

# Die geschichtliche Entwicklung der Nebensprechtheorien

Von Wilhelm Klein, Berlin

Die Theorien der gegenseitigen Beeinflussung von Fernmeldeleitungen haben seit ihren Anfängen vor rund 40 Jahren vielfache Wandlungen und Umgestaltungen erfahren. Das wurde bedingt durch die ständige Entwicklung der Übertragungstechnik, aber auch durch die bessere Einsicht in den außerordentlich verwickelten Entstehungsmechanismus des Nebensprechens. Der vorliegende Aufsatz soll an Hand der Literatur eine Übersicht über diese Entwicklung geben. Dabei sind bei der Auswahl der besprochenen Arbeiten die zusammenfassenden Darstellungen bevorzugt, so daß also Prioritätsfragen nicht berücksichtigt sind.

## Einleitung

Das Nebensprechen, d. h. die gegenseitige Beeinflussung von Fernmeldeleitungen ist heute das Hauptproblem der Übertragungstechnik auf symmetrischen Leitungen. Immer dann, wenn Leitungen in einem Kabel oder auf einem Freileitungsgestänge ein größeres Stück parallel betrieben werden, tritt Energie aus einer der Leitungen in die anderen über und stört dort mehr oder weniger die Übertragung. Da für jede Übertragung eine bestimmte Güte gewährleistet werden muß, ist das höchstzulässige Verhältnis zwischen Störspannung und Nutzspannung in einer Leitung vorgeschrieben. Eine Vergrößerung der Zahl der Nachrichten, also eine Verbreiterung des übertragenen Gesamtfrequenzbandes würde aber eine Überschreitung der zulässigen Nebensprechspannung bringen, weil bei diesen Leitungen mit wachsender Frequenz das Nebensprechen ungünstiger wird. Eine solche bessere Ausnutzung der Leitungen ist daher nur möglich, wenn es gleichzeitig gelingt, z. B. durch konstruktive Maßnahmen oder durch besseren nachträglichen Ausgleich die Nebensprecheigenschaften der Linie zu verbessern.

Die technischen Gebilde, für die die Nebensprechtheorie heute in der Hauptsache von Interesse ist, sind in Bild 1 bis 4 dargestellt. Die Freileitungslinien mit zwei Leitungen (Bild 1) und drei oder mehr Leitungen

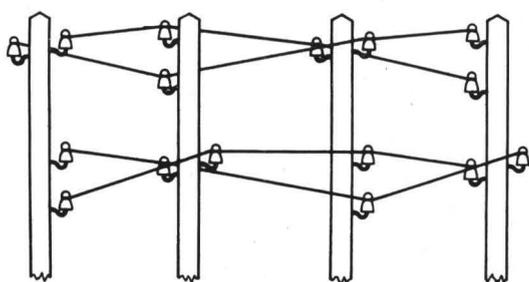


Bild 1. Doppel-Drehkreuzlinie

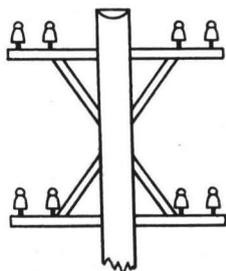


Bild 2. Mastbild der Vierfach-Trägerfrequenzlinie

(Bild 2) werden mit einer Höchsfrequenz von etwa 150 kHz betrieben. Bei der Doppel-Drehkreuzlinie beruht die Beseitigung des Nebensprechens u. a. auf der aus dem Bild ersichtlichen gegenseitigen Verdrehung der beiden Leitungen, die Vierfach-

Trägerfrequenzlinie besteht demgegenüber aus Paralleldrahtleitungen, die nach einem bestimmten Kreuzungsschema punktweise gekreuzt sind. Bild 3

