

# Resultate von Datenübertragungsversuchen über Mobilfunkstrecken

Autor(en): **Furrer, F. J.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des  
Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de  
l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des  
Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **68 (1977)**

Heft 18

PDF erstellt am: **12.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-915066>

## **Nutzungsbedingungen**

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

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

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

## **Haftungsausschluss**

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

# Resultate von Datenübertragungsversuchen über Mobilfunkstrecken

Von F.J. Furrer

621.396.93

Es wird über Resultate und Probleme berichtet, die bei digitalen Datenübertragungsversuchen über eine Mobilfunkstrecke auf 460 MHz in der Stadt Zürich gefunden wurden. Die Versuchsanordnung bestand aus einem Mobilgerät in einem Fahrzeug, das auf einer repräsentativen Strecke zirkulierte sowie einer Fixstation auf dem Waidberg. In Versuchen mit total mehr als 5 Mio übermittelter Bit wurden Bit- und Telegrammfehlerwahrscheinlichkeiten gemessen und statistisch ausgewertet.<sup>1)</sup>

L'auteur donne les résultats des essais de transmission de données par un réseau de radiocommunication mobile, sur 460 MHz, dans la ville de Zurich, et mentionne les problèmes à résoudre. Il s'agissait d'une station montée dans un véhicule circulant sur un parcours représentatif et d'une station fixe sur le Waidberg. Durant ces essais totalisant plus de 5 millions de bits transmis, les probabilités d'erreurs de bits et de télégrammes furent mesurées et interprétées statistiquement.<sup>1)</sup>

## 1. Einleitung

### 1.1 Zweck der Versuche

Sprechfunkverbindungen zwischen fixen Stationen und Fahrzeugen sind seit längerer Zeit erprobt und stehen schon in vielen kommerziellen und staatlichen Systemen im Einsatz. In neuerer Zeit ist das Bedürfnis entstanden, auch Daten zwischen Mobilstationen und Fixstationen drahtlos austauschen zu können. Dabei treten gegenüber Sprechverbindungen neue Probleme auf, und es stellt sich die Frage der erreichbaren Übertragungsgüte.

Im allgemeinen hat ein fahrendes Fahrzeug im Stadtgebiet keine direkte Sichtverbindung zur Antenne der Fixstation. Das Empfangssignal an der Fahrzeugantenne setzt sich daher aus gestreuten und reflektierten Signalanteilen des Sendesignales zusammen.

Soll über die erreichbare Übertragungsgüte, also über die erreichbare Datenqualität in einem grösseren Gebiet wie z. B. der Stadt Zürich eine Aussage gemacht werden, so existieren drei Möglichkeiten: die theoretische Berechnung [1; 2]<sup>2)</sup>, die Messung der Feldstärken [3; 4] oder eine direkte Messung der Datenfehlerrate [5; 6].

Die zweifellos zuverlässigsten Angaben werden mittels einer direkten Messung der Datenfehlerrate erreicht. Allerdings müssen zu diesem Zwecke die Übermittlungseinrichtung und

<sup>1)</sup> Die Untersuchung wurde im Auftrag der Taxi-Zentrale Zürich AG und in enger Zusammenarbeit mit dieser und den beteiligten Lieferfirmen durchgeführt.

<sup>2)</sup> Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

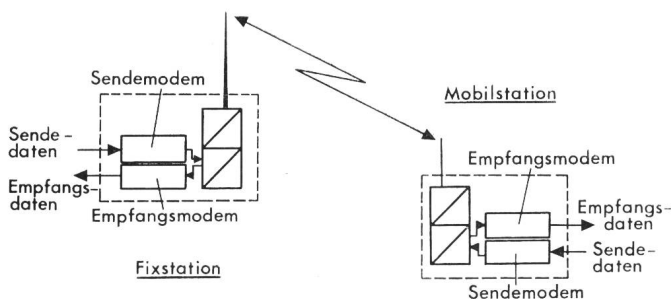


Fig. 1 Elemente einer Mobilfunkstrecke

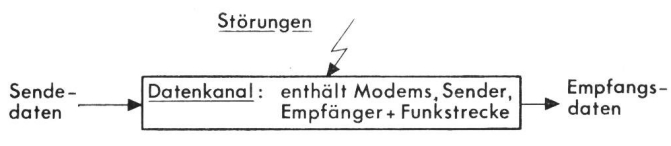


Fig. 2 Modell einer Datenfunkstrecke

eine Registriereinrichtung gebaut, eine Auswertemöglichkeit bereitgestellt und viele Versuchsfahrten durchgeführt werden. Ist dieser Aufwand aber einmal erbracht, so lassen sich nicht nur Bitfehlerwahrscheinlichkeiten, sondern die ebenso wichtigen Telegrammfehlerwahrscheinlichkeiten und Synchronisationsfehler messen. Damit besitzt man alle Angaben, die für die Evaluation für einen praktischen Betrieb notwendig sind.

Der Zweck der in diesem Beitrag beschriebenen Datenübertragungsversuche bestand darin, eine gut begründete Antwort auf folgende zwei Fragen zu geben:

- Ist eine zuverlässige Datenübertragung auf 460 MHz zwischen einer Fixstation und einer im erweiterten Stadtgebiet von Zürich zirkulierenden Mobilstation möglich?
- Wie stark unterscheiden sich die von drei verschiedenen Herstellern zur Verfügung gestellten Übertragungssysteme in ihren Fehlerraten unter gleichen Messbedingungen?

