Zeitschrift: Technische Mitteilungen / Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafenbetriebe = Bulletin technique / Entreprise des postes, téléphones et télégraphes suisses = Bollettino tecnico / Azienda delle poste, dei telefoni e dei telegrafi svizzeri

Herausgeber: Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafenbetriebe

Band: 55 (1977)

Heft: 10

Artikel: Funkversorgung in Strassentunnels

Autor: Grüssi, Otto / König, Peter

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-874151

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 07.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Funkversorgung in Strassentunnels

Otto GRÜSSI und Peter KÖNIG, Bern

621.315.212.1.029.6:621.396.677.75:621.396.931:625.712.35

Zusammenfassung. *Es wird über eine Untersuchung berichtet, mit dem Ziel, sämtliche zur Funkversorgung von Strassentunnels erforderlichen Planungsunterlagen zu ermitteln und ein möglichst günstiges Strahlungskabel zu finden. Abschliessend werden an einem Beispiel die besonderen Probleme der Tunnelversorgung mit Breitbandverstärkern aufgezeigt.*

Radiocommunications dans les tunnels routiers

Résumé. *Il est question d'une étude visant à déterminer tous les documents nécessaires à la planification d'un service de radiocommunications pour tunnels routiers et à la construction d'un câble rayonnant aux caractéristiques favorables. Un exemple illustre les problèmes que soulève le service radio dans les tunnels au moyen d'amplificateurs à large bande.*

Copertura radiotelefonica nelle gallerie stradali

Riassunto. *Nel presente articolo, l'autore fa una relazione dei risultati ottenuti da un esame effettuato con lo scopo di determinare tutti gli atti di progettazione necessari per assicurare la copertura radiotelefonica nelle gallerie stradali e di trovare il tipo di cavo più adatto per l'irradiazione. Per terminare, vengono elencati, in base a un esempio, i problemi particolari della copertura radiotelefonica nelle gallerie, mediante amplificatori a larga banda.*

1 Einleitung

Das schweizerische Nationalstrassennetz wird im Endausbau nahezu 200 Tunnelröhren mit einer Gesamtlänge von über 200 km aufweisen; dies entspricht einem Anteil von etwa 10 Prozent.

In der *Figur 1* sind die Anzahl und die Längen der Nationalstrassentunnels graphisch dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass etwa 50 Tunnelröhren länger als 1 km sind, während rund 100 zwischen 0,2 und 1 km liegen. Die übrigen, noch kürzeren Tunnels werden bei Fahrgeschwindigkeiten von 80 km/h in weniger als 10 Sekunden durchfahren und sind deshalb von untergeordneter Bedeutung.

Ohne spezielle Vorkehrungen ist der Einsatz von mobilen Funkgeräten in Tunnels nicht möglich, da die Radiosignale durch die Tunnelwände derart gedämpft werden, dass die Funkverbindung im allgemeinen bereits kurz nach der Einfahrt abreisst.

Bis heute sind in Bahn- und Strassentunnels sowie Bergbaustollen schon verschiedene Systeme ausprobiert und zum Teil auch angewendet worden. Am erfolgreichsten erwiesen sich bis heute jene, die zum Abstrahlen oder Empfangen der HF-Signale strahlende Koaxialkabel verwenden. Üblicherweise werden diese von normalen Mobilfunksendern gespeist. Lange Tunnels müssen dabei in mehrere Funkabschnitte unterteilt werden. Diese Lösung ist verhältnismässig kostspielig, namentlich wenn mehrere Signale in unterschiedlichen Frequenzbändern gleichzeitig übertragen werden sollen. Zudem stellt dies schwierige Intermodulationsprobleme.

In der Literatur wird in letzter Zeit vermehrt über strahlende Kabel und ihre Anwendung berichtet. Leider können daraus keine sicher fundierten Planungsunterlagen gewonnen werden.

Zufälligerweise war die Firma *Huber + Suhner AG* in Herisau an der Entwicklung von strahlenden Kabeln interessiert. In der Folge konnte eine Arbeitsteilung getroffen werden, indem die Kabelfirma die erforderlichen Musterkabel herstellte und die PTT-Betriebe die Messungen durchführten.

Wegen der enormen Komplexität des Problems und des damit verbundenen Aufwandes konnten die Untersuchungen nur rein empirisch durchgeführt werden.

Die gemeinsamen Anstrengungen führten schliesslich zu einem Kabeltyp, der heute fabrikmässig hergestellt wird.

Aufgrund der gewonnen Erkenntnisse und der Kabelspezifikationen wurde sodann ein neues preisgünstiges Tunnel-Funkversorgungskonzept ausgearbeitet, das mit kleinen Sendeleistungen und billigen Breitbandverstärkern auskommt. Dieses Prinzip wurde in der 1,1 km langen Nordröhre des Baregg-Autobahntunnels bei Baden AG erprobt, wo ein Strahlungskabel verlegt und mit vier unterschiedlichen Funkdiensten (Autoruf, UKW-Rundfunk, Autotelefon im 80- und 160-MHz-Band) belegt wurde. Die Resultate entsprachen den Erwartungen und erfüllten die gestellten Forderungen.

2 Massgebende Kenngrössen von Strahlungskabeln

Die massgebenden Kenngrössen für die Beurteilung eines Strahlungskabels sind Kabel- und Koppeldämpfung. Beide werden durch die Wandmontage im Tunnel beeinflusst. Nicht ohne Einwirkung auf die Koppeldämpfung sind auch die vom Tunnelgewölbe verursachten Reflexionen. Wie den *Figuren 2* und *3* entnommen werden kann, verursachen diese ein stark schwankendes Empfangssignal, dessen Amplitude annähernd nach *Rayleigh* verteilt ist. Die von den Herstellern strahlender Kabel gemachten Angaben bezüglich der Kabel- und Koppeldämpfung sind