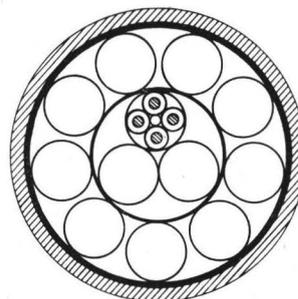


Bild 3. 24-paariges Trägerfrequenzkabel

zeigt ein verseiltes Trägerfrequenzkabel, das aus  $9 + 3 = 12$  Sternvierern besteht. Für die Gegenrichtung ist ein zweites gleiches Kabel erforderlich; die Beeinflussung dieser beiden nebeneinanderliegenden Kabel ist aber vernachlässigbar im Vergleich zu der der Leitungen innerhalb eines Kabels. Anders liegen die Dinge bei zwei koaxialen Kabeln (Bild 4), denn hier besteht jedes Kabel nur aus einer einzigen Leitung, so daß also ausschließlich das Nebensprechen zwischen den beiden Kabeln zu betrachten ist. Zwei derartige Kabel (jedes für eine Gesprächsrichtung) werden heute z. B. mit 960 Gesprächen in einem Frequenzband von 60 kHz bis 4028 kHz belegt.

Zwischen dem Nebensprechen der Freileitungen und der verseilten Kabel einerseits und dem der koaxialen Kabel andererseits besteht hinsichtlich der Entstehung ein grundlegender Unterschied. Bei den ersteren entsteht das Nebensprechen dadurch, daß die störende Leitung um sich herum ein elektrisches Feld

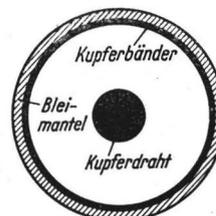


Bild 4. Koaxiales Kabel

und ein Magnetfeld erzeugt und daß durch diese beiden Felder die Energie auf die anderen Leitungen übertragen wird. Diese Energie wird um so größer, je höher die Frequenz ist. Anders ist es bei den koaxialen Kabeln. Hier dringen die Felder nur bei tiefen Frequenzen durch die Rohre hindurch und geben so Veranlassung zum Nebensprechen. Mit zunehmender Fre-

quenz jedoch verringern sich infolge der Stromverdrängung die durchdringenden Felder und damit das Nebensprechen immer mehr. Bei coaxialen Kabeln ist daher für das Nebensprechen die tiefste übertragene Frequenz die kritische. Das Nebensprechproblem hat demnach hier nicht die große wirtschaftliche Bedeutung, weil eine Vergrößerung der Gesprächszahl durch Erhöhung der höchsten übertragenen Frequenz keine Verschlechterung des Nebensprechens bedingt. Wir wenden uns aus diesem Grunde hier nicht weiter mit diesen coaxialen Kabeln befassen<sup>1)</sup>, sondern uns auf die ungeschirmten Leitungen beschränken, also auf die Freileitungen und die verseilten Kabelleitungen.

**Nahnebensprechen und Fernnebensprechen**

Die Theorie des Nebensprechens auf einem Leitungsbündel entwickelte sich kurz vor dem ersten Weltkrieg, als man erkannte, daß die sehr unerwünschte gegenseitige Beeinflussung der Leitungen durch die elektrischen und magnetischen Felder in ihrer Umgebung hervorgerufen wird. Bei dem niederfrequenten Betrieb einer Zweidrahtleitung ohne Verstärker wird auf der Leitung in beiden Richtungen gesprochen. Bei zwei derartigen Leitungen stören also nach Bild 5 sowohl das Nahnebensprechen *N* (stören-

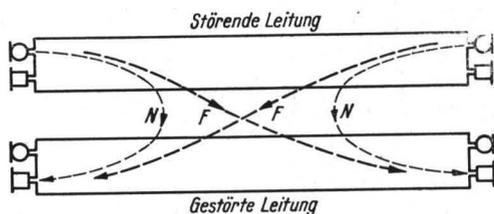


Bild 5. Nahnebensprechen *N* und Fernnebensprechen *F* beim Gegensprechen auf einer Doppelleitung (Niederfrequenzbetrieb)

