurde, erfolgte im Rahmen der Ausarbeitung der Ergebnisunterlagen auch die Darstellung aller wesentlichen Arbeitsschritte in anschaulicher Form. Die ausführlichen Textbeiträge, jeweils in Textbänden zusammengefaßt, wurden durch zahlreiche Einzeldarstellungen ergänzt. Daneben wurden in umfangreichen Kartenanlagen, in Kartenkassetten zusammengefaßt, der Planungsprozeß und die Planungsergebnisse dokumentiert.

In den voranstehenden Beiträgen zu diesem Heft sind ausschnittsweise und beispielhaft eine Reihe der erwähnten Abbildungen wiedergegeben. Die kurzen Anmerkungen dieses Beitrages zu den eingesetzten Darstellungstechniken werden aus Gründen der Vereinfachung und des besseren Überblicks auf die im Anhang enthaltenen Bildtafeln Nr. 1 mit Nr. 8 bezogen. Diese Bildtafeln geben in komprimierter, vorwiegend bildhafter Form neben den einzelnen Etappen des Entwurfsweges auch einen ausreichenden Überblick über die angewandten Darstellungstechniken.

Aus typologischer Sicht können die folgenden hauptsächlichen Darstellungsarten angeführt werden:

- Grundkarten, ergänzt durch eigene kartographische Eintragungen;
- Computer-Ausdrucke (Plots);
- Schaubilder;
- Tabellen, Diagramme;
- kombinierte Darstellungen.

Den größten Umfang des verwendeten bildlichen Materials nahmen die kartographischen Darstellungen ein. Dabei stand als Basiskarte die Topographische Karte 1 : 25 000 im Mittelpunkt, da sich für die durchgeführten Planungsstudien der Bearbeitungsmaßstab 1 : 25 000 als sinnvoll erwies. Diese Kartengrundlage fand Verwendung sowohl bei den Arbeitsplänen für den Trassenvor-

entwurf (Variantennetz) und bei den Bewertungsplänen, wie aus den Bildtafeln 2 und 3 zu ersehen ist, als auch bei den Darstellungen der Trassegeometrie im Grundriß, wie z.B. aus Bildtafel 6 zu entnehmen, sowie schließlich bei den kartographischen Darstellungen der Umweltbeeinflussungen der Bildtafel 8.

Infolge der durchgängigen Verwendung dieses Grundkartentyps vom Vorentwurfsstadium bis hin zur Enddarstellung der optimalen Trasse und zur Analyse der Trassenwirkungen, konnte das ursprüngliche TK-Blatt in Schritten mit den jeweils notwendigen Daten ergänzt werden und kartographisch erweitert werden, wie z.B. durch den Eingang landesplanerischer und ökologischer Daten bis hin zu Isophonendarstellungen.

Durch reprographische Differenzierungen, wie z.B. Rasterungen der Grundzeichnungen oder Einkopieren von Grundrißplots und farbliche Differenzierungen von Nutzungen und Schutzgebieten konnten jeweils die relevanten Datengruppen visuell verdeutlicht werden.

Neben den beschriebenen Grundkarten, einschließlich der vielfältigen Ergänzungen, wurden zu Übersichtszwecken oder zur Darstellung besonderer Sachverhalte die aus Bildtafel 2 zu ersehenden Karten in höheren Maßstäben erstellt. Sie dienten einerseits zur Vermittlung von räumlicher Übersicht in der Trassenentwurfsphase und andererseits zur Veranschaulichung von Trassierungshinweisen aus landesplanerischer und ökologischer Sicht.

Eine weitere Gruppe sehr wesentlicher Darstellungen wird von den Computerzeichnungen (Plots) gebildet. Die Bildtafeln 4, 6 und 7 zeigen deutlich, wie insbesondere der gesamte Untersuchungsabschnitt der Trassenoptimierung und des Endausdrucks weitgehend auf der Plotdarstellung beruht, wobei die interaktiven Arbeitsschritte der Optimierung auch anhand der Bildschirmdarstellungen erfolgten. Der Ergebnisausdruck verdeutlicht hier gleichzeitig in hohem Maße den Arbeitsablauf. Besonders deutlich konnten die kombinierten Darstellungen von Grundrißkarten, einkopiertem Trassenplot und zugehörigem Aufrißausdruck der Trasse deren Verlauf veranschaulichen, wie dies aus den Bildtafeln 6 und 7 zu ersehen ist.

Desweiteren konnten in Schaubildern besonders Planungsdetails verdeutlicht werden. Die Bildtafeln 3, 4 und 8 enthalten Darstellungen, die von Fahrweg-

elementen bis zu landschaftsästhetischen Vorschlägen reichen.

Einen breiten Raum zur Darstellung von Einzelergebnissen nahmen im Untersuchungsablauf tabellarische Darstellungen und Diagramme ein, die von einfachen Tabellen bis zu Verflechtungsmatrizes reichten, wie ausschnittsweise in Bildtafel 8 wiedergegeben. Diese Darstellungsart fand vornehmlich in den Textbänden Eingang. Aus den Bildtafeln ist zu ersehen, daß sie in allen Planungsphasen, ergänzend zu den kartographischen und zeichnerischen Unterlagen, regelmäßig zur Detailinformation und zur Darstellung von Abläufen (siehe z.B. Ablaufdiagramm auf Bildtafel 1) Verwendung fanden. Wesentlich war jedoch, diese Darstellungsart der Tabellen und Diagramme zu vereinheitlichen und ihre Gesamtzahl zu beschränken, um die notwendige Ausgewogenheit zwischen Detailinformation und verdichteter Information zu erreichen.

Insgesamt kann festgestellt werden, daß zur Übermittlung der Untersuchungsergebnisse an den Leser und Betrachter ein visuelles Gleichgewicht zwischen Text, Karte, Bild und Diagramm anzustreben ist, wobei eine möglichst durchgängige graphische Gestaltung die Verknüpfung des visuell Wahrgenommenen beim Betrachter erleichtert und somit ein höheres Maß an Informationsübertragung gewährleistet.

Im folgenden soll nunmehr noch kurz auf einige Fragen der Reproduktion eingegangen werden.

### 3. Anmerkungen zur Reproduktion der Ergebnisunterlagen

Im Rahmen von Planungsstudien, Planungsgutachten und dergl. wird häufig eine Mehrfachausfertigung vorzunehmen sein. In der Regel bewegt sich die Stückzahl zwischen 10 bis 20 Exemplaren, mitunter auch darüber, jedoch meist nicht in Auflagenstärke, die eine rationelle Drucklegung erlauben. Häufig wird dieses Problem erst spät erkannt. Insbesondere können erhebliche Kosten entstehen, wenn es sich um die Reproduktion farbiger Unterlagen handelt. Dies ist aber bei der Darstellung der zumeist sehr komplexen Darstellungen zur Gewährleistung der Übersichtlichkeit und Unterscheidbarkeit nicht zu umgehen.

Im Rahmen der hier beschriebenen Studie wurde der überwiegende Teil der

Darstellungen farbig reproduziert. Da die Drucklegung bei einer Auflagenstärke von 20 Stück aufgrund der sehr hohen Kosten zur Erstellung der Farbauszüge auszuschneiden war, wurde auf ein photographisches Direktverfahren zurückgegriffen, das die Originalergebnisunterlagen in 50-prozentiger Verkleinerung reproduzierte.

Neben den Farbreproduktionen wurden die Schwarz/Weiß-Darstellungen in analoger Weise auf Fotofolie vervielfältigt, wobei durch den Einsatz von Rasterungen differenzierte Karten-Plotkombinationen erzeugt werden konnten.