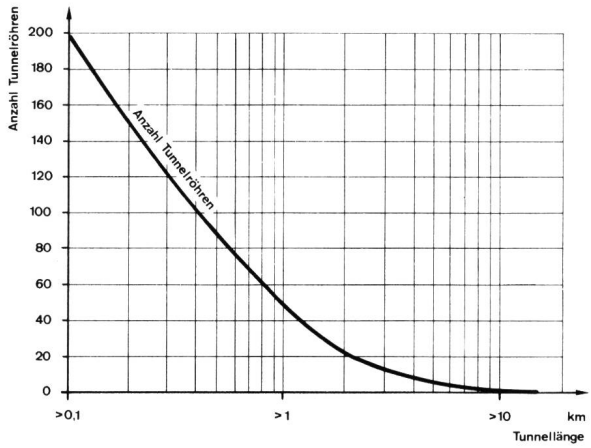

Fig. 1
Anzahl und Längen der Tunnels des schweizerischen Nationalstrassennetzes

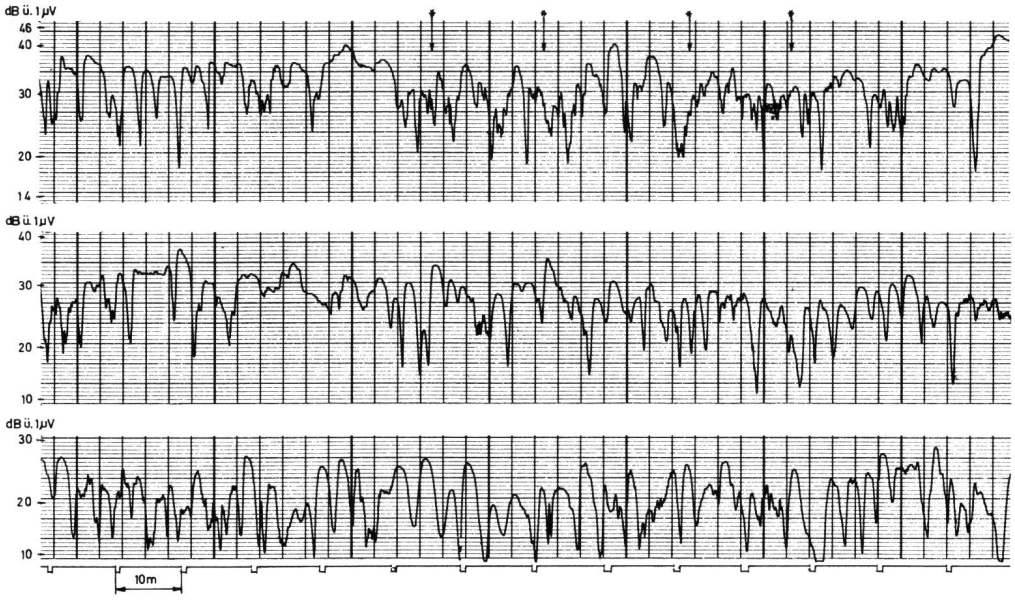

Fig. 2
Drei typische Ausschnitte der Feldstärkeschwankungen im Baregg-Nordtunnel
Messfrequenz: 85 MHz; Fahrgeschwindigkeit: Schrittempo; Schreiberzeitkonstante: 0,25 s. Die schnellen rhythmischen Schwankungen an den mit einem * bezeichneten Stellen wurden von überholenden Autos verursacht

sehr uneinheitlich und beziehen sich meistens auf eine Verlegung im freien Gelände. Da unsere Untersuchungen in erster Linie der Versorgung von Strassentunnels gelten, erfolgten die Messungen realistischerweise ebenfalls unter möglichst betriebsgerechten Bedingungen in einem Tunnel.

Die Koppeldämpfung ist das Mass für den Übertragungsverlust zwischen dem am Kabel eingespeisten Sendepegel und dem an der $\lambda/4$-Stabantenne der Mobilstation gemessenen mittleren Empfangspegel, abzüglich der jeweiligen Kabeldämpfung *(Fig. 4)*.

Mit Hilfe der Systemdämpfung (die die maximal zulässigen Dämpfungsverluste zwischen Sender und Empfänger der Funkstrecke angibt) sowie der Kabel- und Koppeldämpfung lässt sich die maximale Tunnelversorgungslänge bestimmen.

$$l_{max} = \frac{s - \beta}{\alpha} \text{ [km]}$$

l Kabellänge in km
α Kabeldämpfung in dB/km
β Koppeldämpfung in dB
s Systemdämpfung in dB

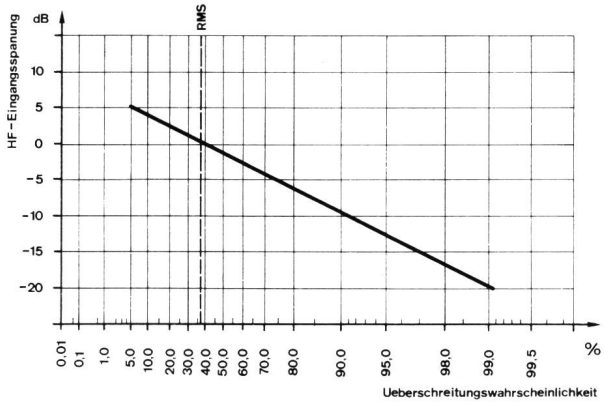

Fig. 3
Rayleigh-Verteilung der Feldstärke und der Koppeldämpfung

Um maximale Versorgungsreichweiten zu erzielen, muss also bei der Kabelentwicklung und -montage darauf geachtet werden, dass sowohl die Kabel- als auch die Koppeldämpfung möglichst klein bleibt.

3 Untersuchung verschiedener Kabeltypen

Das koaxiale Strahlungskabel unterscheidet sich im wesentlichen vom gewöhnlichen Koaxialkabel nur durch die besondere Beschaffenheit seines Aussenleiters. Dieser besteht normalerweise aus einem gelochten oder einem in der Kabellängsachse geschlitzten Kupfermantel.

Da in den Autobahntunnels das Kabel nur direkt auf die Wand montiert werden darf, konzentrierte man die Untersuchungen auf diese Befestigungsart, indem man abzuklären versuchte, welche Kabelöffnungsform damit die grösste Versorgungsreichweite ergibt.

Zu diesem Zweck wurden die in der *Figur 5* dargestellten Kabeltypen untersucht. Von jedem wurden 3 Musterkabel zu je 100 m Länge mit unterschiedlichen Bedeckungsgraden angefertigt.

Die Messungen konnten in einem kurzen PTT-eigenen Tunnel durchgeführt werden. Das zu prüfende Kabel wurde dabei in 1,5 m Höhe an der Tunnelwand befestigt. Anschliessend folgte die Bestimmung der Kabel- und Koppeldämpfung, wobei die Kabelöffnungen einmal zur Wand und dann im Winkel von 180° von dieser weg gerichtet wurden.

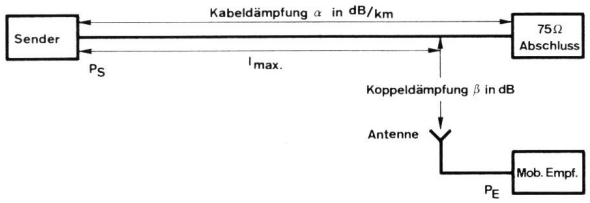

Fig. 4
Messanordnung zum Bestimmen der Koppeldämpfung

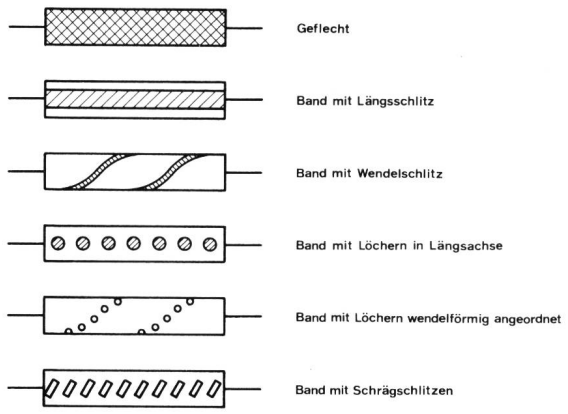

Fig. 5
Untersuchte Kabeltypen

Die Versuche ergaben, dass der Kabeltyp mit Wendelschlitz eine extrem grosse Längsdämpfung, jener mit Geflecht eine vergleichsweise hohe Koppeldämpfung aufweist und deshalb unbrauchbar oder ungeeignet ist. Auch der Typ mit wendelförmig angeordneten Löchern wurde ausgeschieden, da er bei wesentlich höheren Herstellungskosten keine besseren Messwerte erbrachte. Nachdem an den restlichen 3 Typen noch der Einfluss des Wandabstandes untersucht worden war, konnte festgestellt werden, dass sowohl der Bedeckungsgrad als auch die Kabellage und der Wandabstand die realisierbare Versorgungsdistanz beeinflussen. Bei der direkten Wandmontage verursacht die Erhöhung des Bedeckungsgrades eine mehr oder weniger starke Reduktion der Kabeldämpfung, die Koppeldämpfung dagegen nimmt zu.

Im Bestreben, die Versorgungsreichweiten bei gleichen äusseren Abmessungen zu verbessern, wurden beim Schlitzkabel und jenem mit Löchern in der Längsachse die Polyäthylen-Vollisolation durch eine Polyäthylen-Schäumung ersetzt. Bei dieser Gelegenheit wurde auch die Kabelimpedanz von 50-Ω auf 75 Ω erhöht, wodurch sich die Kabelkosten und das Gewicht beträchtlich senken lassen. Diese beiden Massnahmen brachten bei direkter Wandmontage gegenüber der 50 Ω-Vollisolation eine Vergrösserung der Versorgungsreichweite um 10 bis 20 Prozent. Beide Typen ergeben bei optimaler Wahl des Bedeckungsgrades sowie direkter Wandmontage ungefähr gleich gute Übertragungseigenschaften und weisen auch eine ähnlich kleine Lageempfindlichkeit auf.