der Sender und gestörter Empfänger am gleichen Ort) wie das Fernnebensprechen *F* (störender Sender und gestörter Empfänger an verschiedenen Enden der Leitungen). Bei Freileitungen ist das Nahnebensprechen wesentlich größer als das Fernnebensprechen, also genügt es hier, beim Niederfrequenzbetrieb sich mit dem Nahnebensprechen zu befassen. Für Kabelleitungen mit Zweidrahtverstärkern gilt das gleiche, und auch bei Vierdrahtleitungen ist zwischen den beiden Gesprächsrichtungen das Nahnebensprechen wirksam. Durch das Aufkommen der Trägerfrequenztechnik zwischen den beiden Weltkriegen bekam man aber die Möglichkeit, in allen Fällen das ungünstigere Nahnebensprechen zu vermeiden. Seit dieser Zeit ist dann vor allem die Theorie des Fernnebensprechens entwickelt worden.

**Die Theorie des Freileitungs-Nebensprechens**

Die grundlegende zusammenfassende Arbeit über das Nebensprechen bei Freileitungen stammt von K. W. Wagner [1] aus dem Jahre 1914. Sie behandelt an sich die Beeinflussung einer Fernmeldeleitung durch

Wanderwellen auf einer parallellaufenden Hochspannungsleitung, doch ist die Theorie so allgemein gefaßt, daß sie auch den praktisch viel wichtigeren Fall des Nahnebensprechens zweier Fernmeldeleitungen enthält. Besonders nachdrücklich hat Wagner dabei (wie auch in einem späteren Aufsatz [12] von 1934) auf die Vorteile des Begriffs der elektrischen Induktivität bzw. Gegeninduktivität an Stelle der Kapazität hingewiesen, weil diese elektrische Induktivität unter den hier vorliegenden Voraussetzungen proportional der üblichen magnetischen Induktivität ist und weil sie einfach aus den geometrischen Abmessungen zu berechnen ist. Dieser Begriff hat sich jedoch damals nicht eingebürgert. Erst in neuester Zeit [37] ist man wieder auf ihn zurückgekommen.

Eine wesentliche Verringerung des Nahnebensprechens ist durch Kreuzen der Leitungen zu erreichen. Daher untersuchte man damals die Theorie des Nahnebensprechens gekreuzter Paralleldrahtleitungen und es wurde die Kreuzungstechnik dieser Leitungen entwickelt (Pinkert 1919 [2], Vos u. Aurell 1936 [15]).

Inzwischen erwies es sich durch das Aufkommen der Freileitungsträgerfrequenztechnik als notwendig, auch das Fernnebensprechen zu untersuchen. Dabei zeigte sich die überraschende Tatsache, daß bei Vernachlässigung der inneren magnetischen Induktivitäten zwischen nur zwei Leitungen überhaupt kein Fernnebensprechen auftritt, weil in diesem Fall sich die vom elektrischen Feld und vom Magnetfeld herrührenden Anteile am fernen Ende genau aufheben. Diese Voraussetzung ist bei Freileitungen sehr gut erfüllt, andererseits war natürlich in der Praxis Fernnebensprechen zu beobachten. Auf der Suche nach einer Erklärung für diese Unstimmigkeit machte man denjenigen Anteil des Nahnebensprechens dafür verantwortlich, der durch Reflexionen an Anpassungsfehlern an das ferne Ende der gestörten Leitung gelangt. So stehen z. B. Vos u. Aurell [15] noch im Jahre 1936 ganz eindeutig auf diesem Standpunkt und auch heute noch wird z. T. die Bedeutung dieses reflektierten Nahnebensprechens überschätzt. Tatsächlich kann man es mit einiger Sorgfalt bei der Anpassung verhältnismäßig leicht soweit herabsetzen, daß es bedeutungslos wird.