Wesentliche Voraussetzung für eine rationelle Reproduktion und der hierfür notwendigen Originalunterlagen ist eine sehr frühzeitige Planung aller für den Arbeitsablauf und die Ergebnisdokumentation notwendigen Unterlagen. Werden frühzeitig die Arbeitsunterlagen bereits im Hinblick auf die Enddarstellungen erarbeitet und die für die Reproduktion geeigneten Unterlagen jeweils ausgefiltert und gespeichert - in etwa auf Negativen - dann könnte eine häufig festzustellende Mehrfachbearbeitung weitgehend eingeschränkt werden. Diese Planung der Ergebnisdarstellung in formaler Hinsicht sollte auch die Festlegung der Arbeits- und Endformate einschließen; denn nur dann kann eine weitgehende Einheitlichkeit von Maßstäben und Endformaten der Ergebnisunterlagen sichergestellt werden.



**Karner** Planungsbüro Gert Karner  
Ing. grad.  
Steinsdorfstraße 13  
8000 München 22

**Kneißl** Planungsbüro Mac Kneißl  
Dipl. Ing. Architekt, lic. rer. reg.  
Thierschstraße 34  
8000 München 22

**GeoMeDa** Wissenschaftliche Beratung  
und Projektbetreuung für  
geodätische Meßtechnik und  
Datenverarbeitung  
Rosenheimer Landstraße 6A  
80112 Ottobrunn

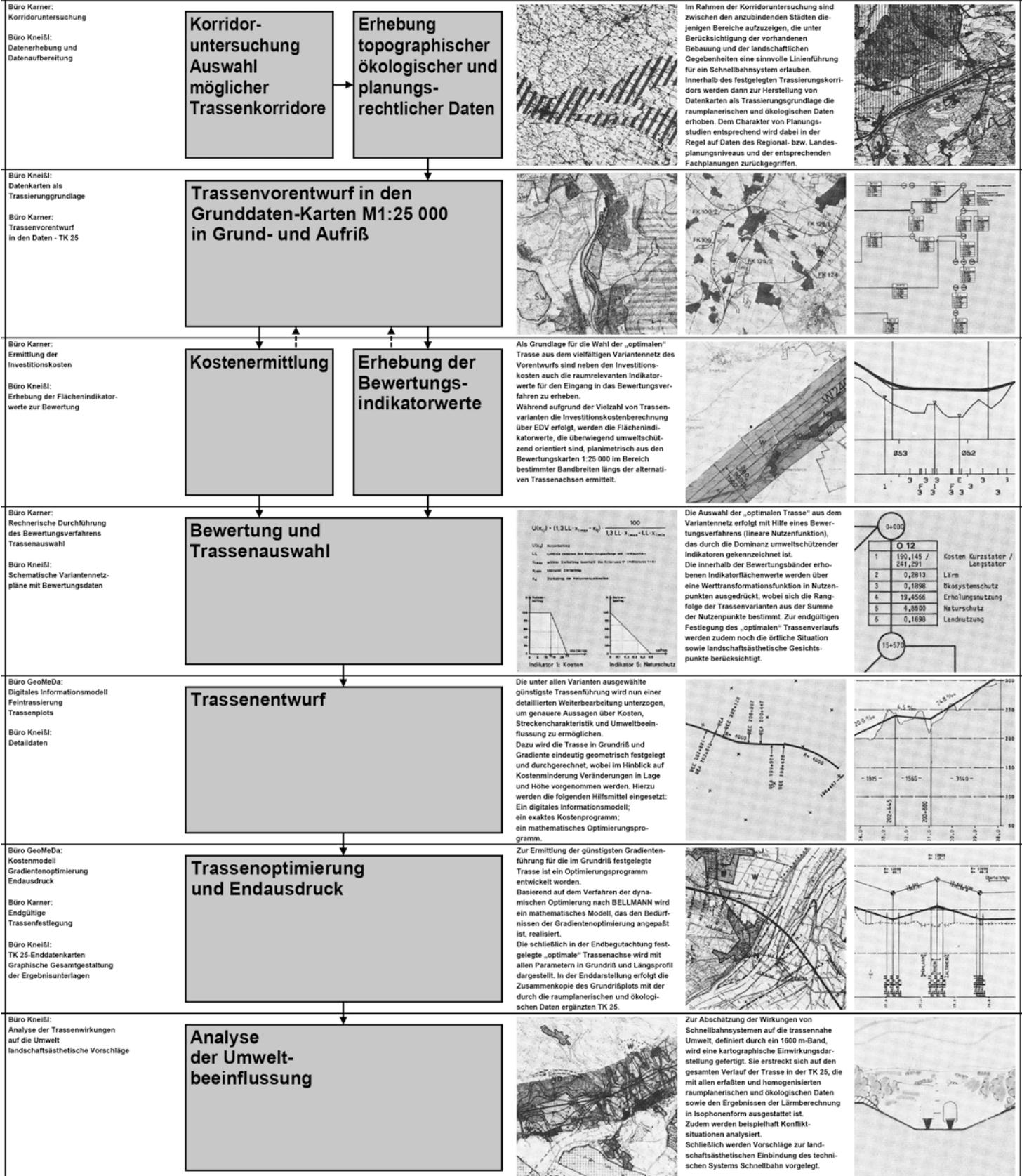
Planungsstudien

# EMS/RS

1

## Untersuchungsablauf

Auf den folgenden Schautafeln sind die Untersuchungsschritte dargestellt, die im Rahmen der Bearbeitung des Arbeitspaketes „Trassierung“ in den Planungsstudien EMS (Elektromagnetisches Schnellbahnsystem) und RS (Rad/Schiene-Schnellbahnsystem) in den Jahren 1980/81 in interdisziplinärer Teamarbeit von den Planungsbüros Karner, Kneißl und GeoMeDa erbracht wurden.



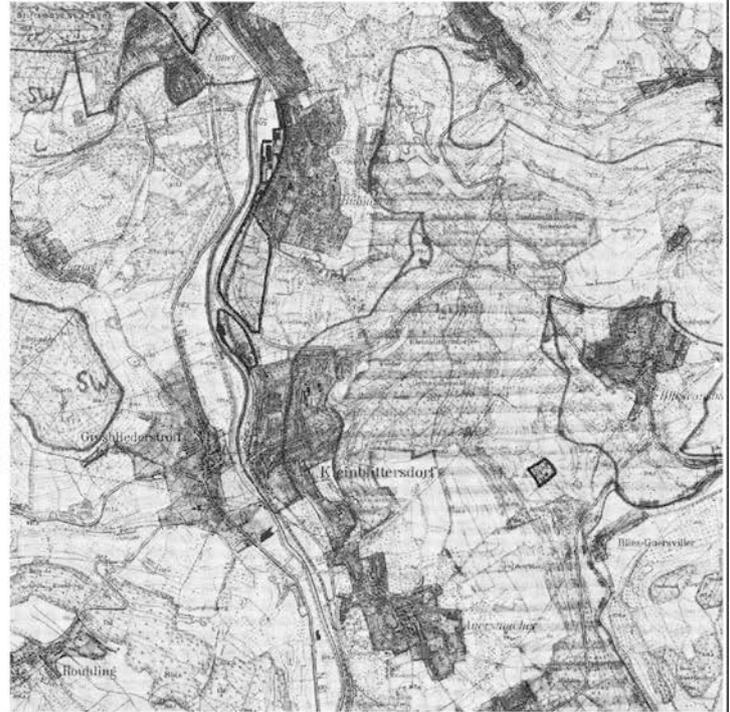


Kneißl

**Datenaufbereitung**  
Raumbedeutsame Daten  
Bewertungsdaten



### Aufbereitung raumplanerischer und ökologischer Daten

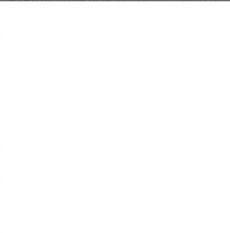


Dem Charakter von Planungsstudien entsprechend, erfolgt die Datenerhebung innerhalb des vom Trassierer vorgegebenen Trassierungskorridors, auf dem Niveau der Regional- bzw. Landesplanung und der zugehörigen Fachplanungsebenen, nicht jedoch auf der kommunalen Ebene. Im Regelfall beziehen sich die in die Untersuchung eingehenden raumplanerischen Daten auf die wesentlichen Flächennutzungen, Infrastruktureinrichtungen und Funktionsbereiche, die ökologischen Daten auf die natürlichen Grundlagen und die ausgewiesenen ökologischen Funktionsbereiche, wie z.B. Schutzgebiete. Als Hauptdatenquellen dienen, wie aus den