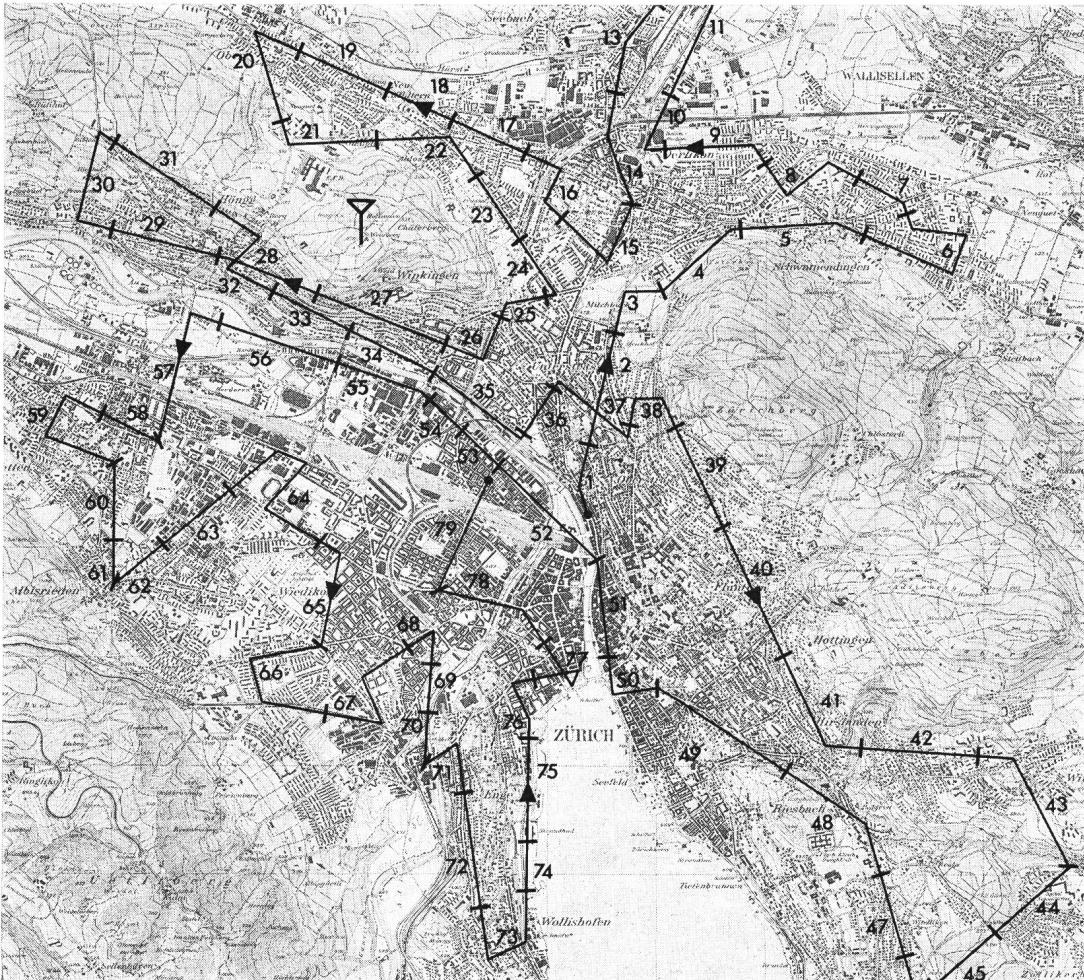
Zur Durchführung dieser Versuche wurden eine Datenquelle sowie ein Auswerte- und Registriergerät gebaut, eine Nachverarbeitung auf einem Grossrechner programmiert und eine Vielzahl von Versuchsfahrten durchgeführt. Die überraschend guten Ergebnisse und die Schlussfolgerungen daraus sind in diesem Beitrag beschrieben.

### 1.2 Mobilfunkstrecken

Für den Aufbau einer Mobilfunkstrecke sind mehrere technische Lösungen denkbar. Beschränkt man sich auf die Anwendung von handelsüblichen Sprechfunkgeräten und überträgt die Daten durch Modulation eines hörbaren Trägers über deren Sprechkanal [6; 7], so erhält das System eine Form nach Fig. 1.

Das Sendemodem wandelt die zu übertragenden Daten in Signale um, die über den Sprachkanal des Funkgerätes übertragen werden können. Die vom Empfangsfunkgerät aufgenommenen Signale werden dem Empfangsmodem weitergegeben. Dieses demoduliert die (häufig schwach und gestört empfangenen) Signale und gibt wieder ein Datensignal ab.

Für die Evaluation einer Datenfunkstrecke kann ein einfaches Modell nach Fig. 2 aufgestellt werden. Das gesamte Übertragungssystem wird als «black-box» – genannt Datenkanal – betrachtet. Der Datenkanal akzeptiert an seinem Eingang die Sendedaten und gibt an seinem Ausgang die Empfangsdaten ab. Alle Übertragungsstörungen (bewirkt durch elektrische Störungen, Funkschatten, Reflexionen, atmosphärische Einflüsse) wirken sich als Datenfehler aus: je mehr Datenfehler der Datenkanal bewirkt, um so schlechter ist er. Der Vorteil des Modells nach Fig. 2 ist, dass man sich nicht mehr mit den Modulations/Demodulationsvorgängen und den Ausbreitungsphänomenen beschäftigen muss, sondern direkt die interessierenden Grössen messen kann.



**Fig. 3**  
Route mit Sektoreinteilung  
für die Versuchsfahrten  
Standort der Fixantenne  
in Schleife 21...28

Eine wesentliche Schwierigkeit kommt allerdings dadurch zustande, dass die Eigenschaften des Datenkanales im Falle einer Mobildatenfunkstrecke nicht konstant sind: je nach Ort und Bewegungsgeschwindigkeit der Mobilstation können andere Werte gemessen werden.