Es hat lange gedauert, bis man den wirklichen Entstehungsmechanismus des Fernnebensprechens erkannte. Erst 1934 zeigte A. G. Chapman [9] in einer eingehenden Darstellung, daß bei Freileitungen das Fernnebensprechen durch doppeltes Nahnebensprechen über dritte Leitungen entsteht (Bild 6), und kurz

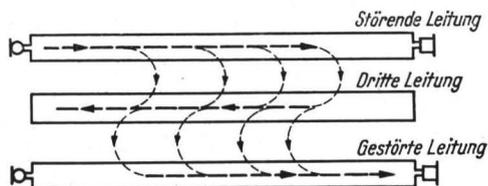


Bild 6. Entstehung des Fernnebensprechens durch doppeltes Nahnebensprechen über eine dritte Leitung

zuvor hatte H. Kaden [8] in einer Patentschrift, die sich mit dem Fernnebensprechen gekreuzter Freileitungen befaßt, ebenfalls diesen Mechanismus des Bild 6 vorausgesetzt. Man glaubte aber damals, als dritte Leitungen kämen vor allem die Viererphantome in Frage,

<sup>1)</sup> Als zusammenfassende Darstellung vgl. H. Kaden, Die elektromagnetische Schirmung in der Fernmelde- und Hochfrequenztechnik, Springer-Verlag 1950.

während man die unsymmetrischen Systeme vernachlässigen könne. Später zeigte sich jedoch [28, 32, 33], daß gerade diese an der Entstehung des Fernnebensprechens besonders beteiligt sind.

In der erwähnten Patentschrift [8] und später in [16] hatte K a d e n auseinandergesetzt, daß bei Freileitungen mit g l e i c h e n höchsten Kreuzungsindexen das Fernnebensprechen längenproportional ist und daß man es aus diesem Grunde in der Regel betrieblich nicht mehr beherrschen kann, während es bei v e r s c h i e d e n e n höchsten Kreuzungsindexen praktisch verschwindet. Allerdings ist die von K a d e n daraus abgeleitete Forderung, man solle g l e i c h e höchste Kreuzungsindexe in den Kreuzungsplänen der Leitungen unbedingt vermeiden, in der Praxis meist nicht zu verwirklichen. Aus dieser Schwierigkeit half erst der Vorschlag von F. R i n c k aus dem Jahre 1942, die längenproportionalen Anteile des Fernnebensprechens durch eine zusätzliche Kreuzung in der Mitte der beiden Leitungen zum Verschwinden zu bringen ([31], Seite 166). Diese Überlegungen gelten zwar zunächst für die gekreuzten Paralleldrahtleitungen, sie lassen sich aber leicht auf die Doppel-Drehkreuzlinien nach Bild 1 übertragen. Mit diesen Zusatzkreuzungen wurden daher während des zweiten Weltkrieges eine große Zahl von Doppel-Drehkreuzlinien mit bestem Erfolg in Betrieb genommen [29, 31]. Voraussetzung ist hierbei jedoch, daß die Linie nicht schon zusätzliche Kreuzungen durch grobe Baufehler enthält. Da das bei Doppel-Drehkreuzlinien leicht vorkommen kann, müssen diese Kreuzungsfehler vor dem Anbringen der R i n c k schen Zusatzkreuzungen aufgesucht [27] und beseitigt werden.

Die Notwendigkeit, die günstigste Bauweise der Doppel-Drehkreuzlinien zu finden, führte außerdem zur Entwicklung einer zahlenmäßigen Theorie des Nebensprechens dieser Linien, mit deren Hilfe man u. a. ein Berechnungsverfahren für das Fernnebensprechen aus den geometrischen Abmessungen erhielt. An einer 7 km langen Versuchslinie Rathenow—Premnitz konnte gezeigt werden, daß die so gewonnenen Rechenwerte überraschend gut mit den Meßwerten übereinstimmten [28]. Es war damit wohl erstmalig gelungen, das Fernnebensprechen eines Leitungsbündels formelmäßig darzustellen, so daß eine einfache zahlenmäßige Berechnung aus den Abmessungen möglich wurde. Später wurde das Berechnungsverfahren auch auf gekreuzte Paralleldrahtleitungen ausgedehnt. Für den Fall einer Vierfach-Trägerfrequenzlinie wurde das Verfahren an einer 20 km langen Versuchslinie Frankfurt (Oder)—Ziebingen geprüft und ebenfalls in ausgezeichneter Übereinstimmung mit den Meßwerten gefunden [32]. Da die Erweiterung auch auf größere Leitungszahlen ohne Schwierigkeit möglich ist, ist hiermit die Theorie des systematischen<sup>2)</sup> Nebensprechens auf Freileitungen geklärt.