Abbildungen der linken Tafelhälfte an Beispielen zu ersehen, regionale Raumordnungspläne, Landesentwicklungspläne, Fachpläne, wie z.B. Straßenbedarfs- und -ausbaupläne, Landschaftsrahmenpläne, und, soweit vorhanden, landschaftsökologische Gutachten für Teilbereiche. Dem Trassierer werden, wie aus der rechtsstehenden Abbildung ersichtlich, sämtliche homogenisierten raumplanerischen und ökologischen Daten in der TK 26 als Arbeitskarte zur Verfügung gestellt, wobei der Blick auf die Bereitstellung der für die Trassenauswahl maßgebenden Bewertungsindikatoren (siehe Abbildung im unteren Tafelbereich) zu richten ist.

### Trassierungshinweise aus raumplanerischer Sicht

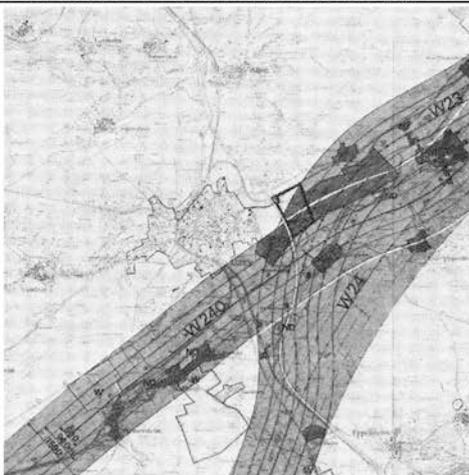


Neben den Datenkarten 1:25 000 werden dem Trassierungsingenieur zur besseren Übersicht in der Vorentwurfsphase Übersichtskarten 1:100 000 an die Hand gegeben, aus denen die Hauptnutzungsflächen, die wesentlichen Infrastruktureinrichtungen sowie die ökologischen Schutzgebiete hervorgehen. Dazu werden in Textform Erläuterungen zur Landschaftsstruktur und zum Landschaftshaushalt für den gesamten Trassierungskorridor gegeben und Trassierungsempfehlungen im Hinblick auf die Minimierung umweltbeeinträchtigender Trassenführungen ausgesprochen. Ergänzend werden thematische Kartenansätze, wie etwa über die geologische

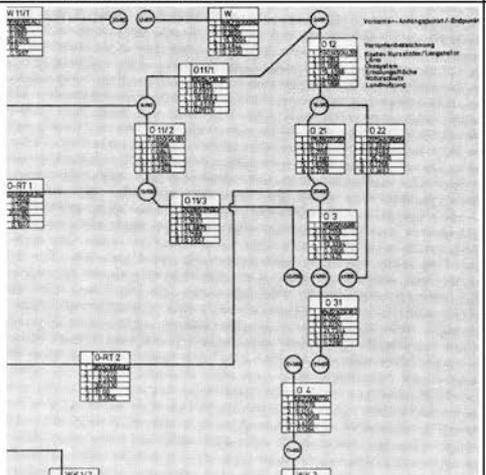
Situation, die Grundwasserverhältnisse, die geländeklimatischen Bedingungen oder über besonders schutzwürdige Flächen, zur Verfügung gestellt.



### Erhebung der Indikatorwerte für die Trassenbewertung



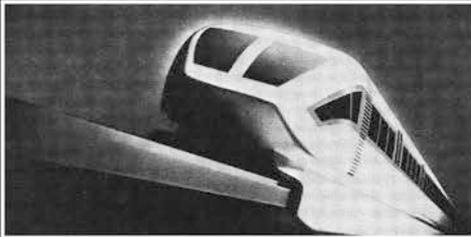
Neben den oben beschriebenen raumplanerischen und ökologischen Daten, die in kartographischen und textlichen Arbeitsunterlagen dem Trassierer als Grundlage zum Entwurf eines Variantennetzes dienen, wird für das Bewertungsverfahren zur Trassenauswahl (Auffindung der "optimalen Trasse") eine weitere Datenkategorie in Form von Bewertungsdaten bereitgestellt. Dem zugrundegelegten Bewertungsverfahren entsprechend werden Flächenindikatorwerte planimetrisch aus den Bewertungskarten 1:25 000 im Bereich bestimmter Bandbreiten längs der alternativen Trassenachsen ermittelt und in einem schematischen Variantennetzplan im Zusammenhang für die Bewertungsrechnung dargestellt. Das Bewertungsverfahren ist auf einer der Folgetafeln näher erläutert. Die Indikatorwerterhebung erfolgt z.B. für die Lärmbelastung innerhalb eines 500 m-Bandes, für die Erholungsnutzung innerhalb eines 1 500 m-Bandes und für den Natur- und Landschaftsschutz innerhalb eines 900 m-Bandes.





Karner

Trassenvorentwurf  
Trassierungsgrundlagen  
Variantennetz



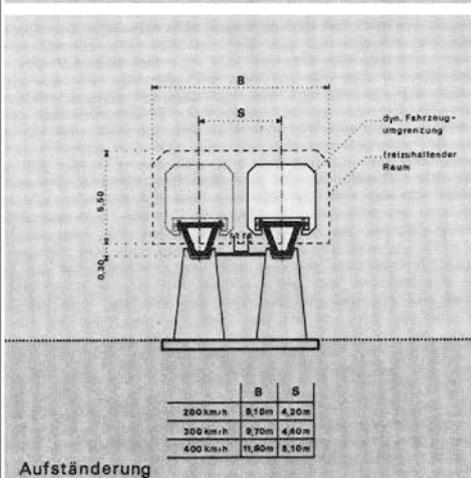
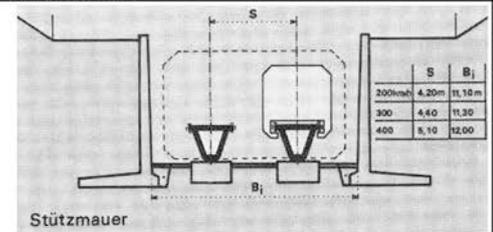
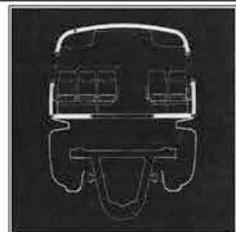
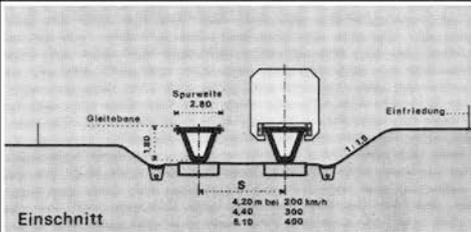
### Trassierungsparameter für das EMS-Schnellbahnsystem