Am Kabeltyp mit Löchern wurden sodann noch die Benetzungsempfindlichkeit durch Wasser und das Verhalten bei Verschmutzung mit verschiedenartigen Materialien, die sich, wie der *Tabelle I* entnommen werden kann, durch ihre elektrischen und elektromagnetischen Eigenschaften unterscheiden, geprüft.

Tabelle I. Die Verschmutzungsmaterialien des Kabelmantels

Material	Elektrisches Verhalten
Titandioxidpulver	Guter Isolator, DK ≈ 100
Aluminiumpulver	Guter Leiter, keine magnetischen Eigenschaften
Eisenpulver	Relativ guter Leiter mit magnetischen Eigenschaften

Diese Untersuchungen ergaben, dass sowohl die Benetzung wie die Verschmutzung praktisch keinen Einfluss auf die Übertragungseigenschaften haben.

Abschliessend wurde am gleichen Kabel noch die Frequenzabhängigkeit der Kabel- und Koppeldämpfung im Bereich 1...460 MHz gemessen. Die Gewinne und Umrechnungsfaktoren der dabei verwendeten Empfangsantennen sind in *Tabelle II* zusammengestellt.

Aus *Figur 6* geht hervor, dass bei Frequenzen unter etwa 30 MHz die Kabeldämpfung verhältnismässig klein ist und flach verläuft, die Koppeldämpfung jedoch gross ist und zunimmt. Nach hohen Frequenzen hin sinkt die Koppeldämpfung nur geringfügig ab, die Kabeldämpfung aber wird immer grösser und massgebender.

Aufgrund der Untersuchungsergebnisse wurde schliesslich der geschäumte Kabeltyp mit Löchern in der Längsachse für die serienmässige Herstellung gewählt. Bei richtiger Dimensionierung weist dieses Kabel optimale Übertragungseigenschaften auf, die praktisch unabhängig sind von der Montagedistanz und der Lage der Löcher in bezug auf die Befestigungswand. Diese Eigenschaften werden auch durch Benetzen und Verschmutzen des Kabels nicht beeinflusst.

Die elektrischen Kennwerte dieses unter der Bezeichnung *S 17873-2* fabrizierten Kabels können der Figur 6 entnommen werden. Der gleiche Kabeltyp ist in verschiedenen Dimensionen lieferbar, wobei die Kabeldämpfung ungefähr umgekehrt proportional ändert, während die Koppeldämpfung ziemlich konstant bleibt.

4 Erforderliche Nutzsignalstärken und Störabstände

Die bisherigen Untersuchungen an strahlenden Koaxialkabeln haben gezeigt, dass das HF-Feld hauptsächlich in-

Tabelle II. Die bei der Mobilstation eingesetzten Antennen

Frequenzband in MHz	Antennentyp	Montageort der Empfangsantenne	*Faktor K = Feldstärke / Eingangsspannung	Gewinn gegenüber λ/2-Dipol
1	Teleskopantenne Hirschmann Auta 300 N	Vorne rechts, an Stelle des Aussenspiegels	11 m^{-1}	
30	Verkürzte Haftantenne	Mitte Wagendach	1 m^{-1}	
80	λ/4-Haftantenne	Mitte Wagendach	2 m^{-1}	0 dB
160	λ/4-Haftantenne	Mitte Wagendach	5,4 m^{-1}	–2,5 dB
460	5/8λ-Haftantenne	Mitte Wagendach	14,5 m^{-1}	–2 dB

* Diese Faktoren wurden im freien Gelände mit Hilfe von geeichten Feldstärkemessgeräten bestimmt und beziehen sich auf ein Empfangssignal, das aus 8 um jeweils 45° gedrehten Autopositionen gemittelt wurde

Tabelle III. Im Tunnel erforderliche Nutzsignalstärken und Störabstände

Funkdienst		Erforderliche Nutzpegel in dB (μV)			Erforderlicher Störabstand in dB	
		Nutzsignal allein	Nutzsignal und Raumgeräusch	Nutzsignal und Raumgeräusch und Impulsstörungen	Nutzsignal und unmoduliertes statisches Gleichkanalstörsignal (HF-Frequenzversatz: 300...1000 Hz)	Nutzsignal und unmoduliertes schwankendes Gleichkanalstörsignal (HF-Frequenzversatz: 300...1000 Hz)
Sprechfunk 160 MHz (Mikrotel)	Qualität 3	2	4	11	23	20
	Qualität 4	18	18	25	36	36
UKW-Rundfunk (Lautsprecher)	Qualität 3	5	9	10		
	Qualität 4	19	21	26		
Autoruf Rufsicherheit 99 %		–4				

Raumgeräusch = Bandbegrenztes Rauschen 90...360 Hz; Lautstärke 75 dB (A)

Impulsstörsignal
- Sprechfunk: Pegel 51 dB (μV/MHz) an 50 Ω, Folgefrequenz: 100 Hz
- UKW-Rundfunk: Pegel 55 dB (μV/MHz) an 50 Ω, Folgefrequenz: 100 Hz

Statische Empfängerempfindlichkeiten
- Sprechfunk: 0,5 μV an 50 Ω für 20 dB Geräuschabstand über Telefonfilter (Hub 3 kHz, f_{mod} 1000 Hz)
- UKW-Rundfunk: 1 μV an 50 Ω für 20 dB Geräuschabstand über Musikfilter (Hub 22,5 kHz, f_{mod} 1000 Hz)
- Autoruf: 0,3 μV für 90%ige Rufsicherheit

folge von Reflexionen an den Tunnelwänden starken örtlichen Schwankungen unterworfen ist. Bei nur kleinen HF-Signalen können diese Schwankungen, wenn sie lang genug sind, unter Umständen zu Wortverstümmelungen führen. Nur sehr kurze Einbrüche dagegen verursachen mehr oder weniger starke Zischgeräusche. Diese und die von den Autozündanlagen erzeugten Störgeräusche beeinträchtigen die Verständlichkeit nur in geringem Masse, werden aber als lästige Störungen empfunden.

Bei der Planung zur Tunnelfunkversorgung wurde für die extremsten Betriebsbedingungen eine schlechte, aber noch verständliche Übertragungsqualität mit ziemlich starken Störgeräuschen und für die übrigen Fälle eine gute Übertragung mit vereinzelten Störgeräuschen vorausgesetzt. In der Skala für subjektive Sprachbeurteilung des CCIR[1], «report 358», entspricht dies den Qualitätsstufen 3 = genügend beziehungsweise 4 = gut.

Damit der experimentelle Messaufwand im Baregg-Tunnel wegen der damit verbundenen Verkehrsbeschränkungen auf ein Minimum reduziert werden konnte, wurden die Messungen und subjektiven Hörversuche zur Ermittlung der erforderlichen Nutzsignalstärken und Schutzabstände in Verbindung mit einem Mehrwegeempfangssignal-Simulator im Labor durchgeführt. Die Ergebnisse sind in der *Tabelle III* für eine Fahrgeschwindigkeit von 80 km/h zusammengefasst. Der jeweilige Messaufbau kann der *Figur 7* entnommen werden.

Bei dieser Gelegenheit wurden die Empfangssignale des Sprech- und UKW-Rundfunks mit Hilfe eines Tonbandgerätes registriert und später mit den im Baregg-Tunnel gemachten Aufnahmen subjektiv verglichen. Dabei konnte eine sehr gute Übereinstimmung festgestellt werden.