#### Die Theorie des Nebensprechens verseilter Kabel

Eine ganz andere Entwicklung als die Freileitungstheorie hat die Theorie des Nebensprechens der verseilten Kabel genommen. Hier befaßte sich der grundlegende Aufsatz von K. K ü p f m ü l l e r aus dem

<sup>2)</sup> Das systematische Nebensprechen ist dasjenige, das sich bei Vernachlässigung aller Bauungenauigkeiten, also bei ideal genau gebauter Linie ergibt.

Jahre 1923 [3] entsprechend den damaligen praktischen Bedürfnissen mit den stark pupinisierten Leitungen und mit dem spulenzfeldweisen Ausgleich ihres Nahnebensprechens durch Zusatzkondensatoren. Bei diesen Leitungen kann man die induktive Beeinflussung vernachlässigen, es ist also nur die kapazitive wirksam. Daher lag es nahe, von den Maxwell'schen Teilkapazitäten zwischen den einzelnen Drähten auszugehen, weil man aus ihnen leicht die kapazitiven Kopplungen zwischen den einzelnen Leitungen erhalten kann. Allerdings bedeutet dieser Weg bei größeren Leitungsbündeln einen Verzicht auf die Berechnung der Kopplungen aus den geometrischen Abmessungen, denn es ist praktisch nicht möglich, ein System von vielen linearen Gleichungen (nämlich die Beziehung zwischen Teilkapazitäten und geometrischen Abmessungen) zahlenmäßig zu lösen<sup>3)</sup> [37]. Die Theorie des Nebensprechens auf Kabelleitungen hat sich daher bis in die letzte Zeit im wesentlichen darauf beschränken müssen, den Zusammenhang zwischen den gemessenen Kopplungen und dem Nebensprechen zu behandeln.

Mit der Verringerung der Pupinisierung bei den „leicht“ und „sehr leicht“ belasteten Leitungen<sup>4)</sup> ab etwa 1932 ergaben sich für das Nebensprechen sehr schwierige Probleme. Denn bei diesen Leitungen ist der induktive Anteil des Nebensprechens nicht mehr zu vernachlässigen; die Gegeninduktivität zweier Leitungen ist aber bei diesen Frequenzen, wie G. W u k k e l [11] in umfangreichen meßtechnischen Untersuchungen nachgewiesen hat, infolge der unvollkommenen Stromverdrängung im Bleimantel nicht mehr reell, sondern sie ist komplex und stark frequenzabhängig. Durch eine Berücksichtigung dieser Erscheinung würde eine zahlenmäßige Theorie des Nebensprechens außerordentlich verwickelt werden, so daß man sich damals auf qualitative Betrachtungen beschränkt hat.

Inzwischen ist man durch die Weiterentwicklung der Trägerfrequenztechnik über diesen unbequemen Frequenzbereich hinausgekommen (1939: U-System bis 60 kHz, 1950: V 60 bis 252 kHz, 1954: V 120 bis 552 kHz), so daß sich hier weitere Untersuchungen erübrigten. Bei den heute üblichen Höchsthäufigkeiten hat sich das Problem wieder wesentlich vereinfacht, denn die Stromverdrängung ist jetzt auch im Bleimantel praktisch vollständig, d. h. es sind in den Leitern keine Magnetfelder mehr vorhanden. Da man also die inneren Induktivitäten vernachlässigen kann, hat man bei diesen Trägerfrequenzkabeln die gleichen einfachen Verhältnisse wie bei Freileitungen (magnetischer und elektrischer Anteil des Fernnebensprechens kompensieren sich, das Fernnebensprechen kommt also bei richtigem Abschluß nur durch doppeltes Nahnebensprechen über dritte Leitungen zustande). Aus diesem Grunde ist auch bei den modernen verseilten Trägerfrequenzkabeln eine Berechnung des Nebensprechens aus den geometrischen Abmessungen grundsätzlich genau so möglich wie bei Freileitungen.