Das Verkehrskonzept der Studie beruht auf der Annahme eines reinen Personenverkehrs mit einer Auslegungsgeschwindigkeit von 400 km/h.  
Die maximale Querneigung des Beton- oder Stahlfahrgeweges (Balken- bzw. Hohlkastenkonstruktion) wurde auf 12° beschränkt, woraus sich der Mindesthalbmesser unter Berücksichtigung einer maximal zulässigen freien lateralen Fliehbeschleunigung von 1,0 m/s<sup>2</sup> zu  $r_{min} = 4.000$  m ergibt. Im Regelfall sollte die freie laterale Fliehbeschleunigung 0,8 m/s<sup>2</sup> nicht überschreiten, weshalb der Regelradius  $r_{reg} = 4.250$  m beträgt. Die von dem Entwurfsvahrgeweg zu bewältigende maximale Längsneigung beträgt

50‰ (!) jedoch wurde dieser Grenzwert auf Ausnahmefälle z.B. zur Vermeidung von teuren Tunnelbauwerken beschränkt. Vergleicht man diese Werte mit den z. Zt. üblichen Trassierungsgrenzwerten z.B. bei der Deutschen Bundesbahn, so wird deutlich, welche Möglichkeiten hinsichtlich der Linien- und Gradientenführung trotz hoher Geschwindigkeit eröffnet werden. Die Übergangsbögen und Rampen zwischen Gerade und überhöhtem Kreisbogen sowie zwischen Kreisen wurden zum möglichst gleichmäßigen Aufbau der fahrdynamisch relevanten Werte wie z.B. Ruck- und Hubbeschleunigung sinusförmig in Anlehnung nach KLEIN ausgeführt.

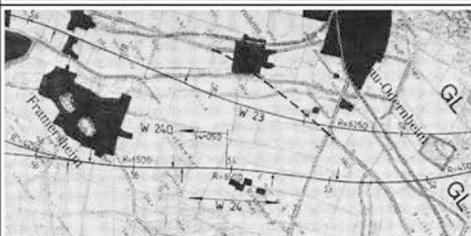
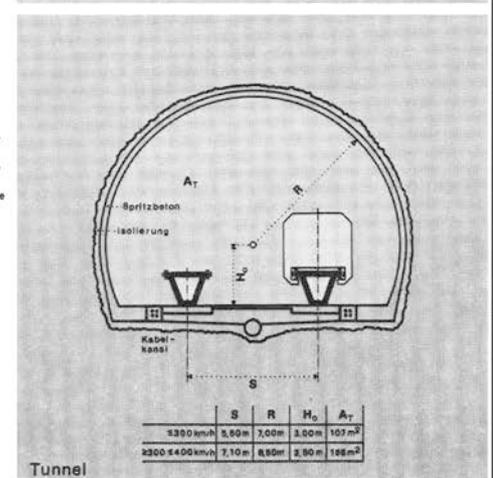
#### Trassierungsparameter

Auslegungsgeschwindigkeit	400 km/h
Mindestradius	4.000 m
Regelradius	4.250 m
Querneigung	12°
Längsneigung	max 50‰ reg 35‰

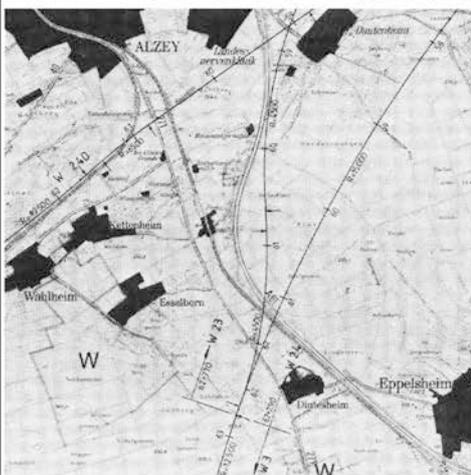


### Fahrweegelemente des EMS-Systems

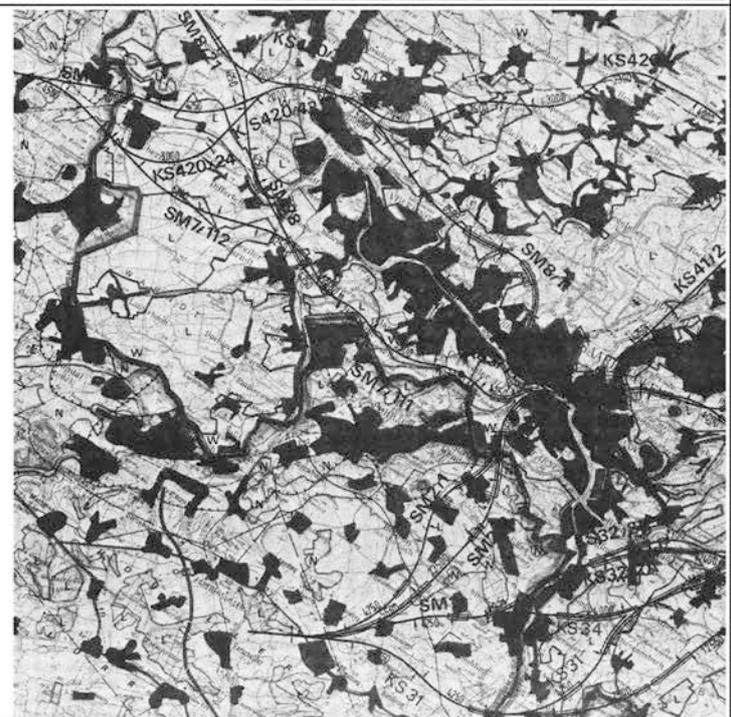
Typisch für die EMS-Trasse ist die Fahrwegform der Aufständigung. Bei einer Gradientenführung über dem notwendigen Lichtraum der verschiedenen Verkehrswege werden durch variable Stützenabstände in diesem Fahrwegbereich niveaufreie Kreuzungen ohne Änderung der Gradientenlage des kreuzenden Verkehrsweges ermöglicht. Teure und zeitraubende Flurberäumungsverfahren können damit zum großen Teil entfallen, da eine Zerschneidung der gewachsenen Verbindungen vermieden wird. Die Führung der EMS-Trasse in Einschnittlage oder niveaugleich mit dem Gelände bringt dagegen die gleichen Probleme, wie sie bei anderen Landverkehrsmitteln auch vorzufinden sind.