5 Das Strahlungskabel im Baregg-Autotunnel

Aus Betriebs- und Sicherheitsgründen sowie wegen der besseren Zugänglichkeit wurde das Strahlungskabel ausserhalb den Fahrspuren (in Fahrtrichtung gesehen) an der linken Tunnelwand in 4,5 m Höhe verlegt. Seine Befestigung erfolgte mit einer neu entwickelten Kunststoffbride (Clic *E 16*, von *Egli & Fischer AG*, Zürich) in regelmässigen Abständen von 1,5 m.

Der Baregg-Tunnel *(Fig. 8)* weist ein wesentlich grösseres Profil als der bei den Vergleichsmessungen benutzte auf. Es war deshalb anzunehmen, dass die Koppeldämpfung entsprechend ansteigen werde. Eine bei 80 und 160 MHz durchgeführte Kontrolle hat jedoch unsere früheren Messwerte in Figur 6 bestätigt. Für beide Frequenzen wurde bei Fahrgeschwindigkeiten von 40 und 80 km/h sowohl auf der Normal- als auch auf der Überholspur eine Koppeldämpfung von 76 dB gemessen *(Fig. 9)*. Die Auswertung der Registrierung hat ausserdem gezeigt, dass die Fahrzeugdichte und überholende Autos die Koppeldämpfung nicht beeinflussen.

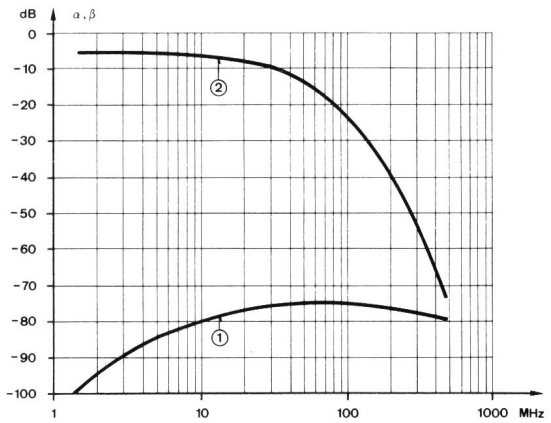

Fig. 6
Kabel- und Koppeldämpfung in Funktion der Frequenz (Kabeltyp S 17873-2)
① Koppeldämpfung
② Kabeldämpfung

[1] Comité Consultatif International des Radiocommunications

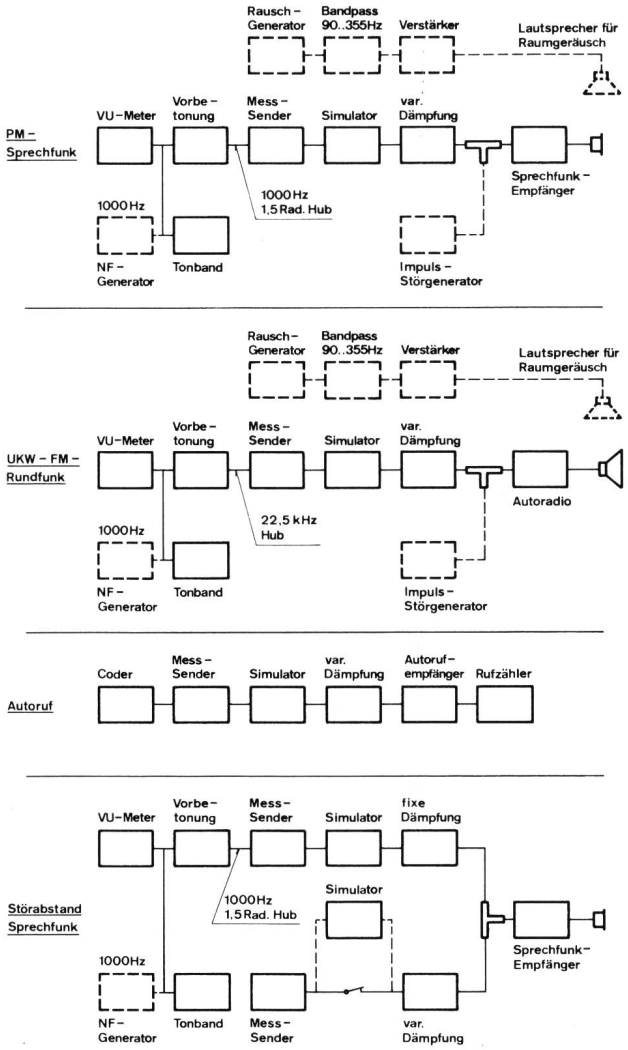

Fig. 7
Messanordnung zur subjektiven Bestimmung der erforderlichen Nutzsignalstärken und Störabstände in Verbindung mit dem Mehrwegeempfangssignal-Simulator

Wie sich mittlerweile bestätigt hat, besteht keine Gefahr, dass bei den regelmässig durchgeführten Reinigungen der Tunnelwände das Kabel und die Befestigungen durch die rotierenden Bürsten oder die dem Wasser beigefügten chemischen Reinigungsmittel beschädigt werden.

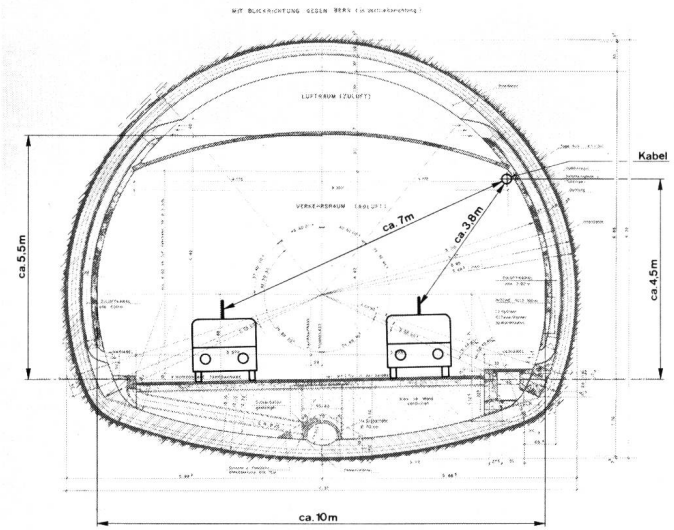

Fig. 8
Querschnitt durch die Tunnelröhre

6 Funkversorgungskonzept mit Breitbandverstärkern

Bei den meisten bis heute verwirklichten Tunnelfunkanlagen wurde das in *Figur 10a...c* skizzierte Konzept angewendet. Die gesamte Versorgungsstrecke wird dabei in mehrere Abschnitte aufgeteilt. In der Mitte jedes Teilstückes werden die Sender-Empfänger über einen 2-Weg-Kombinierer-Teiler (Combiner-Divider) mit den zwei Kabelhälften verbunden. Um eine möglichst grosse Versorgungslänge je Abschnitt erreichen zu können, müssen die verschiedenen Sende- und Empfangssignale mit geringen Verlusten zusammengeschaltet beziehungsweise aufgeteilt werden, was nur mit kostspieligen, viel Platz beanspruchenden Filterschaltungen möglich ist. Ein weiteres Problem besteht darin, dass am gemeinsamen Anschlusspunkt Signalunterschiede in der Grössenordnung von 150 dB (Sendeleistung 10 W, Empfangsleistung 10^{-14} W) auftreten. Die kleinste Nichtlinearität kann deshalb zu störenden Intermodulationsprodukten führen. Dieses Konzept ist aus den erwähnten Gründen nur für die Versorgung kurzer Tunnels mit wenigen Kanälen geeignet.