### 1.3 Versuchsbedingungen

Bevor ein Versuch begonnen wird, muss man sich über die Zielsetzung klar sein. Darauf müssen die Versuchsbedingungen genau definiert werden: gerade Versuche mit Mobildatenfunkstrecken haben eine Vielzahl nichtkonstanter Parameter, und die Versuchsergebnisse könnten stark von zu wenig berücksichtigten Nebenbedingungen abhängig sein.

Die Zielsetzung lautete: Messungen von Bitfehlerrate, Telegrammfehlerrate, Synchronisationsfehlern und Telegrammverlusten an drei gegebenen Übertragungssystemen im Betrieb unter realistischen Arbeitsbedingungen. Diese Arbeitsbedingungen wurden durch die Auswahl einer repräsentativen Route (Fig. 3) mit einer Sektoreinteilung geschaffen. Vom oder zum auf dieser Route zirkulierenden Versuchsfahrzeug (Mobilstation) wurden im Abstand von 1 s je 32 bit lange Telegramme übermittelt. Die Messungen wurden sektorweise ausgewertet, um verschieden lange Verweilzeiten des Fahrzeuges in «guten»

und «schlechten» Funklagen möglichst auszugleichen. Als Antennenstandort der Mobilstation wurde die Dachmitte des Fahrzeuges gewählt, um jede Richtungsabhängigkeit so gut wie möglich auszuschliessen. Schliesslich wurden jeweils sehr viele Messungen durchgeführt, um statistische Einflüsse auszugleichen. Die weiteren, festen Versuchsbedingungen lauteten:

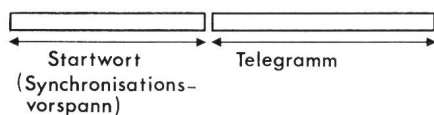
Frequenz	463,375 MHz
HF-Modulationsart	Phasenmodulation
NF-Kanal Modulationsart	DPSK oder FSK
Datenrate	1200 bit/s
Sendeleistung	6...8 W
Fixantennenstandort	Waidberg (Fig. 3)
Übermittlungseinrichtung	fix zu mobil und mobil zu fix
Versuchsdauer	Oktober/November 1976

## 2. Versuchsordnung

### 2.1 Telegrammformat

Für die Versuche wurde eine Gruppe von 32 Nutzinformationsbit in ein Telegramm nach Fig. 4 zusammengefasst. Diesen 32 Bit geht ein Startwort zur Erkennung des Telegrammanfanges voraus. Die Wahl des Startwortes (Länge und Bitmuster) stellt einen wichtigen Schritt im Entwurf des Datenübertragungssystems dar. Es soll möglichst kurz gewählt werden und trotzdem minimale Falschsynchronisationswahrscheinlichkeiten ergeben [8; 9].

Sobald das Startwort im Empfänger erkannt wird, werden die nachfolgenden 32 bit als gültige Nutzinformation aufgefasst. Ein derartiges Telegramm wurde jede Sekunde übermittelt und im Empfänger in einem festen Zeitraster erwartet. Bei



**Fig. 4** Telegrammformat

der Übertragung über den Datenkanal nach Fig. 2 können drei Dinge geschehen:

- das Telegramm kommt ungestört und unverletzt an
- das Telegramm kommt teilweise verfälscht an
- das Telegramm kommt überhaupt nicht an.

Im ersten Falle hat man eine korrekte Übertragung; im zweiten Falle müssen die gestört übertragenen Bit gezählt und registriert werden; im dritten Falle müssen die verlorenen Telegramme gezählt werden. Der Grund für ein verlorenes Telegramm kann darin liegen, dass im Empfangsmoment die Feldstärke an der Empfangsantenne zu klein war oder dass durch eine Störung das Startwort (Fig. 4) nicht erkannt wurde.

## 2.2 Versuchsdurchführung

In der praktischen Versuchsdurchführung (Fig. 5) wurde in einem Wortgenerator einmal pro s das Telegramm nach Fig. 4 erzeugt und auf den Datenkanal gegeben. Im Empfänger erfolgte die Synchronisation (Startwörtererkennung), und die empfangenen Bit wurden in einem Empfangsprüfgerät mit dem bekannten, gesendeten Telegramminhalt verglichen. Dabei wur-

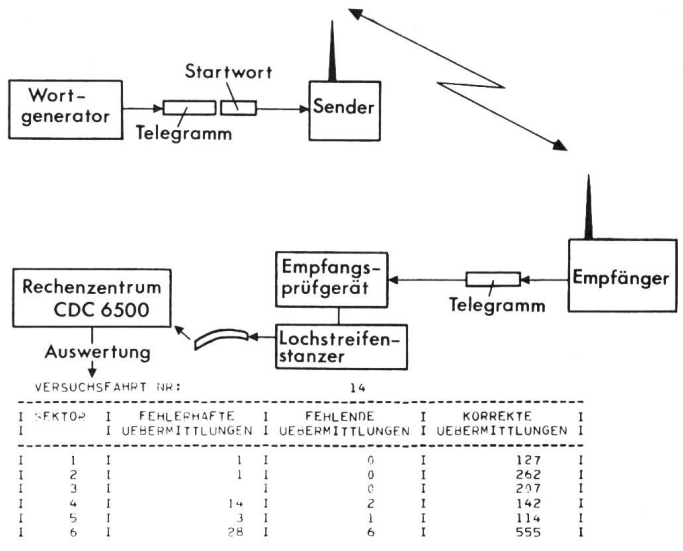


Fig. 5 Versuchsanordnung

VERSUCHSFAHRT NR: 14

FAKTOR	FEHLERHAFTE UEBERMITTLUNGEN	FEHLENDE UEBERMITTLUNGEN	KORREKTE UEBERMITTLUNGEN
1	1	0	127
2	1	0	262
3	1	0	297
4	14	2	142
5	3	1	114
6	28	6	555