Bei der Durchführung dieser Nebensprechtheorie für Trägerfrequenzkabel ergeben sich allerdings zwei Schwierigkeiten. Erstens ist durch die Verseilung im

<sup>3)</sup> Formal läßt sich die Lösung bekanntlich mit Hilfe der Cramerschen Regel als Quotient zweier Determinanten hinschreiben, aber die tatsächliche Ausrechnung dieser Determinanten ist nur für Systeme von wenigen Gleichungen möglich.

<sup>4)</sup> Bei den sog. L- und S-Leitungen mit höchsten Übertragungsfrequenzen von 6 kHz bzw. 16 kHz.

Kabel der geometrische Aufbau wesentlich verwickelter als auf einem Freileitungsgestänge. Es zeigt sich jedoch, daß man bei der Berechnung der Gegeninduktivitäten durch geschickte Vernachlässigungen trotzdem zu hinreichend einfachen Formeln kommt. Wesentlich ernster ist aber die zweite Schwierigkeit, die darin besteht, daß infolge des engen Aufbaus im Kabel unvermeidliche Bauungenauigkeiten (wie z. B. Drahtverlagerungen) sich stark auf das Nebensprechen auswirken. Es entsteht dadurch zusätzlich ein sogenanntes systematisches Anteil des Nebensprechens, der häufig das systematische Nebensprechen, das bei ideal gebautem Kabel auftreten würde, sogar übertrifft. Der Berechnung aus den geometrischen Abmessungen ist natürlich nur der systematische Anteil zugänglich<sup>5)</sup>, weil nur für ihn die Drahtlage an jedem Punkt des Kabels bekannt ist. Über den zufälligen Kopplungsverlauf über die Länge infolge der Bauungenauigkeiten fehlt dagegen zunächst jeder Anhaltspunkt. Es ist daher sehr erwünscht, daß man umgekehrt mit Hilfe der Theorie aus den gemessenen Nebensprechwerten Aussagen über den Kopplungsverlauf im Kabel machen kann. Dabei geht man so vor, daß man den Kopplungsverlauf in eine Fourierreihe entwickelt, von der man einzelne Koeffizienten aus den Meßwerten errechnen kann [38]. Ein Teilproblem, nämlich das Nahnebensprechen bei sinusförmiger Kopplungsverteilung, ist bereits in der erwähnten Arbeit [3] von K ü p f m ü l l e r aus dem Jahre 1923 behandelt.

Näher untersucht ist bisher insbesondere das Imvierier-Fernnebensprechen. Für dieses Nebensprechen ist der Tauscheffekt<sup>6)</sup> kennzeichnend, über dessen Entstehung z. Z. allerdings noch die Meinungen auseinandergehen [30, 35]. Nach Ansicht des Verfassers [33, 38] beruht er im Vierer im wesentlichen darauf, daß das Fernnebensprechen durch doppeltes Nahnebensprechen über dritte Leitungen (nach Bild 6) zustandekommt und beim Leitungstausch sein Vorzeichen ändert. Er muß daher verschwinden, wenn man diesen längenproportionalen Anteil beseitigt; das ist durch Zusatzkreuzungen möglich, wie es bei Freileitungen nach dem obenerwähnten Vorschlag von F. R i n c k bereits üblich ist und wie es für Kabel in einer Patentschrift der AEG [21] aus dem Jahre 1941 vorgeschlagen wurde, allerdings ohne daß man sich damals die Wirkungsweise dieser Zusatzkreuzungen erklären konnte.

Eine zusammenfassende Theorie des Nebenvierier-Nebensprechens bei Trägerfrequenzkabeln fehlt noch. Aus ihr werden sich insbesondere die Vorschriften für die Wahl der Schlaglängenverhältnisse ergeben, wie sie zum Teil bereits seit langem bekannt sind [7, 10]. Auch bei diesem Nebensprechen gibt es einen Tauscheffekt, die hier jedoch im wesentlichen durch die Verschiedenheit der Wellengeschwindigkeit auf den Leitungen zustande kommt. Sie rührt von den geringen Unterschieden der Drahtlängen infolge der verschiedenen Schlaglängen der einzelnen Vierer her [36].