Im folgenden wird die in Figur 10 b dargestellte Alternativlösung näher untersucht. Bei dieser werden alle Sender auf der einen, die Empfänger auf der andern Tunnelseite installiert. In bestimmten Abständen werden einfache Breitbandverstärker mit Entzerrernetzwerken zur Kompensation der frequenzabhängigen Kabeldämpfung eingefügt. Aus dieser Darstellung erkennt man sofort gewisse Vor-

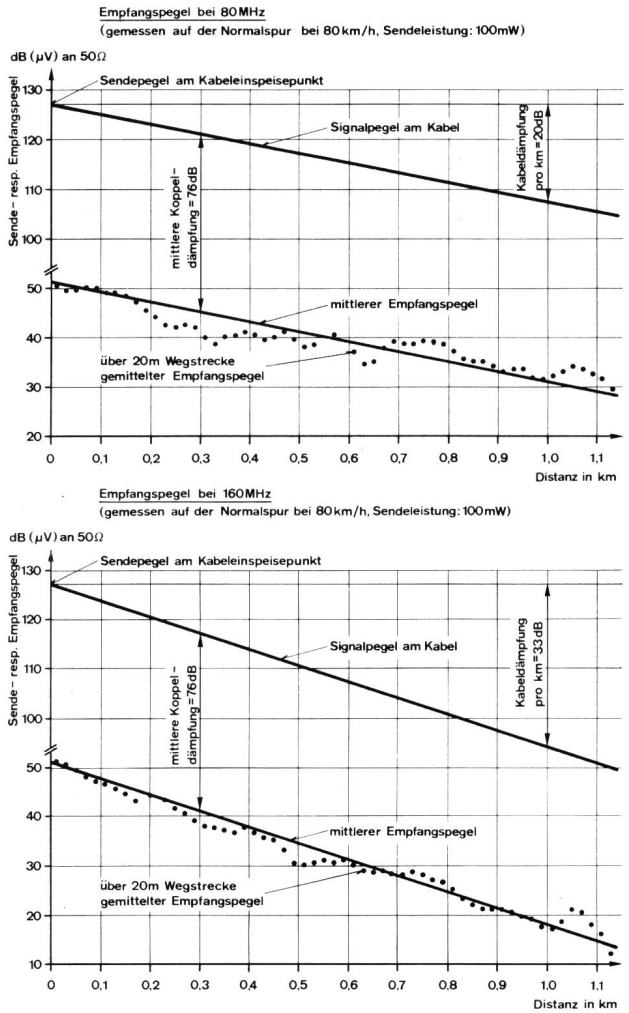

Fig. 9
Empfangspegel bei 80 und 160 MHz

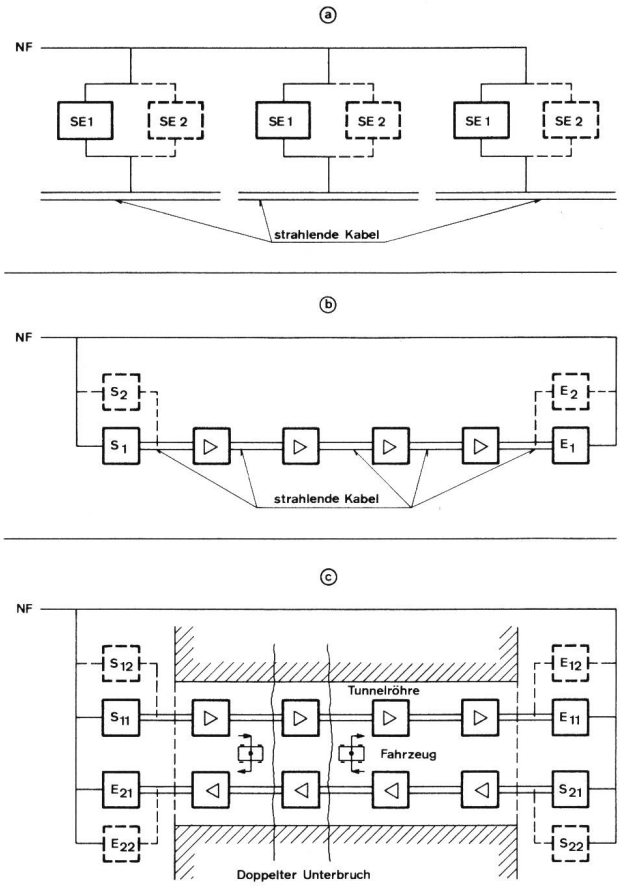

Fig. 10a...c
Prinzipschemata von Tunnelfunkeinrichtungen
S Sender
E Empfänger
SE Sender-Empfänger
NF Niederfrequente Sprech- und Rufsignale

teile in baulicher Hinsicht. Die meisten Strassentunnels besitzen bei den Portalen die für den Betrieb und Unterhalt notwendigen Räumlichkeiten. Im Innern fehlt jedoch in der Regel der Platz für das Unterbringen von Geräte- und Filterschränken.

Die Probleme der Signalübertragung über Koaxialkabel mit Zwischenverstärkern sind von der Trägerfrequenz- und Gemeinschaftsantennentechnik her weitgehend bekannt. Es genügt daher, auf einige Besonderheiten näher einzugehen.

61 Schwingsicherheit

Im Gegensatz zu andern Anwendungen wird im betrachteten Fall ein leckes Kabel benützt. Es stellt sich daher sofort die Grundfrage, wie gross die strahlungsbedingte Rückkopplung zwischen den Verstärker-Ein- und -Ausgängen ist. Diese wurde mit zwei auf dem Boden ausgelegten Kabelstücken gemessen. Die Dämpfungen betragen bei einem Abstand von wenigen mm $\geq$ 86 dB und bei 30 cm $>$ 100 dB. Da die obere Grenze der Verstärkung bei etwa 40 dB liegt, besteht absolut keine Gefahr einer Selbsterregung.

62 Das Empfangssignal in der Nähe der Verstärker

Im Baregg-Tunnel wurde versuchsweise ein 35-dB-Breitbandverstärker zwischen zwei Kabelabschnitte eingeschaltet und das Empfangssignal im Messwagen registriert. *Figur 11* zeigt die über 20-m-Wegstücke gefundenen Mittelwerte. Man erkennt daraus, dass das Signal etwa 30 m vor dem Verstärker anzusteigen beginnt.

Beim Versorgungskonzept nach Figur 10a können, sofern handelsübliche Sprechfunkgeräte benützt werden, zwischen den einzelnen Abschnitten Interferenzstörungen durch Frequenzdifferenzen zwischen benachbarten Sendern auftreten. Diese Probleme gibt es hier nicht, da man nur mit Dopplerfrequenzverschiebungen und Laufzeitdifferenzen rechnen muss wie beim Mehrwegeempfang im Freien.

63 Verstärkerabstände, Kaskadeabilität

Die Wahl des Verstärkerabstandes hängt im wesentlichen ab von den Kabelparametern, den Verstärkereigenschaften, der höchsten Betriebsfrequenz, der Anzahl zu übertragender Kanäle und der Tunnellänge. Für jedes Projekt gilt es, eine bezüglich Übertragungsqualität, Betriebssicherheit und Kostenaufwand günstigste Kompromisslösung zu finden. Allgemein gültige Planungsanweisungen können daher nicht aufgestellt werden. Im folgenden wird ein Beispiel mit maximal 8 Sendekanälen näher betrachtet, das primär die in Frage kommenden Funkdienste der PTT-Betriebe berücksichtigt und noch 3 Reservekanäle, beispielsweise für die Polizei und den Tunnelunterhaltsdienst, enthält *(Tab. IV)*. Dabei wird angenommen, dass alle Frequenzen in dem für Tunnelfunkprojekte mit strahlenden Koaxialkabeln vorteilhaftesten Bereich zwischen 68...174 MHz liegen. Die Benützung des 460-MHz-Mobilfunkbandes