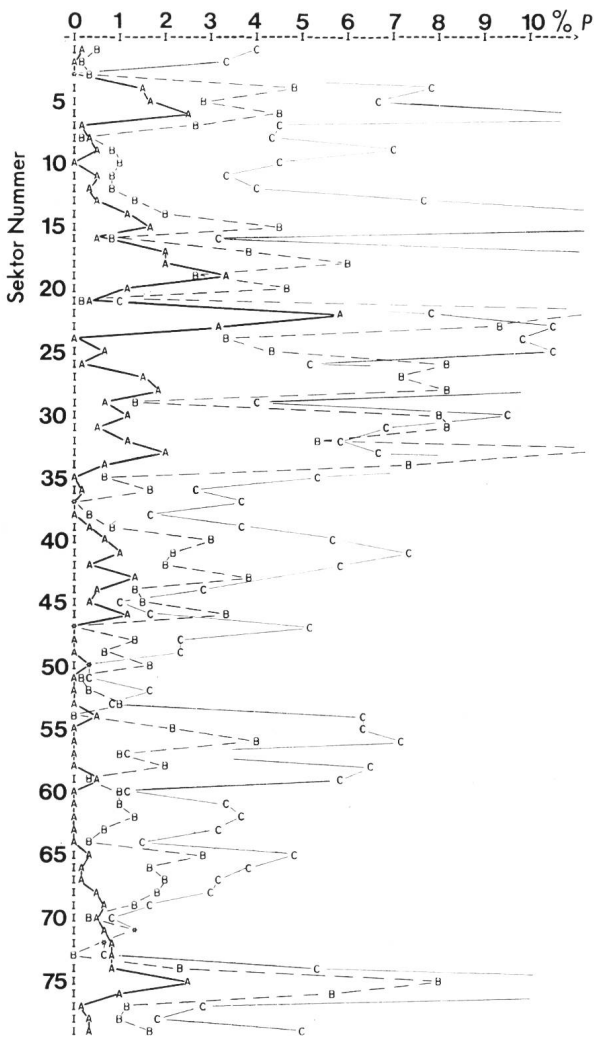


Fig. 6 Telegrammfehlerwahrscheinlichkeiten für die Übertragungsrichtung mobil zu fix  
 Prozentuale Anzahl fehlerhafter Telegramme P pro Sektor  
 A, B, C drei verschiedene Sende-Empfangsanlagen  
 100 % total übermittelte Telegramme

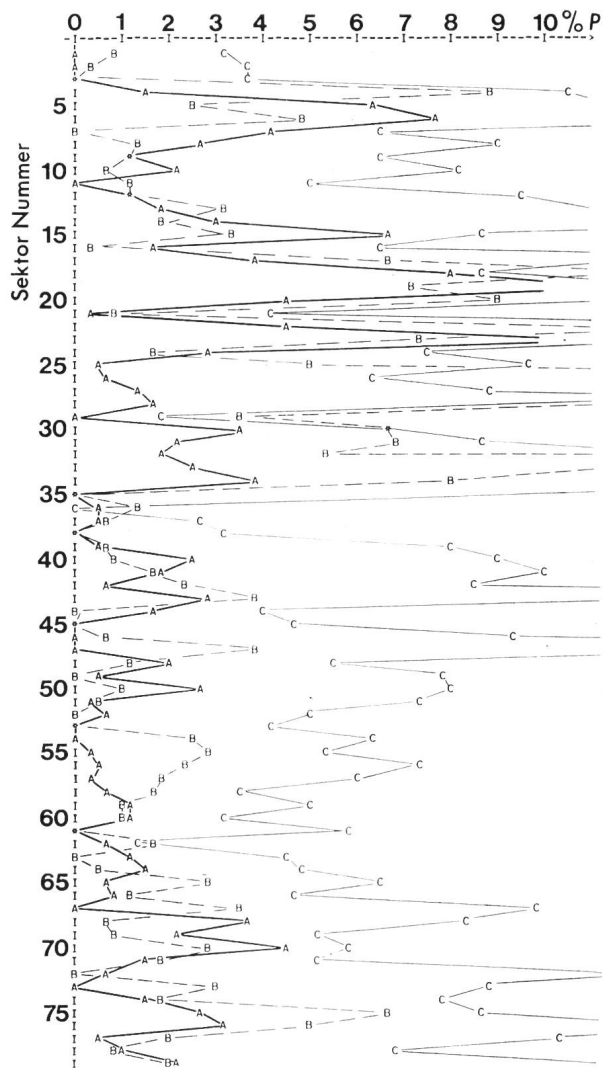


Fig. 7 Telegrammfehlerwahrscheinlichkeiten P für die Übertragungsrichtung fix zu mobil  
 Analog Fig. 6