### Trassensuche im Grundriß



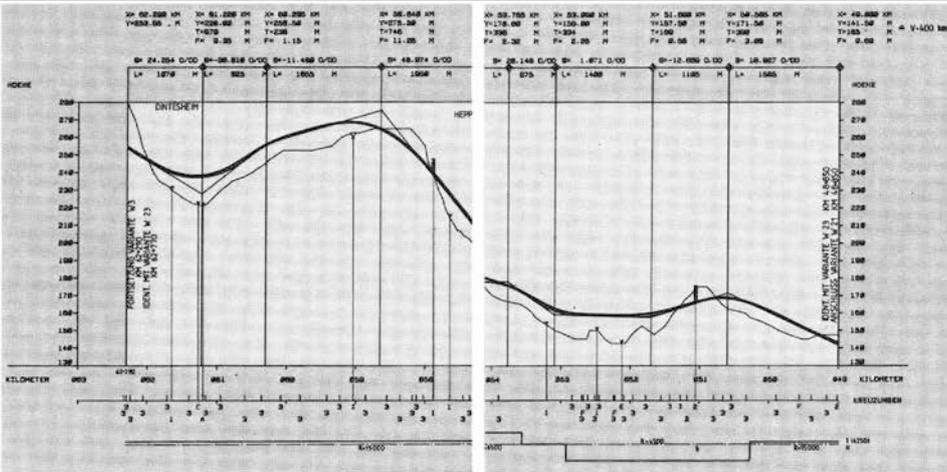
Die Herabsetzung des zulässigen Mindestradius trägt zum einen zur sicherlich wichtigen "Erhöhung der Umweltverträglichkeit der Planung durch Abstandsgewinn von bebauten Gebieten" bei, führt zum anderen aber auch dazu, daß sich die Anzahl technisch möglicher Varianten zwischen zwei Anbindungspunkten beträchtlich erhöht. Die Untersuchung des Trassenkorridors im Grundriß erzeugt so ein in der Regel mehrfach verknüpftes Variantennetz. Die Qualität einer solchen Planung im Grundriß hängt allein vom Geschick und dem geschulten Auge des Entwurfsingenieurs ab. In der Regel sind die Zwänge, die sich aus Ökologie und Bebauung ergeben jedoch derart vielfältig, daß der erfahrene Ingenieur nur wenige Versuche benötigt, um die Lage der Trasse festzulegen.





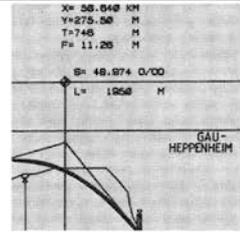
Karner

Trassenvorentwurf  
Gradientenwahl  
Trassenbewertung



### Wahl der Gradiente

Grundlage der Gradientenwahl ist der Geländelängsschnitt der Variante. Die Art der Daten - Schnittpunkte der Trassenachse mit den Höhenlinien und der Verkehrsinfrastruktur - läßt eine einfache Verarbeitung mit dem Rechner sowohl hinsichtlich der Erstellung der Pläne als auch im Hinblick auf die Investitionskostenberechnung zu. Die Wahl der Gradiente ist zum einen sicher abhängig von den Zwangspunkten (Fluß, Autobahn), aber auch von der "Trassenphilosophie". Darunter wird die grundsätzliche Art der Gradientenführung verstanden, beim EMS-System also, wegen der oben bereits genannten Vorteile, die bevorzugte Lage der Trasse in Lichtraumhöhe über dem



Gelände, um so auch die landwirtschaftliche Nutzung des Geländes zu gewährleisten. Die günstigste Lage der Gradiente im Stadium der Untersuchung vieler Einzelvarianten wird zweckmäßigerweise durch manuelle Festlegung der Tangentschnittpunkte und Betrachtung des Investitionskostenergebnisses gefunden.

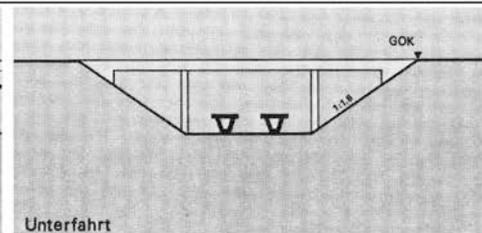
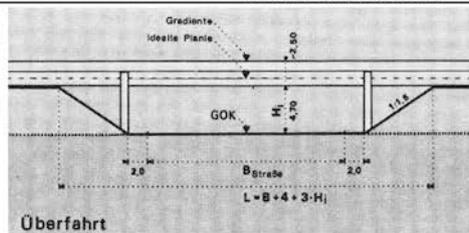
### Ermittlung der Investitionskosten

Die Vielzahl der zu untersuchenden Varianten macht die Berechnung der Investitionskosten über EDV notwendig. Grundlage sind die Daten des Geländelängsschnitts überlagert mit der Gradiente. Unter Berücksichtigung der Kostenparameter für die verschiedenen Fahrwegformen (z.B. Dfkm Aufständering bei einer Gradientenhöhe X) und ihrer Anwendungsgrenzen in Abhängigkeit vom Abstand der Gradiente zu dem vorhandenen Gelände wird die Angabe von Gesamtinvestitionskosten möglich. Die Genauigkeit der Trassenkosten hängt lediglich von dem programmtechnischen Aufwand, den man auf sich zu nehmen

gewillt ist, ab und sollte dem Tiefgang der jeweiligen Untersuchungsphase entsprechen. Beim Vergleich weiterer untersuchenswerter Varianten kann deshalb z.B. die Geländequerneigung sicher vernachlässigt werden.

VARIANTE W 24		VORUNTERSUCHUNG	
AUSBAUGESCHWINDIGKEIT 400 KM/H		VARIANTE W 24	
ZUSAMMENSTELLUNG DER ÜBERSCHLÄGIGEN BBAUKOSTEN			
1. AUFSTÄNDERUNG	800 M	3.820.859 DM	
2.5 = H = 2,2 M	2300 M	13.706.750 DM	
5,5 = H = 50 M	7201 M	62.537.425 DM	
0	0 M	0 DM	
2. EINSCHNITTE AUF EINE LÄNGE VON 3000 M		12.083.387 DM	
FÄHRWEG	975.050 M²	19.201.004 DM	
3. GRÜNDERWERB	295.770 M²	5.915.408 DM	
4. FLÄCHE SÜNDERBAUWERKE	0 M	0 DM	
5. TUNNEL	0 M	0 DM	
ZWISCHENSUMME		118.464.342 DM	

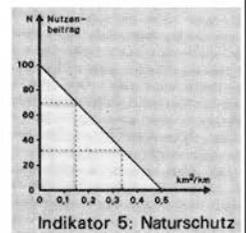
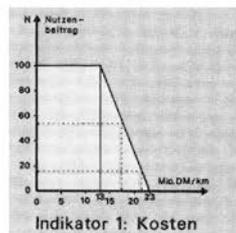
### Kreuzungen mit dem vorhandenen Verkehrswegenetz



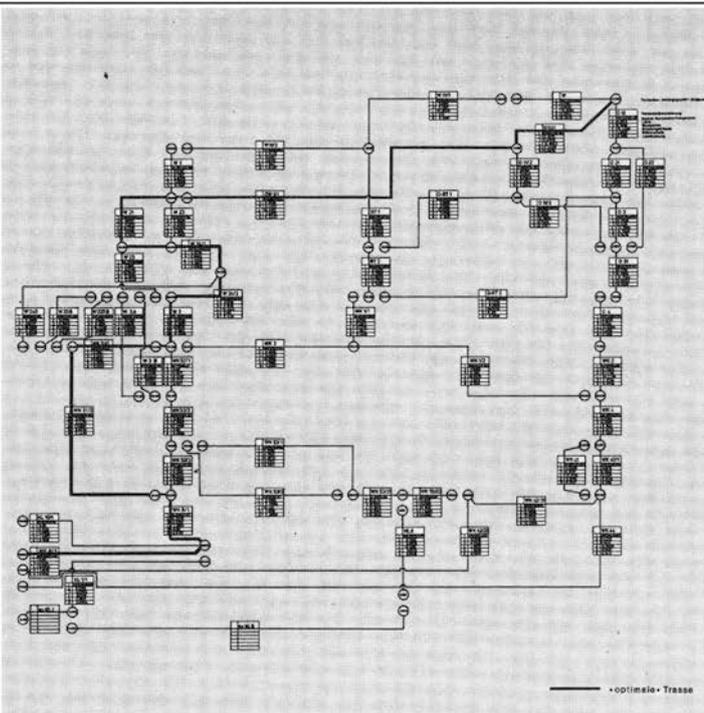
### Trassenbewertung und Trassenauswahl

$$U(x_{ij}) = (1,3LL \cdot x_{i,max} - x_{ij}) \cdot \frac{100}{1,3LL \cdot x_{i,max} - LL \cdot x_{i,min}}$$

