



ETG - Kabelseminar für Spannungen ≥ 20 kV

Dienstag 10. März und Mittwoch 11. März 1992

ETH-Zentrum, Zürich

Elektromagnetische Felder von Kabelanlagen

Elektromagnetische Felder und ihr Einfluss auf die Gesundheit des Menschen sind zu einem wichtigen Kriterium der Beurteilung der Umweltverträglichkeit energietechnischer Einrichtungen geworden.

Das Referat zeigt einerseits die Feldstärken im Umfeld von Kabelanlagen verschiedener Konfigurationen und erläutert andererseits den aktuellen Erkenntnisstand zu den biologischen Wirkungen der Felder.

Reinhold Bräunlich, Dipl. EI.-Ing. ETHZ Fachkommission für Hochspannungsfragen (FKH)

- 1982 Diplom als Elektroingenieur an der ETH in Zürich, Energietechnik/Elektronik
- 1982-83 Brown Boveri & Cie AG, Baden, Versuchsingenieur im Hochspannungslabor (Entwicklungsversuche an Ueberspannungsableiter)
- 1983-90 ETH-Zürich, Assistent und wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Fachgruppe Hochspannungstechnik
- seit 1990 Wissenschaftlicher Mitarbeiter des FKH

Dr. Gianni Biasiutti, Dipl. EI.-Ing. ETHZ Bernische Kraftwerke AG, Bern

- 1978 Diplom als Elektroingenieur an der ETH in Zürich
- 1978-84 Doktorat (gasförmige Isolierstoffe)
- 1984-88 Dätwyler AG, Altdorf: Entwicklung Energietechnik
- seit 1988 BKW, Bern: Elektromechanische Abteilung

1. Einleitung

Die Motivation zum Studium elektromagnetischer Felder von Kabelanlagen und generell auch von anderen elektrischen Energieeinrichtungen entspringt in erster Linie der Frage nach den Auswirkungen auf die technische und biologische Umwelt. Während die Mechanismen der gegenseitigen elektromagnetischen Beeinflussung elektrischer Einrichtungen bekannt sind, bleibt bis heute unklar, ob Auswirkungen niederfrequenter elektromagnetischer Felder auf lebende Organismen bestehen. Zumal die Suche nach diesbezüglichen Wirkungsmechanismen wenig erfolgreich war, werden gegenwärtig vermehrt Anstrengungen zur Klärung dieser Frage unternommen.

In der Schweiz werden Hochspannungskabel praktisch ausschliesslich unter der Erdoberfläche und mit koaxialen Isoliersystemen, d.h. mit elektrostatischen Schirmen eingesetzt. Sie stellen damit keine Quellen elektrischer Felder dar. Der vorliegende Beitrag beschränkt sich deshalb auf die Betrachtung der *Magnetfelder*.

Zu Beginn der Ausführungen werden Eigenschaften und Grössenordnungen der von Kabelanlagen ausgehenden Magnetfelder diskutiert. Dabei werden die feldbestimmenden Faktoren aufgezeigt und verschiedene Kabelverlegearten einander gegenübergestellt.

Im weiteren erfolgt ein Vergleich zu den Verhältnissen bei Freileitungen und eine Bewertung der im Umfeld von Energiekabeln entstehenden Feldstärken. Schliesslich wird der heutige Stand des Wissens über biologische Wirkungen kurz erläutert.

Ausgeschlossen von den Betrachtungen sind im vorliegenden Beitrag kurzzeitig auftretende elektromagnetische Felder (oder Felderhöhungen) aufgrund von transienten Vorgängen (Kurzschlüsse, atmosphärische Einwirkungen, Schalthandlungen). Die Beeinflussungsmechanismen dieser impulsartigen Felder auf benachbarte technische Systeme sind vielfältig; es wird hierbei auf ausführliche Fachliteratur verwiesen. Davon abgesehen besteht Grund zur Annahme, dass die unmittelbare Wirkung transientser Felder auf die lebende Umwelt gegenüber dauernder Feldeinwirkung vernachlässigt werden kann.

2. Grundlegende Eigenschaften magnetischer Felder von Drehstromleitungen

Das magnetische Wirkungsfeld um stromdurchflossene Leiter kann grundsätzlich durch zwei physikalisch verschiedene Feldgrössen beschrieben werden: die magnetische Feldstärke \underline{H} in $[A/m]$ und die magnetische Flussdichte oder Induktion \underline{B} in Tesla $[1 T = 1 Vs/m^2]^1$.