Tabelle IV. Kanalzuordnung

Funkdienst	Einseitig Fix – Mobil	Simplex	Duplex	Frequenz
Nationales Autotelefonnetz (NATEL)			2	160-MHz-Band
Ruf NATEL	1			160-MHz-Band
Autoruf	1			72,6 MHz
UKW-Rundfunk	1			87,6...104 MHz
Andere Dienste		3		80- oder 160-MHz-Band

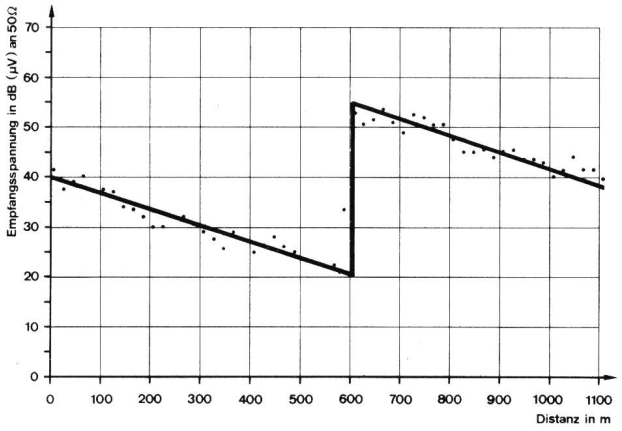

Fig. 11
Verlauf des Empfangssignals längs eines Kabels mit Zwischenverstärker

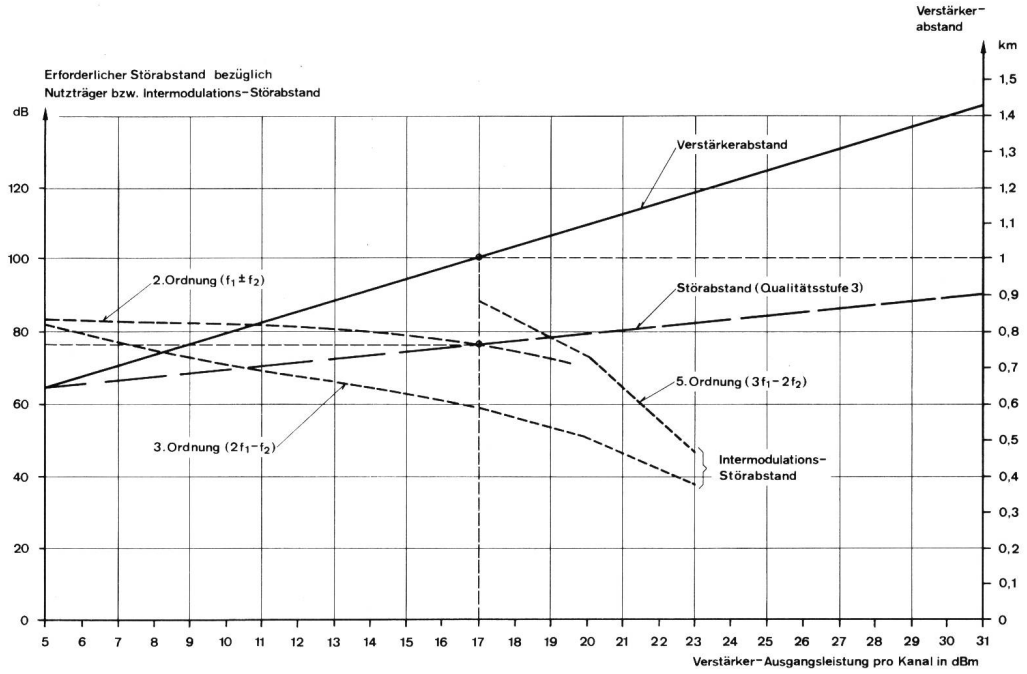

Fig. 12
Stör- und Verstärkerabstände in Abhängigkeit von der Aussteuerung
Frequenzband: 160 MHz; Kabeldämpfung: 33 dB/km; Koppeldämpfung: 76 dB; Sendeleistung mobil: 10 W. Minimales mittleres Empfangssignal mobil: 15 dB (μV) an 50 Ω; Gleichkanalstörabstand: 23 dB

kann für kürzere Strecken in Betracht gezogen werden, ist aber wegen der mindestens doppelt so hohen Kabeldämpfung für längere Strassentunnels unwirtschaftlich und wirkt sich nachteilig auf die Betriebssicherheit aus.

Als Verstärker wird bei dieser Betrachtung ein für Gemeinschaftsantennenanlagen entwickeltes Produkt *(TRW-CA 2600)* zugrunde gelegt, das preislich äusserst günstig ist. Die maximale Ausgangsleistung (Kompression 1 dB) beträgt für diesen Typ etwa 1 W.

Wegen der Schmalbandigkeit der Mobilfunkkanäle (Kanalabstand 25 kHz) ist die Wahrscheinlichkeit gross, dass verschiedene in den Senderendstufen oder Verstärkern entstehende Intermodulationssignale zwischen die Nutzkanäle fallen. In einem gewissen Rahmen lässt sich dies auch steuern, da man beispielsweise beim Nationalen Auto-Telefonnetz (NATEL) eine Auswahl aus 12 Kanälen treffen kann. Es ist deshalb möglich, die Verstärker mehr auszusteuern, als dies etwa in Fernseh-Gemeinschaftsantennenanlagen üblich ist. Der kritischste Störungsfall tritt dann auf, wenn ein in der Anlage erzeugtes Intermodulationsprodukt in einen Übertragungskanal Mobil–Fix fällt. In der *Figur 12* sind der erforderliche Störabstand in Abhängigkeit von der Verstärkerausgangsleistung je Kanal sowie die mit zwei Signalen gleicher Stärke gemessenen Intermodulationsstörabstände bis zur 5. Ordnung angegeben. Für die Beurteilung ist der Summenpegel der in den verschiedenen Verstärkern erzeugten Störprodukte massgebend. Dieser liegt in der Praxis zwischen dem durch Spannungs- beziehungsweise Leistungsaddition gebildeten Wert. Dies bedeutet, dass der Intermodulationsstörabstand je Verstärker bei einer Strecke mit 10...20 Zwischenverstärkern etwa 15...20 dB grösser sein muss als der geforderte Schutzabstand. Aus der Figur 12 ist ersichtlich, dass bei kürzeren Tunnels mit einem Ausgangspegel von 17 dBm der Störschutz gewährleistet ist, wenn die von Fix nach Mobil übertragenen Signale bis zur 3. Ordnung intermodulationsfrei sind. Für längere Strecken müssten bei der Frequenzwahl auch die Störungen 5. Ordnung verhindert werden. Der Figur 12 kann man weiter entnehmen, dass für den Pegel 17 dBm der maximale Verstärkerabstand 1 km beträgt.