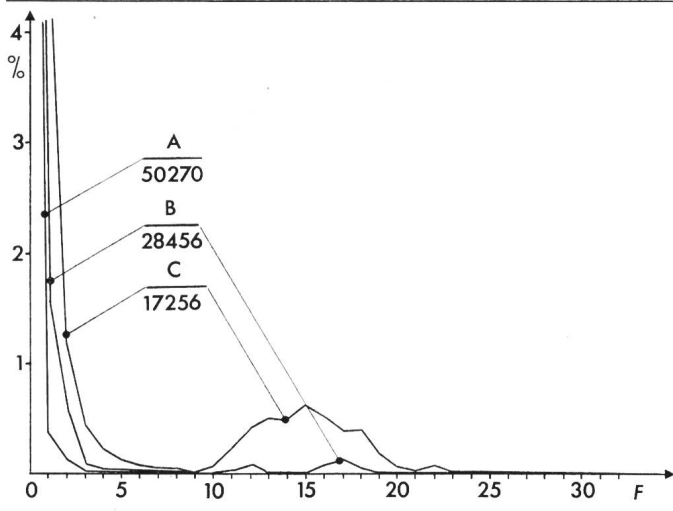


Fig. 8 Verteilung der Anzahl Fehler  $F$  pro Telegramm für die Übertragungsrichtung mobil zu fix in Prozenten aller ausgewerteten Telegramme  
Systeme A, B und C mit der jeweiligen Anzahl ausgewerteter Telegramme

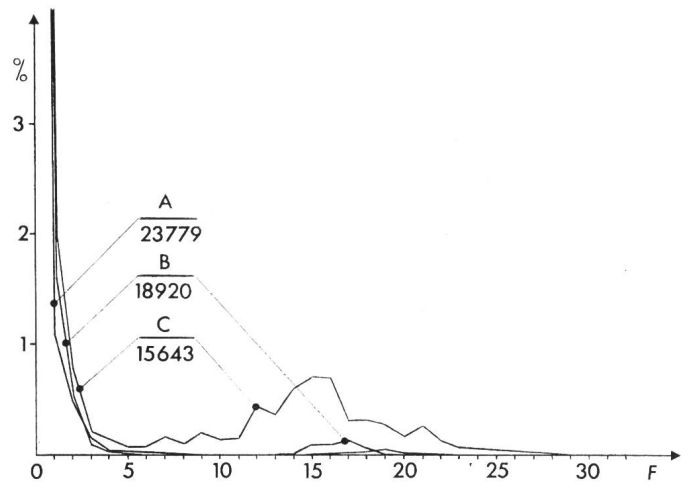


Fig. 9 Verteilung der Anzahl Fehler  $F$  pro Telegramm für die Übertragungsrichtung fix zu mobil in Prozenten aller ausgewerteten Telegramme  
Systeme A, B und C mit der jeweiligen Anzahl ausgewerteter Telegramme

den die folgenden Daten fortlaufend auf den angeschlossenen Lochstreifen ausgestanzt:

- Sektornummer des Senders, resp. Empfängers
- bei korrekt empfangenem Telegramm: ein Quittungszeichen
- bei gestört empfangenem Telegramm: das ganze Telegramm
- bei nicht empfangenem Telegramm: ein Spezialzeichen

Der Lochstreifen wurde auf einem Grossrechner durch ein spezielles Programm ausgewertet und ergab die folgenden Resultate.

### 3. Versuchsergebnisse

#### 3.1 Telegrammfehlerwahrscheinlichkeiten

In den Fig. 6 und 7 sind die gemessenen Telegrammfehlerwahrscheinlichkeiten für die von 3 unabhängigen Herstellern zur Verfügung gestellten Übertragungssysteme dargestellt. Ein Telegramm wurde als richtig (0 Fehler) oder falsch (1 bis 32 Fehler) klassiert. Die Telegrammfehlerwahrscheinlichkeiten sind für jeden Sektor gesondert angegeben. Man sieht in Fig. 6 und 7 deutlich den erwarteten Unterschied der Fehlerwahrscheinlichkeiten in Sektoren mit praktischer Sichtverbindung zur Fixantenne gegenüber Sektoren mit ungünstiger Lage zur Fixantenne.

#### 3.2 Fehlerverteilung

Eine weitere interessante Frage ist die Verteilung der Anzahl Fehler in den gestörten Telegrammen. Die statistische Fehlerverteilung ist in den Fig. 8 und 9 wieder für alle 3 Hersteller und beide Übertragungsrichtungen dargestellt. Die Figuren zeigen eine Kumulation der Anzahl Fehler um «1» und um «16». Die beiden Berge der Fehlerhäufigkeit in den Telegrammen haben zwei verschiedene Ursachen: echte bit-Übertragungsfehler sowie Telegramm Synchronisationsfehler.

Im Falle eines Telegramm-Synchronisationsfehlers (fälschliche Erkennung, resp. Vortäuschung eines Startwortes) empfängt man 32 zufällige Bit als Telegramminhalt. Von diesen 32 Bit werden im Mittel 16 Bit zufällig richtig sein und die Übereinstimmung wird statistisch gestreut um den Mittelwert 16 liegen. Die um «16» kumulierten Fehler stammen deshalb

nicht von echten Übertragungsfehlern, sondern von Falschsynchronisationen. Deren Anzahl ist wesentlich durch die Länge und das Bitmuster des Startwortes sowie durch die Güte der Synchronisationsschaltung bestimmt.

Die durch *echte Übertragungsfehler* erzeugten Bitfehler weisen eine statistische Verteilung (für beide Übertragungsrichtungen zusammengefasst) nach Fig. 10 auf: man sieht die deutliche Anhäufung von Telegrammen mit wenig Fehlern. Die untersuchte Datenfunkstrecke verhält sich wie ein *zufällig gestörter Datenkanal* mit unabhängigen Störungen und nicht, wie man eher erwarten würde, wie ein büschelgestörter Kanal. Auf Grund der Statistik aus Fig. 10 ersieht man, dass bereits ein 2-fehlerkorrigierender Code [10] eine erhebliche Verminderung der Fehlerrate ergäbe.