<sup>5)</sup> Entsprechende Berechnungen für das Imvierier-Fernnebensprechen bis 500 kHz in einem Trägerfrequenzkabel aus 12 Sternvierern wurden vom Verfasser und seinen Mitarbeitern im Institut für Schwingungsforschung der Technischen Universität Berlin durchgeführt und in befriedigender Übereinstimmung mit den Meßergebnissen gefunden.

<sup>6)</sup> Man versteht darunter die Erscheinung, daß man bei Vertauschen von störender oder gestörter Leitung andere Nebensprechwerte erhält. Dieser Tauscheffekt erschwert den Ausgleich des Nebensprechens nach der Auslegung des Kabels.

## Schrifttumsübersicht

(Zeitlich geordnet)

- [1] Wagner, K. W., Induktionswirkungen von Wanderwellen in Nachbarleitungen. ETZ 35 (1914) 639—643, 677—680, 705—708.
- [2] Pinkert, W., Induktionsschutz für Fernsprechleitungen, TFT 8 (1919) 4. Sonderheft, 108.
- [3] K ü p f m ü l l e r, K., Über das Nebensprechen in mehrfachen Fernsprechkabeln und seine Verminderung. Arch. Elektrotechnik 12 (1923) 160—203.
- [4] Carson, J. R. u. Hoyt, R. S., Propagation of periodic currents over a system of parallel wires. Bell Syst. Techn. J. 6 (1927) 495—545.
- [5] Doebke, W., Das Nebensprechen in Fernsprechkabeln. ENT 8 (1931) 63—76.
- [6] Jordan, H., Über die Beseitigung von Störgeräuschen in beeinflussten Fernsprechkabelleitungen. ENT 8 (1931) 422—430.
- [7] Schiller, H., Über Nebensprechstörungen in Fernsprechkabeln. ENT 8 (1931) 114—121 und ENT 9 (1932) 81.
- [8] Kaden, H., Verfahren zum Nebensprechausgleich von mit Trägerfrequenz betriebenen und auf dem gleichen Gestänge angeordneten Fernmeldefreileitungen. DRP 666 795 vom 13. 12. 1933 (Anmelder: Siemens & Halske AG.).
- [9] Chapman, A. G., Open wire crosstalk. Bell Syst. Techn. J. 13 (1934) 19—58, 195—238.
- [10] Sieber, K. u. Schlump, K., Beitrag zur Theorie des Aufbaus störungsarmer Fernsprechkabel. ENT 11 (1934) 119.
- [11] Wuckel, G., Komplexe magnetische Nebensprechkopplungen in Fernsprechkabeln. ENT 11 (1934) 157 — Entstehung und Wesen der magnetischen Nebensprechkopplungen im Fernsprechkabel, Europ. Fernsprechdienst 34 (1934) 18.
- [12] Wagner, K. W., Grundsätzliches über elektromagnetische Kopplungen zwischen parallelen Leitern. Europ. Fernsprechdienst 36 (1934) 147—156.
- [13] Droste, H. W., Das Neumeyer-Buch, Nürnberg 1934.
- [14] Kaden, H., Über die Betriebs- und Kopplungskapazitäten zwischen den Leitungssystemen eines Vierers. Arch. Elektrotechnik 29 (1935) H. 9 oder Veröff. Nachrichtentech. 5 (1935) 3. Folge, 149—154.
- [15] Vos, M. u. Aurell, C. G., Methods for Increasing Cross-Talk Attenuation between Overhead Lines. Ericsson Technics (1936) Nr. 6 113—149.
- [16] Kaden, H. u. Kaufmann, H., Das Nebensprechen bei Freileitungen für Trägerfrequenzsysteme. TFT 27 (1938) 566—577 oder Veröff. Nachrichtentech. 9 (1939) 1. Folge, 17—25.