$U(x_{ij})$  Nutzenbeitrag  
 $LL$  Luftlinie zwischen den Bewertungsanfangs- und -endpunkten  
 $x_{i,max}$  größter Zielbeitrag innerhalb des Kriteriums i (Indikatoren 1-6)  
 $x_{i,min}$  kleinster Zielbeitrag  
 $x_{ij}$  Zielbeitrag der Variantenkombination



Die praktischen Erfahrungen bei der Neutrassierung von Landverkehrswegen haben gezeigt, daß dem umweltverändernden Einfluß einer Trasse größte Bedeutung beigegeben werden muß. Es gilt daher für die Trassenauswahl ein Verfahren heranzuziehen, durch welches unter der Vielzahl technisch möglicher Varianten diejenige mit der geringstmöglichen Umweltbelastung - unter gebührender Berücksichtigung der Kosten - gefunden wird. Eine Möglichkeit zeigt das durch die nebenstehenden Bilder veranschaulichte Bewertungsverfahren: Es werden Indikatoren definiert, welche z.B. den Flächenverzehr, die Lärmbelastung, den Einfluß auf die Erholungsnutzung des umliegenden Geländes beschreiben. Über eine Werttransformation werden die Indikatorflächen in sog. Nutzenpunkte umgewandelt. Die Rangfolge weiterer untersuchenswerter Trassen wird so durch die Summe der Nutzenpunkte bestimmt. Die Ermittlungsergebnisse lassen sich auch vergleichende Untersuchungen in den Einzelindikatoren zu, um so die letztliche Trassenfestlegung nicht allein von schemhaft ermittelten "Punkten" abhängig zu machen.



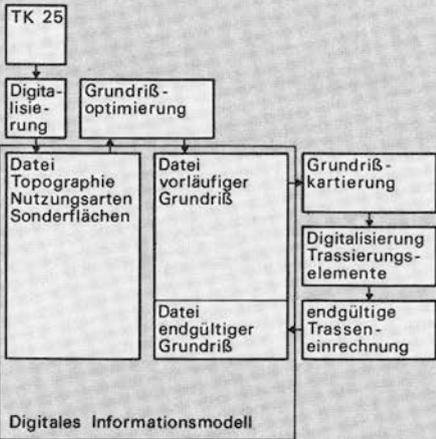
### GEWICHTUNGSART 7

WEG NR. 1 BESTEHEND AUS DEN ZWEIGEN:							
0000221	0000204	0000209	0000211	0000212	0000214	0000217	
KOSTEN	LAERM	DEKON.	ERHOL.	NATUR	LANDN.	SUMME	RANG
1995,09	0,98	0,99	63,85	16,88	0,99		
10,36	8,94	10,93	18,56	8,18	3,64	060,6	2
WEG NR. 2 BESTEHEND AUS DEN ZWEIGEN:							
0000221	0000204	0000207	0000211	0000213	0000223	0000217	
KOSTEN	LAERM	DEKON.	ERHOL.	NATUR	LANDN.	SUMME	RANG
1402,84	1,04	8,02	71,23	21,16	1,05		
17,64	8,55	9,35	16,18	6,70	3,31	062,3	1



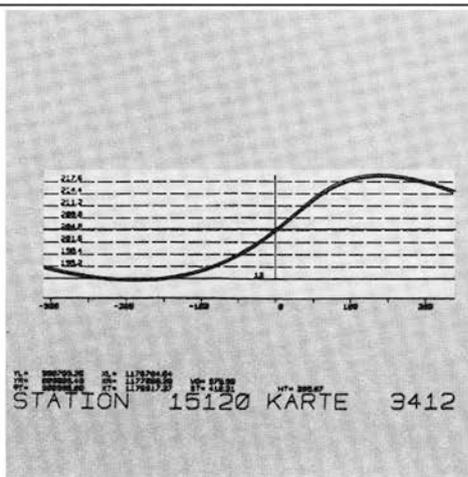
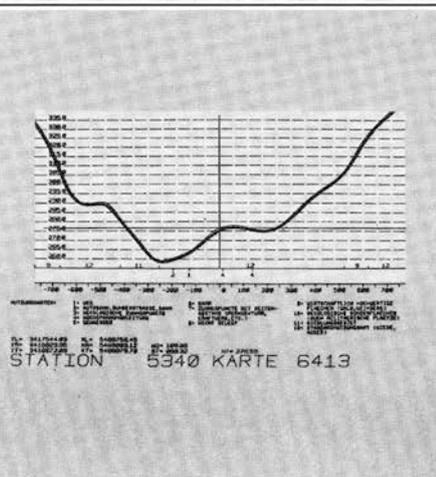
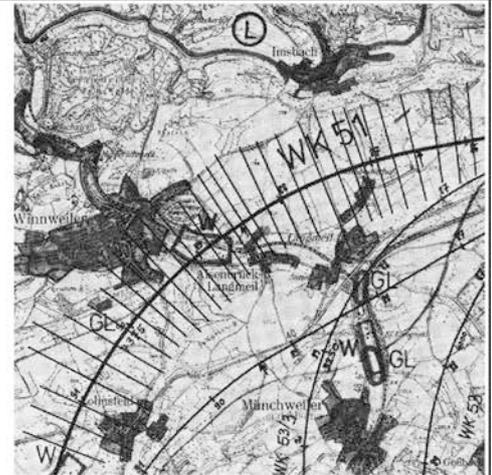
GeoMeDa

Trassenvorentwurf  
Digitales Informationsmodell  
Grundrißbearbeitung



### Analoge Information

Träger der gesamten digitalen Information ist die Topographische Karte 1:25 000, deren Inhalt um alle planungsrelevanten Daten ergänzt worden ist, die zur Vorbereitung der Planung in dem betroffenen Gebiet erhoben wurden. Insbesondere wurden alle Flächen kenntlich gemacht, die wegen einer besonderen vorhandenen oder geplanten Nutzung als nicht verfügbar betrachtet werden müssen, und alle Flächen, die aus Gründen der Besiedlung, des Natur- und Landschaftsschutzes sowie als Erholungsgebiete schützenswert sind. Ferner enthält die TK 25 das aus der Vorplanung hervorgegangene Variantenetz. Im ersten Arbeitsschritt des Vorentwurfs wird entlang der zur Weiterbearbeitung ausgewählten Variante der Interessenstreifen festgelegt. Zur Vorbereitung seiner Digitalisierung erfolgt schließlich der Eintrag der Profile, aus denen das digitale Informationsmodell aufgebaut wird.

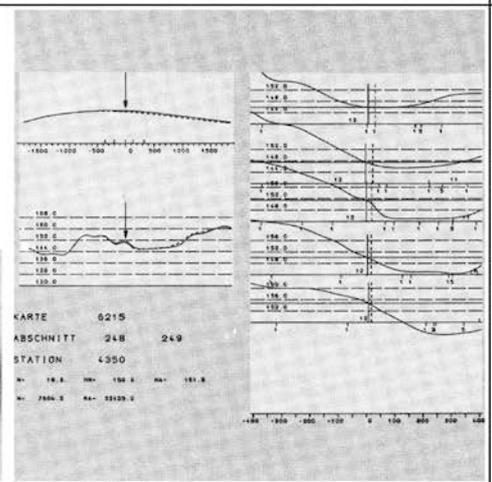


### Digitalisierung

Alle geländebezogenen Daten werden in Querprofilen digitalisiert: Anfangs- und Endpunkte der Querprofile; vorläufige Lage der Trasse im Querprofil; Geländepunkte (Schnitt Höhenlinie/Querprofil); Nutzungsänderung sowie punktförmige Informationen wie Hochspannungsleitung, Verkehrsweg, Gewässer.