Berechnet man im Gegensatz zu den echten Übertragungsfehlern nur die durch *Synchronisationsfehler* gestört empfangenen Telegramme, so erhält man die Tabelle I.

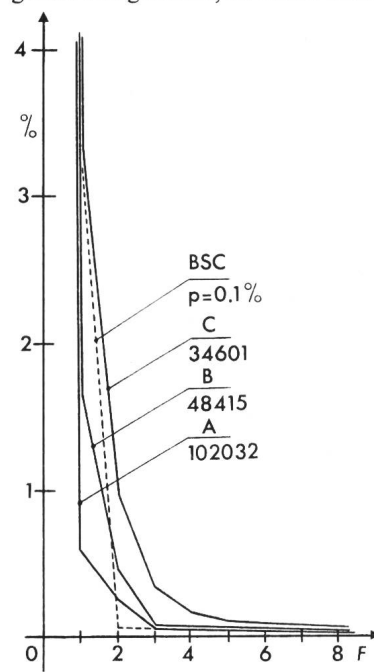


Fig. 10 Verteilung der Anzahl Fehler im Telegramm beider Übertragungsrichtungen Systeme A, B und C mit der jeweiligen Anzahl ausgewerteter Telegramme. Als Vergleich ist gestrichelt die Fehlerverteilung bei der Übertragung über einen symmetrischen Binärkanal (BSC) mit  $p = 0,1\%$  [12] dargestellt.

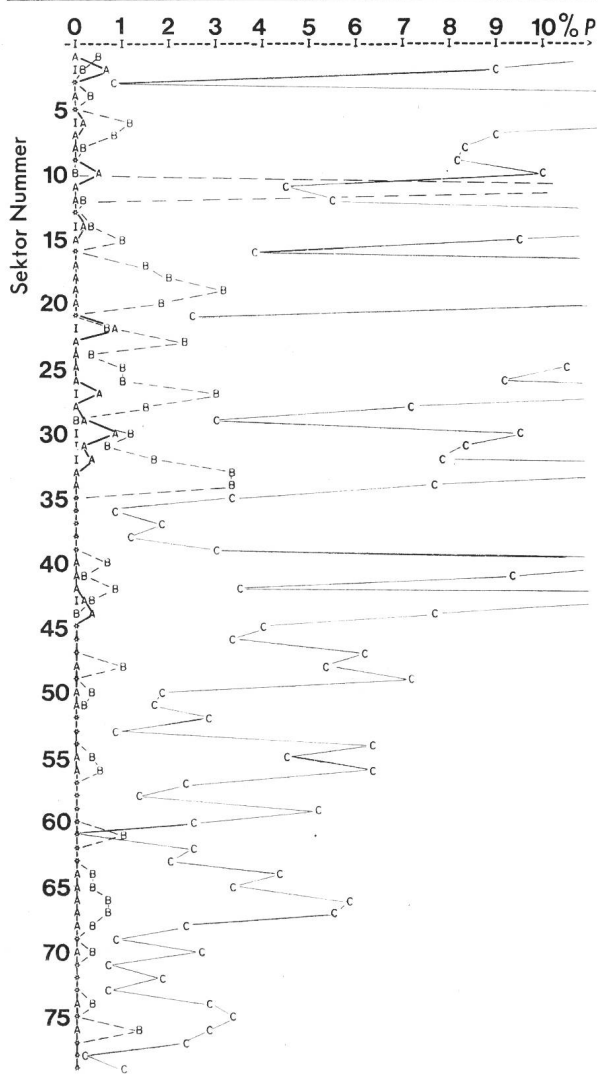


Fig. 11 Prozentuale Anzahl verllorener Telegramme in jedem Sektor für die Übertragungsrichtung mobil zu fix  
Funksysteme A, B und C

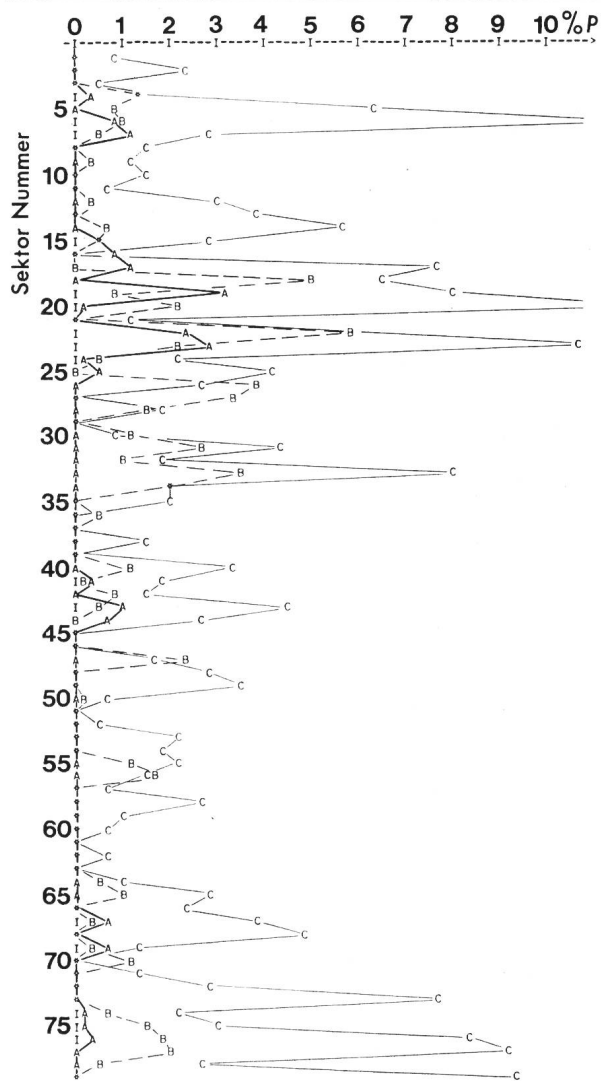


Fig. 12 Prozentuale Anzahl verllorener Telegramme in jedem Sektor für die Übertragungsrichtung fix zu mobil

### 3.3 Telegrammverluste

Als letzte Versuchsergebnisse sind in den Fig. 11 und 12 die gesendeten, aber nicht angekommenen (verlorenen) Telegramme wiederum für die einzelnen Sektoren und für beide Übertragungsrichtungen getrennt aufgetragen.