In *Figur 13* sind die Signalpegelverhältnisse auf der ganzen fixen Übertragungsstrecke und am Eingang des Mobilempfängers dargestellt. Für die Verbindung Mobil–Fix sind die beiden Extremverhältnisse mit den minimalen und maximalen Leitungspegeln angegeben. Für die Zusammenschaltung der Sende- und die Aufteilung der Empfangssignale wurde ein passiver Combiner/Divider (beispielsweise Anzac DS–309) mit 8 Anschlüssen (gegenseitige Entkopplung $\geqq$ 30 dB) angenommen, der eine Zusatzdämpfung von 10 dB bewirkt. Die wichtigsten Daten dieser Schaltungsanordnung sind in der *Tabelle V* zusammengestellt. Die Signale im 80-MHz-Band können wegen der geringen Kabeldämpfung und das Rufsignal für das NATEL wegen der grösseren Empfängerempfindlichkeit um etwa 10 dB herabgesetzt werden, was sich günstig auf die Systembelastung auswirkt. Für den Sprechfunk erhält man in Richtung Fix–Mobil eine Signalreserve bezüglich des Grenzwertes für die Qualitätsstufe 3 von etwa 6 dB. Bei der UKW-Rundfunkübertragung hat man auf die Pegelabsenkung verzichtet, weil mit verhältnismässig grossen Streuungen der Antennengewinne und Empfängerempfindlichkeiten gerechnet werden muss. Das Autorufsignal könnte zusätzlich noch etwa um weitere 10 dB reduziert werden, falls dies hinsichtlich Intermodulation von Nutzen wäre. Bei der Übertragungsrichtung Mobil–Fix ergeben sich Signalreserven von mindestens 26 dB. Bei diesen Werten ist jedoch das in den Verstärkern erzeugte Rauschen nicht berücksichtigt. Da der Rauschfaktor des dieser Betrachtung zugrunde liegenden Fabrikates mit 7 dB ungefähr jenem eines typischen Mobilfunkempfängers entspricht, ergibt sich bei 20 kaskadierten Verstärkern eine HF-Rauschabstandsverminderung von etwa 13 dB. Abgesehen von allfälligen Intermodulationsstörungen wird daher die Verbin-

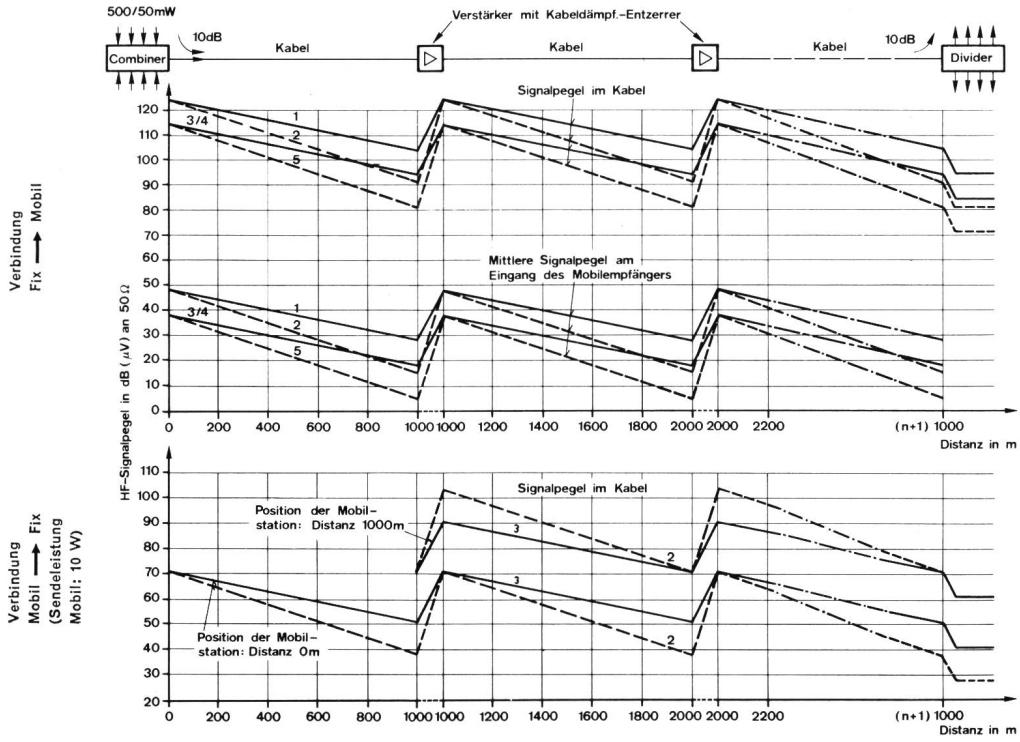

Fig. 13
Pegelplan
1 UKW-Rundfunk
2 Sprechfunk 160-MHz-Band
3 Sprechfunk 80-MHz-Band
4 Autoruf
5 Ruf NATEL

dung Mobil–Fix auch bei langen Tunnels eine bessere Qualität aufweisen als die Gegenrichtung.

Bei dieser Gelegenheit sei darauf hingewiesen, dass an die Fixempfänger recht bescheidene Forderungen bezüglich Selektivität, Intermodulation und Nebenempfangsstellendämpfungen gestellt werden müssen. Der Figur 13 kann man entnehmen, dass innerhalb eines Frequenzbandes Signalunterschiede von höchstens 53 dB auftreten. Wegen der Trennung der Sender und Empfänger sind auch keine Duplexweichen erforderlich.

Im Labor wurde versuchsweise ein 3 km langes Teilstück des beschriebenen Übertragungssystems gemäss Figur 13 mit 2 Zwischenverstärkern nachgebildet. Für die Signalaufbereitung wurden 5 verfügbare Mobilfunk-, 1 UKW-Rundfunk- und 1 Messsender eingesetzt. Die Frequenzen und die nach der Zusammenschaltung beziehungsweise an den

Tabelle V. Zusammenstellung der wichtigsten Daten des Systems

1 Dienst	2 Pegel am Ausgang des Combiners beziehungsweise Verstärkers (Fix – Mobil) dB (µV)	mW	3 Minimaler mittlerer Pegel am Ausgang des Verstärkers in dB (µV) (Mobil → Fix)	4 Notwendiger Schutzabstand in dB	5 Notwendiger Abstand von Gleichkanal-Störsignalen bezüglich des Pegels 124 dB (µV) in dB	6 Minimaler Empfangspegel in dB (µV)	7 Notwendiger Empfangspegel in dB (µV)	8 Reserve der Empfangspegel in dB
Simplex-Sprechfunk 80 MHz								
Fix → Mobil	114	5		8	76	18	11 (4)	7 (14)
Mobil → Fix			71	23		41	2	39
Simplex-Sprechfunk 160 MHz								
Fix → Mobil	124	50		8	76	15	11 (4)	4 (11)
Mobil → Fix			71	23		28	2	26
Duplex-Sprechfunk 160 MHz (NATEL)								
Fix → Mobil	124	50		8	8	15	11 (4)	4 (11)
Mobil → Fix			71	23	76	28	2	26
Ruf 160 MHz (NATEL)								
Fix → Mobil	114	5		8	18	5	0	5
Autoruf								
Fix → Mobil	114	5		8	18	18	–4	22
UKW-Rundfunk								
Fix → Mobil	124	50		20	20	28	10 (9)	18 (19)

Die Werte in () gelten ohne Berücksichtigung von Impulsstörungen

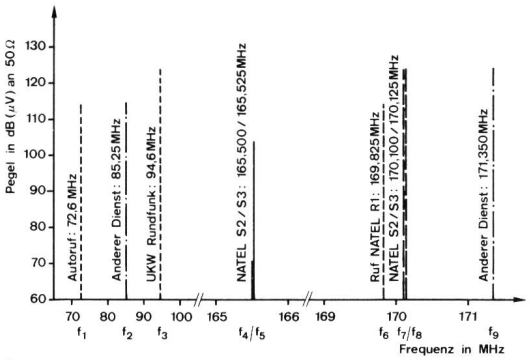

Fig. 14
Frequenzen und Pegel des Versuchssystems

- - - - - - - Einseitig Fix – Mobil
- · - · - · - Simplex
— — — — Duplex Fix – Mobil
———— Duplex Mobil – Fix

Verstärkerausgängen eingestellten Pegel (Summenpegel: 215 mW) sind aus *Figur 14* ersichtlich. Die sich zufällig ergebende Frequenzreihe der Fixsender war bis mindestens zur 5. Ordnung intermodulationsfrei. Der Versuch hat gezeigt, dass alle Kanäle (einschliesslich der zwei zusätzlichen Duplexkanäle Mobil–Fix) einen HF-Störabstand von >80 dB (Grenze des Messempfängers), bezogen auf den Pegel 124 dB (µV), aufwiesen. Einzig die beiden im Nachbarkanal betriebenen Sender störten sich gegenseitig ein wenig durch das Eigenrauschen. Die gemessenen Abstände betrugen 74 beziehungsweise 76 dB, was aber bei weitem ausreichen würde, da es sich um Duplexverbindungen handelt. Die Sender wurden auch moduliert, und am Ausgang der Strecke kontrollierte man die Übertragungsqualität. Es konnte dabei keine Beeinträchtigung, auch bei dem besonders kritischen amplitudenmodulierten Autorufsignal, festgestellt werden.