### Grundriß-optimierung

Der digitalisierte Inhalt der TK 25 wird abschnittsweise am Bildschirm sichtbar gemacht. Gewählt wurde eine Darstellung, die auf der linken Seite ein drei Kilometer langes Trassenstück in Grundriß und Längsschnitt zeigt. Daneben werden fünf in die Zeichenebene geklappte Querprofile, die in der Mitte des Trassenabschnitts liegen, gelegentlich dargestellt. Am Bildschirm kann nun punktweise oder mit Hilfsprogrammen in wählbaren Bereichen die Achse verschoben werden. Die Ergebnisse dieser Manipulation werden sofort am Bildschirm sichtbar gemacht, um ihre Auswirkungen beurteilen zu können. Ziel dieses interaktiven Arbeitsschrittes ist es, die optimale Lage des Achsgrundrisses zu finden.



ACHSE NO. 7									
STATION	R	LUE	UE	PHJ-T	YH	EH	PUNKTNUMMER		
STAT-DIFF	T1	T2	F	0-PHI	YT	XT			
	S	S		PHI-S	YH	XT			
20090.771	4000.000	0.000		162.8341	906046.622	1184611.331			
1141.662	574.738	574.738		18.1701	905517.076	1184294.726			
		1127.791		271.9191	903841.825	1187949.025			
20128.432	4000.000	381.400	SINUS	281.0042	909017.736	1184125.776			
381.400	145.325	236.021	0.745	4.2352	904876.640	1184082.995			
		581.324		283.6427	903841.825	1187949.025			
202509.832	0.000	381.400	SINUS	285.2694	904648.928	1184028.873			
381.400	236.022	145.343	0.878	-4.8745	904419.197	1183974.746			
		381.301		283.4103	904000.000	1184000.000			

### Trassierungselemente

Wenn der optimale Verlauf der Trassenachse gefunden ist, muß eine Folge von zulässigen Trassierungselementen bestimmt werden, die sich möglichst gut der optimalen Linie anschmiegen. Die Parameter der Elemente (Geraden, Kreise, Sinusoiden) werden näherungsweise dem Ergebnisplot der Grundrißoptimierung entnommen und in einem Einrechnungsprogramm, das für einen stetigen Übergang zwischen den Elementen sorgt, mathematisch festgelegt. Die endgültigen Parameter des Achsgrundrisses werden anschließend in das digitale Informationsmodell übernommen.

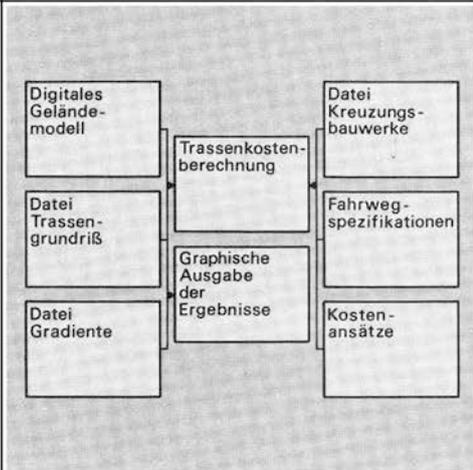






GeoMeDa

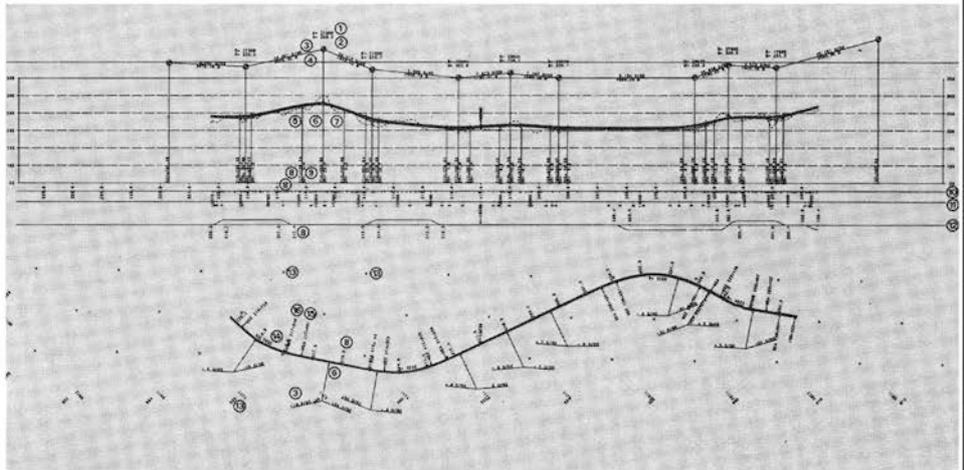
Trassenentwurf  
Enddarstellung im Plot  
Investitionskostenberechnung



- ① Kuppen- bzw. Wannenhöhe
- ② Kuppen- bzw. Wannenhöhe
- ③ Gradientenanstieg
- ④ Tangentienlänge
- ⑤ Ausrundungsanfang
- ⑥ Ausrundungsmitte
- ⑦ Ausrundungsende
- ⑧ Station
- ⑨ Höhendifferenz Gelände/Trasse
- ⑩ Querprofileband
- ⑪ Nutzungsartenband
- ⑫ Krümmungsband
- ⑬ Landeskoordinatensystem
- ⑭ Radius
- ⑮ Übergangsbogenanfang
- ⑯ Übergangsbogenende

### Plot der endgültigen Trassenachse

Die in der Endbegutachtung festgelegte Trassenachse wird mit allen ihren geometrischen Parametern in Grundriß und Längsprofil dargestellt. Die Pfeile etwa in der Mitte des Plots geben die genaue Zuordnung der beiden Darstellungen an. Die Legende zur Erläuterung der Vielfalt von Informationen ist auf der linken Seite dieser Tafel angegeben. Dieser Plot kann in beliebigem Maßstab, mit frei wählbarer Überhöhung sowohl in Tusche auf Folie als auch mit Kugelschreiber auf einfachem Papier erzeugt werden.



### Enddarstellung in der TK 25

Das graphische Endergebnis des Entwurfs ist eine Zusammenkopie des oben gezeigten Plots mit der TK 25. Diese Darstellung ermöglicht die direkte Zuordnung von Karteninhalt und geplantem Verkehrsweg. Sie wird noch ergänzt durch die Darstellung der Auswirkungen der geplanten Trasse auf die Umwelt. Dies geschieht durch die farbliche Hervorhebung der Nutzungsarten im Einflußbereich der Trasse und durch die Ergebnisse der Lärmemissionsuntersuchungen, die als Linien gleicher Schallbelastung (Isophonen) eingetragen sind (siehe hierzu die folgende Schautafel).

### Investitionskostenberechnung

Für jede Gradiente (graphischer Entwurf, kostenoptimiert, endgültige Festlegung) kann eine genaue Kostenberechnung durchgeführt werden. Diese greift auf die ursprünglich digitalisierten Querprofile zurück und berechnet an diesen Stellen die Höhe der Gradiente. Ferner werden die Regelprofile, die Kreuzungen mit vorhandenen Verkehrswegen und Sonderbauwerke wie Brücken, Tunnel und Bahnhöfe benötigt. In die Berechnungen fließen neben den Baukosten für Regel- und Sonderbauwerke auch die Grunderwerbskosten und die Kosten für Erdmassenbewegungen ein. Es wird außerdem eine Massenbilanz aufgestellt.