- [17] Kaden, H., Das Nebensprechen zwischen unbelasteten Leitungen in Fernsprechkabeln. Europ. Fernsprechdienst 49 (1938) 173—180 oder Veröff. Nachrichtentech. 8 (1938), 439—446.
- [18] Widl, E., Quer- und Längsausgleich an in Betrieb befindlichen Fernkabelleitungen. Europ. Fernsprechdienst 52 (1939) 162.
- [19] Sommer, F., Die Berechnung der Kapazitäten bei Kabeln mit einfachem Querschnitt. ENT 17 (1940) 281—294 oder Veröff. Nachrichtentech. 10 (1940) 3. Folge, 49—62.
- [20] Meyer, U., Kopplungen. Europ. Fernsprechdienst 58 (1941) 181—189.
- [21] Germer, K., Kremer, P. u. Rist, H., Verfahren zum Ausgleich vom magnetischen Gegenübersprechkopplungen. DRP 736 242 vom 7. 3. 1941 (Anmelder: Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft).
- [22] Kaden, H. u. Ellenberger, G., Die zulässigen Bauungenauigkeiten bei Freileitungen für Trägerfrequenzsysteme. Europ. Fernsprechdienst 58 (1941) 235—247 oder Veröff. Nachrichtentech. 11 (1941) 2. Folge, 19—31.
- [23] Schmid, H., Entstehung und Wesen des Nebensprechens zwischen Fernsprechleitungen. Fernmelde-Ingenieur 1 (1941) H. 11.
- [24] Schmid, H., Der konzentrierte Ausgleich des Fernnebensprechens bei vielpaarigen Fernsprechkabeln. TFT 31 (1942) 229.
- [25] Schmid, H., Die Technik des Nebensprechausgleichs bei Fernsprechkabeln. Fernmelde-Ingenieur 3 (1943) H. 3 und 4.
- [26] Ellenberger, G., Die Absorptionsspitzen der Leitungsdämpfung von Freileitungen. TFT 32 (1943) 75—83.
- [27] Klein, Wilh., Das Aufsuchen der groben Baufehler bei Drehkreuzleitungen. TFT 32 (1943) 125—127.
- [28] Klein, Wilh., Das systematische Nebensprechen bei Drehkreuzleitungen. Postarchiv 72 (1944) H. 3 und 4.
- [29] Klein, Wilh., Die Doppeldrehkreuzlinie für Trägerfrequenzbetrieb. Elektrotechnik 1 (1947) 28—32.
- [30] Wuckel, G. u. Wolff, W., Pupinisierte Trägerfrequenzkabel. A.E.U. 2 (1948) 343—357; 3 (1949) 11—23.
- [31] Klein, Wilh., Trägerfrequenztechnik. Akad. Verlagsges., Leipzig 1949.
- [32] Klein, Wilh., Das Nebensprechen auf einem Freileitungsgestänge. A.E.U. 4 (1950) 293—300, 361—366.
- [33] Klein, Wilh., Das Fernnebensprechen im Vierer eines Sternviererkabels. A.E.U. 5 (1951) 414—421.
- [34] Klein, Wilh., Das Nebensprechen bei Leitungen mit beliebiger Kopplungsverteilung. FUNK UND TON 6 (1952) 57—63.
- [35] Wedemeyer, E., Symmetrische Trägerfrequenzkabel für Höchstaussnutzung. Wissenschaftliche Berichte III 2, Verlag Technik, Berlin 1952.
- [36] Goedicke, E., Über die Verschiedenheit der Winkelkonstanten bei symmetrischen Trägerfrequenzkabeln. F&G-Rdsch. H. 34 (1952) 8—13.
- [37] Klein, Wilh., Die Kopplungen in einem Leitungsbündel. A.E.U. 7 (1953), 143—155.
- [38] Klein, Wilh., Die Theorie des Imvierier-Fernnebensprechens. A.E.U. 8 (1954) 155—162.