Bei dieser Gelegenheit muss noch auf eine weitere Störmöglichkeit durch Intermodulation aufmerksam gemacht werden, die bei der Planung unbedingt zu beachten ist. Wenn nämlich mehrere Duplexkanäle benützt werden, entstehen wegen des konstanten Duplexabstandes von 4,6 MHz stets Intermodulationsprodukte 3. Ordnung, die in die Mobil-Fix-Kanäle fallen. Im betrachteten Beispiel ist das Produkt $f_5 + f_7 - f_8$ identisch mit f_4 (oder $f_5 = f_4 + f_8 - f_7$). Da das Signal mit der Frequenz f_5 zeitlich gemäss Figur 2 schwankt, ändert sich entsprechend auch die Stärke des Intermodulationproduktes. Die Amplituden der Nutz- und Störsignale im Kanal f_4 stellen somit zwei unkorrelierte, zeitlich variable Zufallsgrössen dar, die, über kürzere Wegstücke betrachtet, ungefähr eine Rayleigh-Verteilung aufweisen. Die in der Figur 14 angegebenen mittleren Signalpegel treten an einem beliebigen Verstärkerausgang dann auf, wenn sich das störende Fahrzeug mit f_5 (in der Übertragungsrichtung gesehen) unmittelbar vor und das das gestörte Signal sendende Fahrzeug mit f_4 direkt nach dem Verstärker befindet. Der mittlere Störsignalpegel lässt sich aus dem in Figur 12 angegebenen Intermodulationsstörabstand 3. Ordnung herleiten; er beträgt für diesen Extremfall 51 dB (µV), der Abstand der Mittelwerte zwischen den Nutz- und den Störsignalen ist 20 dB. Dies entspricht nach Tabelle III noch der Qualitätsstufe 3. Im Mittel kann man mit einem Störabstand von etwa 53 dB rechnen, wobei aber zu berücksichtigen ist, dass sich die Intermodulationsprodukte verschiedener Zwischenverstärker addieren können.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass es mit den heute verfügbaren technischen Mitteln möglich ist, die Funkversorgung in den höchstens 16 km langen Nationalstrassentunnels nach dem hier beschriebenen einfachen Konzept zu verwirklichen. Die günstigsten Verstärkerabstände liegen zwischen 700...1000 m. Trotz den im allgemeinen geringen Temperaturschwankungen in Tunnels müssten bei längeren Strecken vermutlich in gewissen Abständen Regelverstärker eingesetzt werden, da die totale Kabeldämpfung einige hundert Dezibel betragen kann.

64 Betriebssicherheit

Die kleinste mittlere Zeitdauer zwischen zwei Geräteausfällen (MTBF) besitzen wegen ihrer Komplexität zweifellos die Sender und Empfänger. Obschon jene von modernen Hybrid-Breitbandverstärkern auf über 10 Jahre geschätzt wird, wirkt sich ein Verstärkerausfall besonders schwerwiegend aus, da er das ganze System ausser Betrieb setzt. Es dürfte sich daher bei längeren Tunnels auf jeden Fall lohnen, beispielsweise Ausführungen mit zwei parallel arbeitenden Verstärkern zu verwenden.

Die Sicherheitsdienste, wie Polizei, Ambulanz und Feuerwehr, fordern nicht nur eine gute Betriebssicherheit unter normalen Bedingungen, sondern auch in Katastrophenfällen. Es ist verständlich, dass für diese der Sprechfunk gerade bei einem Brand oder einer Explosion besonders wichtig sein kann. Diesen Forderungen würde das in Figur 10c skizzierte Konzept vollumfänglich genügen. Die ganze technische Einrichtung ist doppelt ausgeführt mit

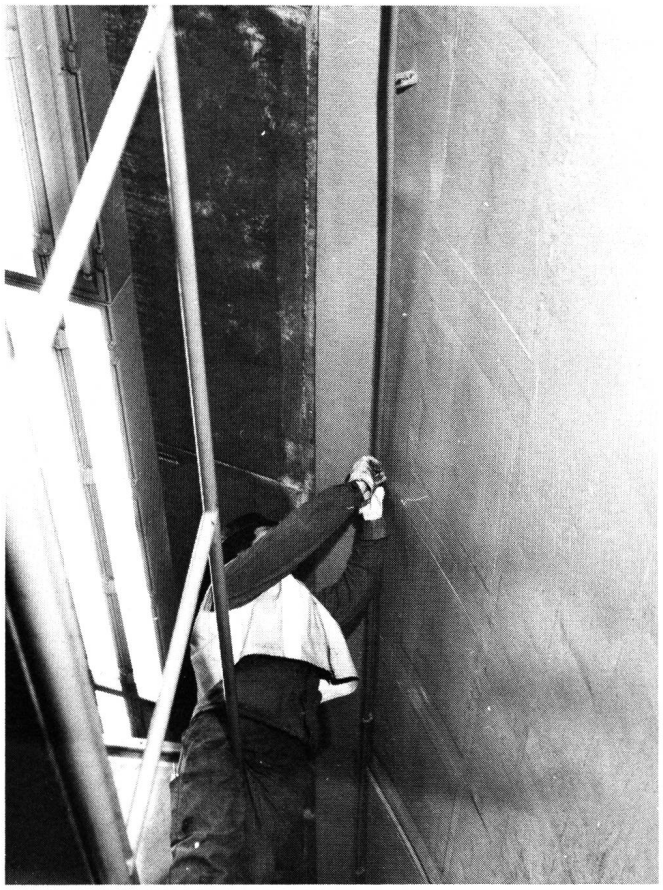

Fig. 15
Verlegung eines strahlenden Kabels in einem Strassentunnel

umgekehrter Übertragungsrichtung. Im Normalfall ist nur ein System in Betrieb, wobei sich die Strecke leicht überwachen lässt, indem ein am Eingang eingespeistes Signal (etwa das UKW-Signal) am Ausgang mit einem Empfänger dauernd kontrolliert wird. Beim Ausfall eines Senders, Empfängers oder Verstärkers wird auf das Parallelsystem umgeschaltet. In einem Katastrophenfall, wenn beide Übertragungsstrecken unterbrochen sind, kann der Funkverkehr bis unmittelbar zur Störstelle sichergestellt werden, indem die beiden Systeme gleichzeitig betrieben werden. Dies ist jedoch nur mit Sicherheit möglich, wenn die Verstärker nicht, wie das sonst üblich ist, gemeinsam über das Kabel gespeist werden, sondern aus einem separaten «katastrophensicheren Netz». Es wäre auch eine Lösung denkbar, bei der normalerweise beide Systeme gleichzeitig mit unterschiedlichen Kanälen betrieben und im Störungsfall nur eine beschränkte Anzahl besonders wichtiger Funkverbindungen sichergestellt würden.

Kostenschätzungen haben ergeben, dass bei längeren Tunnels selbst ein solches betriebssicheres 1 + 1-System noch wesentlich billiger realisiert werden könnte als eine nach Figur 10a konzipierte Funkversorgung.

Die nächste Nummer bringt unter anderem
Vous pourrez lire dans le prochain numéro

Die Nummer 11/1977 der Technischen Mitteilungen PTT ist ganz dem **Fernmeldewesen in der Schweiz** gewidmet.

Le numéro 11/1977 du Bulletin technique PTT sera consacré entièrement aux **télécommunications en Suisse.**