K1: 1...AUFSTÄNDERUNG 2...EINSCHNITT/ANSCHNITT 3...STUETZMAUER  
 4...DAMP 5...TUNNEL 6...BRÜCKEN ZWISCHENPUNKT 7...BRÜCKENANFANG 8...BRÜCKENENDE  
 K2: 1...TUNNELANFANG 2...TUNNELLENDE 3...BRÜCKENANFANG 4...BRÜCKENENDE  
 KREUZ. MIT STRASSEN SKL: 1...BAR 2...R=13,6 3...R=11,5 4...R=9,3 5...R=6,0 6...R=4,0 7...R=3,0 8...R=2,0  
 KREUZ. MIT EISENBAHN SKL: 10

TRASSENSCHNITT: VON STATION..... 209+660 BIS STATION..... 213+696 7 SEITE: 2

OP	STAT	OP	HOEHE	STW	R	K1	K2	D	SKL	OKO	STEO	SSKO
		(M)	(M)	(GRD)	(M)			(M)		(DM)	(MIO DM)	(MIO DM)
15000	209+668	49	-12,2	3,7	10000	2	0	0	0	6678	8,030	0,600
15010	209+905	317	-11,6	3,4	10000	2	0	0	0	7726	2,281	2,281
15020	210+75	90	-7,7	4,4	10000	2	0	50	5	4976	0,899	3,180
15030	210+165	107	-2,2	10000	2	0	0	0	0	2037	0,376	3,556
15040	210+253	70	1,9	3,8	10000	4	0	0	0	1897	0,106	3,662

### Fahrwegkosten- und Fahrwegartenbilanz

TRASSENSCHNITT: VON STATION..... 209+660 BIS STATION..... 213+696 7 SEITE: 1

GESAMTSCHNITTSKOSTEN: 22.466 MIO DM GESAMTLÄNGE: 4,028 KM

ZUSAMMENSTELLUNG DER KOSTEN (IN MIO DM):

FACHGEB.	I	BAUWERK	ERDBAU	GRUNDERWERB	DBERBAU	I	SUMME	ANTEIL
AUFSTÄNDERUNG	I	0,000	*	0,000	0,000	I	0,000	0,0
BRÜCKEN (R/S)	I	2,788	*	0,000	0,072	I	2,860	12,7
DAMP	I	*	2,759	0,977	1,311	I	5,047	22,5
EINSCHNITT	I	*	8,410	1,730	1,159	I	11,299	50,4
KREUZUNGSBAUWERKE	I	2,559	*	*	*	I	2,559	11,4
STUETZMAUER	I	0,000	0,000	0,000	0,000	I	0,000	0,0
TUNNEL	I	0,000	*	*	0,000	I	0,000	0,0
SUMME	I	3,347	11,169	2,707	3,242	I	22,466	100,0
ANTEIL	I	14,9	49,7	12,1	14,4	I	100,0	0,0

ZUSAMMENSTELLUNG DER LÄNGENANTEILE (IN KM):

FACHGEB.	I	(KM)	ANTEIL	ANZAHL
AUFSTÄNDERUNG	I	0,000	0,0	0
BRÜCKEN (R/S)	I	3,090	2,2	3
DAMP	I	1,629	40,4	1
EINSCHNITT	I	2,310	57,3	1
KREUZUNGSBAUWERKE	I	*	*	7
STUETZMAUER	I	0,000	0,0	0
TUNNEL	I	0,000	0,0	0
SUMME	I	4,028	100,0	10







## AUTORENVERZEICHNIS

- Prof. Dr.-Ing. Günther Böge      Institut für Mathematik und Datenverarbeitung, Hochschule der Bundeswehr München  
Tel. (089) 6004-3404
- Prof. Dr.-Ing. Wilhelm Caspary      Institut für Geodäsie  
Hochschule der Bundeswehr München  
Tel. (089) 6004-3424
- Dipl.-Ing. Reinhard Fischer      Bereichsleiter Verkehrswegeplanung im  
Ingenieurbüro Karner  
Steinsdorfstr. 13, 8000 München 22  
Tel. (089) 22 68 26
- Dipl.-Ing. Peter Foros      Institut für Mathematik und Datenverarbeitung, Hochschule der Bundeswehr München  
Tel. (089) 6004-3407
- Dr.-Ing. Hansbert Heister      Institut für Geodäsie  
Hochschule der Bundeswehr München  
Tel. (089) 6004-3433
- Ing.grad. Gert Karner      Steinsdorfstr. 13, 8000 München 22  
Tel. (089) 22 68 26
- Dr. Pol. Wiss.  
Silvia Kneißl Rabossi      Univ. Catt. Mailand, lic.rer.reg./Univ.  
Karlsruhe, Dozentin für Regional- und  
Landesplanung an der Universität Trient  
Kunigundenstr. 63, 8000 München 40  
Tel. (089) 29 88 16
- Dipl.-Ing. Architekt  
Mac Kneißl      Regierungsbaumeister, lic.rer.reg./  
Univ. Karlsruhe  
Planungsbüro  
Thierschstr. 34, 8000 München 22  
Tel. (089) 29 88 16
- Heinz Kurz      Bundesbahnzentralamt München  
Arnulfstr. 19, 8000 München 2  
Tel. (089) 128 52 75
- Dipl.-Ing. Peter Mölzer      Krauss-Maffei AG, Abt. Anwendungstechnik  
Krauss-Maffei-Str. 2, 8000 München 50

Dipl.-Ing. Peter Schwintzer

Institut für Geodäsie  
Hochschule der Bundeswehr München  
Tel. (089) 6004-3436

Dipl.-Ing. Robert Stöckl

Lindenstr. 8  
8011 Oberpframmern

Prof. Dr.-Ing. Walter Welsch

Institut für Geodäsie  
Hochschule der Bundeswehr München  
Tel. (089) 6004-3426

Dipl.-Ing., Dr.rer.nat.  
Rudolf Zurek

Krauss-Maffei AG, Abt. Anwendungstechnik  
Krauss-Maffei-Str. 2, 8000 München 50





Schriftenreihe

Wissenschaftlicher Studiengang Vermessungswesen  
Hochschule der Bundeswehr München

---

Bisher erschienene Hefte:

(Die Hefte erscheinen in zwangloser Folge)

- Nr. 1/78      A. Schödlbauer :  
Curriculum für den wissenschaftlichen Studiengang Vermessungswesen der Hochschule der Bundeswehr München
- Nr. 2/78      A. Chrzanowski and E. Dorrer :  
Proceedings "Standards and Specifications for Integrated Surveying and Mapping Systems", Workshop held in Munich, 1-2 June 1977
- Nr. 3/78      W. Caspary und A. Geiger :  
Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit elektronischer Neigungsmesser
- Nr. 4/79      E. Baumann, W. Caspary, H. Dupraz / W. Niemeier /  
H. Pelzer, E. Kuntz / G. Schmitt, W. Welsch :  
Seminar über Deformationsanalysen
- Nr. 5/81      K. Torlegård :  
Accuracy Improvement in Close Range Photogrammetry
- Nr. 6/82      W. Caspary und W. Welsch :  
Beiträge zur großräumigen Neutrassierung

---

Bezugsnachweis:      Studiengang Vermessungswesen  
                                 im Fachbereich Bauingenieur- und Vermessungswesen  
                                 Hochschule der Bundeswehr München  
                                 Werner-Heisenberg-Weg 39  
                                 8014 Neubiberg