Bei den beschriebenen Versuchsfahrten befand sich die Mobilantenne auf der Dachmitte des Versuchsfahrzeuges. Um den Einfluss des Antennenstandortes auf die praktische Leistungsfähigkeit der Mobildatenfunkstrecke zu prüfen, wurde eine Versuchsfahrt mit der Mobilantenne auf dem Kofferraumdeckel durchgeführt. Die dabei erzielten Resultate (gestörte Telegramme, verlorene Telegramme) sind auf dem ganzen Parcours um einen Faktor 2...5 schlechter. Für die sichere Funktion des Mobildatenfunkkanales ist eine Optimierung der UHF-mässigen Seite entscheidend: UHF-mässig aufgetretene Leistungsfähigkeitseinbussen können durch keine spätere Verarbeitung mehr ausgeglichen werden.

Ebenfalls in die Kategorie der UHF-Probleme gehört die *Sender-Weichtastung*. Wenn ein Sender getastet wird, beginnt er über seine Antenne Leistung abstrahlen. Er gibt nicht vom ersten Moment an die volle Leistung ab, sondern baut die Leistung in ca. 1...50 ms auf (Hochtasten). Bei diesem Hoch-

tasten strahlt ein Sender leider nicht nur auf seiner eigenen Frequenz Leistung ab, sondern auch auf Nachbarkanälen. Zu schnelles Hochtasten kann einen richtigen «Störungsschleier» erzeugen und benachbarte Kanäle erheblich stören. Durch schaltungstechnische Änderungen an den Sprechfunkgeräten können diese Hochtast-Störungen auf Nebkanälen erniedrigt werden: man nennt das Resultat dieser Änderung «Weichtastung». Das gleiche Problem wie für die Hochtastung gilt auch für die Rücktastung: auch beim Ausschwingen des Senders dürfen nur beschränkte Nebkanalstörungen entstehen.

### Synchronisationsfehlerwahrscheinlichkeit

Tabelle I

Länge des Startwortes	Synchronisationsfehlerwahrscheinlichkeit
23 Bit (2 Fehler zugelassen)	0,035 %
16 Bit	0,51 %
12 Bit	5,04 %

#### 4. Schlussfolgerungen

Die beschriebenen Datenübertragungsversuche über Mobilfunkstrecken haben gezeigt, dass ein zuverlässiger, drahtloser Datenaustausch zwischen Fahrzeugen in der Stadt Zürich und einer einzigen Fixstation auf einer Frequenz von 460 MHz mit vernünftigem Aufwand möglich ist. Bei Benützung des Sprachkanales handelsüblicher Sprechfunkgeräte und einer Datenübertragungsrate von 1200 bit/s sind Telegrammfehlerwahrscheinlichkeiten von unter 1% (über einen repräsentativen Parcours gemittelt) möglich. Grosse Bedeutung in einer asynchronen Telegrammübermittlung kommt dem notwendigen Synchronisations-Startwort zu, das eine Länge zwischen 20 und 25 bit und ein optimales Bit-Muster haben soll. Die Statistik der Fehlerverteilung in den gestörten Telegrammen charakterisiert die untersuchte Mobildatenfunkstrecke als Datenkanal mit zufälligen, unabhängigen Fehlern, indem kleine Anzahlen von Fehlern im Telegramm sehr viel häufiger sind als grössere. Eine fehlerkorrigierende Datencodierung kann daher die Leistungsfähigkeit dieses Datenkanales erheblich erhöhen. Trotzdem braucht ein zuverlässiges Datenübertragungssystem über den untersuchten Datenkanal in jedem Falle eine *Rückmeldung* (Quittierungssignal) und Wiederholung im Fehlerfalle. Grosse Bedeutung kommt der Optimierung der UHF-mässigen Übertragungsseite zu: UHF-mässige Einbussen an Leistungsfähigkeit können durch die spätere Signalverarbeitung nicht mehr ausgeglichen werden. Aus Störungsgründen müssen die verwendeten Sender mit einer Weichtastung versehen werden.

#### Literatur

- [1] R.H. Clarke: A statistical theory of mobile-radio reception. Bell Syst. Techn. J. 47(1968)6, p. 957...1000.
- [2] M.J. Gans: A power-spectral theory of propagation in the mobile-radio environment. IEEE Trans. VT 21(1972)1, p. 27...38.
- [3] Y. Okumura a.o.: Field strength and its variability in VHF and UHF land-mobile radio service. Review of the Electrical Communication Laboratory 16(1968)9/10, p. 825...873.
- [4] G.A. Arredondo and J.I. Smith: Voice and data transmission in a mobile radio channel at 850 MHz. IEEE Trans. VT 26(1977)1, p. 88...93.
- [5] G. Büchner und N. Loeliger: Rechnergesteuerte Leitsysteme für die optimale Betriebsführung von städtischen Verkehrsnetzen. Bull. SEV/VSE 67(1976)14, S. 713...718.
- [6] L.E. Zegers and C.B. Dekker: A comparison of digital transmission techniques for standard FM mobile radio sets. IEEE Trans. COM 25(1977)3, p. 364...368.
- [7] R.T. Chien a.o.: Error correction in a radio-based data communications system. IEEE Trans. COM 23(1975)4, p. 458...462.
- [8] R.H. Barker: Group synchronizing of binary digital systems. In: W. Jackson: Communication theory. London, Butterworth, 1953; p. 273...287.
- [9] M.W. Williard: Optimum code-patterns for PCM synchronization. Proceedings of the 1962 National Telemetry Conference, May 23... 25 1962, Washington; Vol. 1, p. 1...9.
- [10] S. Lin: An introduction to error-correcting codes. Englewood Cliffs/N.J., Prentice-Hall, 1970.
- [11] S.P. Rose: Antenna problems and needs for mobiles. Communication International 4(1977)4, p. 60...64.
- [12] W. Meyer-Eppler: Grundlagen und Anwendungen der Informationstheorie. 2. Auflage. Berlin/Heidelberg/New York, Springer-Verlag, 1969.

#### Adresse des Autors

Dr. Frank J. Furrer, Scheuchzerstrasse 30, 8006 Zürich.

## Arnold Sommerfeld 1868–1951

Arnold Sommerfeld wurde am 5. Dezember 1868 in Königsberg als Sohn eines Arztes geboren. Nach dem Abitur am dortigen Gymnasium entschied er sich zum Studium der Mathematik, das er 1891 in Königsberg mit dem Dokorexamen abschloss. Im Jahr darauf legte er die Lehramtsprüfung ab und leistete seinen Militärdienst. Von 1893 bis 1896 war er Assistent am mineralogischen und anschliessend am mathematischen Institut der Universität Göttingen, wo er sich 1895 auch habilitierte. Beim dort wirkenden Prof. Klein hatte er vortragen und lehren gelernt, und er stürzte sich mit Feuereifer in die Lehrtätigkeit.

Ausser einer Arbeit über Lichtbeugung an Kanten entstand in jener Zeit eine solche über Hertz'sche Wellen an Drähten. Diese stellt die theoretische Grundlage dar für die leitungserichtete HF-Übertragung, wie sie die Werke heute für Telefonie, Fernmessung und Fernsteuerung verwenden.

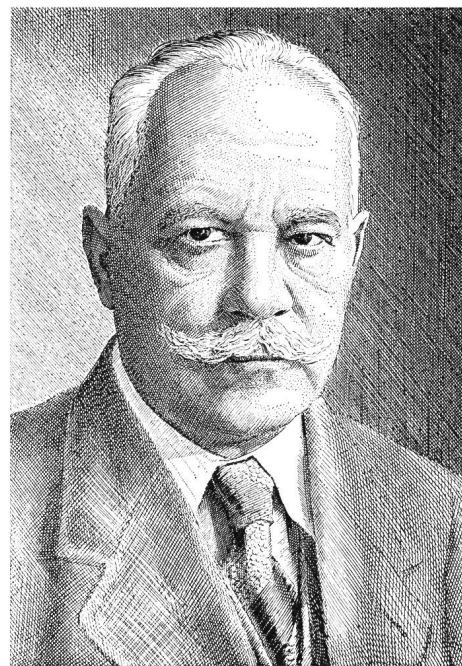
1897 erhielt Sommerfeld einen Ruf an die Bergakademie Clausthal, drei Jahre später einen solchen an die TH Aachen. Da entstand, wie er sich selber ausdrückte, «auf einem Gebiet, das der exakten Behandlung anscheinend unzugänglich war ...», die «Hydrodynamische Theorie der Schmiermittelreibung». Ihn interessierte aber die reine Wissenschaft mehr als die angewandte. Als die Universität München ihn 1906 auf Empfehlung von Lorentz auf den Lehrstuhl für Theoretische Physik berief, sagte er freudig zu. Er blieb dieser Stelle bis zu seiner Emeritierung im Jahre 1938 treu.

In München wirkte er als begnadeter, beliebter Dozent und erfolgreicher Forscher. Besondere Verdienste erwarb er sich auf den Gebieten: Ausbau der Relativitätstheorie, Wellenmechanik sowie Spektroskopie. Auch gelang ihm die Erklärung der Beugung der Röntgenstrahlen. Ferner verfeinerte er das Bohrsche Atommodell, indem er anstelle der Kreisbahnen elliptische Bahnen annahm. 1918 und 1919 entstand sein grosses Werk «Atombau und Spektrallinien».

Sommerfeld erhielt viele Ehrungen. Herzliche Freundschaften verbanden ihn mit anderen Physikern wie Einstein, Planck, Wien, dann aber namentlich mit vielen seiner Schüler, zu denen u.a. Debye, Pauli und Heisenberg gehörten. In den zwanziger Jahren war er zu Gastvorlesungen in England, Amerika, Ungarn, Frankreich und Italien eingeladen, und schliesslich machte er eine Weltreise, auf der er in Kalifornien, Japan und Indien Vorlesungen hielt. Immer tätig, konnte er aber auch Gemütlichkeit pflegen. Das harmonische Familienleben – die Sommerfelds hatten drei Söhne und eine Tochter – war für ihn eine Quelle der Kraft. Das kam ihm zugute, als die Nazis ihm nach seiner Emeritierung das Betreten der Universität verboten. Sommerfeld blieb trotzdem nicht untätig, sondern brachte seine Vorlesungen zu Papier.

Bei einem Verkehrsunfall wurde er schwer verletzt, arbeitete aber weiter, bis er am 26. April 1951 den erlittenen Verletzungen erlag.

H. Wüger



Union Internationale des Télécommunications, Genève