Der Zusammenhang zwischen der Flussdichte (auch B-Feld) und der Feldstärke (auch H-Feld) ist durch nachstehende Beziehung gegeben:

$$\underline{B} = \underline{H} \cdot \underline{\mu_0} \cdot \underline{\mu_r} \quad (\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} Vs/Am \cong 1.26 \cdot 10^{-6} Vs/Am)$$

1) Für das Magnetfeld H ist auch die Einheit Oersted ($1 Oe = 10^3/4\pi A/m$), für die magnetische Flussdichte B auch die Einheit Gauss ($1 G = 10^{-4} Vs/m^2$) üblich.

Da in den folgenden Ausführungen keine ferromagnetischen und anisotropen Materialien betrachtet werden¹⁾, kann die relative Permeabilität $\underline{\mu_r}$ stets als skalare Zahl "1" angesehen werden. Damit besitzen Angaben über H- und B-Felder grundsätzlich gleiche Aussagekraft. Werte beider Feldgrößen können mit obiger Beziehung in die jeweils andere Feldgröße umgerechnet werden.

Magnetische Felder werden nur von ausgedehnten elektrisch gut leitenden Objekten und ferromagnetischen Materialien, wie z.B. Eisenarmierungen, Dachrinnen und Wasserleitungen, merklich beeinflusst. **Magnetische Felder von Kabeln und Freileitungen dringen deshalb praktisch ungehindert in Gebäude ein.**²⁾

B-Felder in der Umgebung von Drehstromleitungen verändern sich periodisch mit der Netzfrequenz (50 Hz), wobei nicht nur ihre Intensität oszilliert, sondern sich auch die Feldrichtung pro Netzperiode (20 ms) einmal um 360° dreht. Werden B-Felder durch rotierende Pfeile dargestellt, so beschreiben die Pfeilspitzen Ellipsen, welche in der Ebene senkrecht zur Leitungsachse liegen. Dieser Sachverhalt ist in den Figuren 1 und 2 dargestellt.

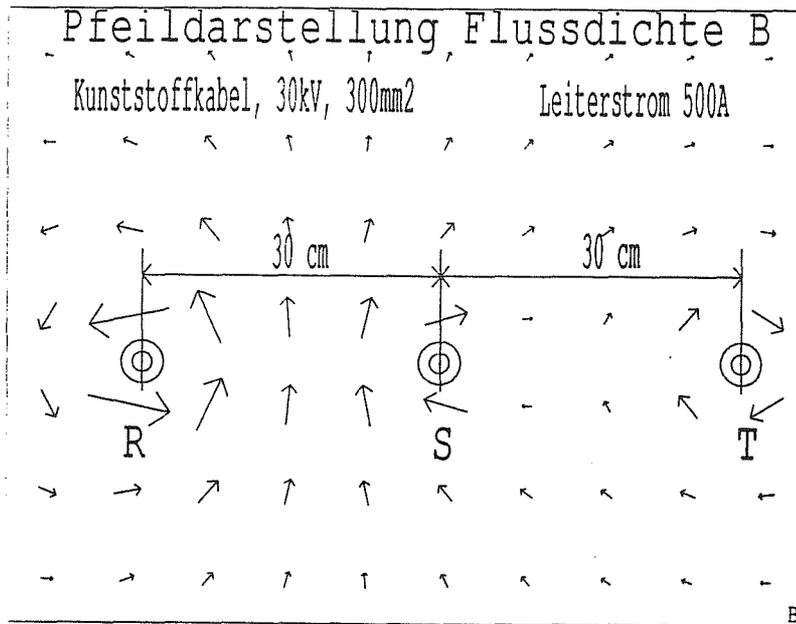
Die magnetische Induktion eines Dreiphasensystems verhält sich *proportional zum übertragenen Strom* und kann deshalb je nach Lastsituation von Null bis zum Wert entsprechend dem maximal zulässigen Strom variieren.

Die magnetische Flussdichte von langen geraden Leitungsstücken kann in guter Näherung als zweidimensionales Feld betrachtet werden. Fließen in allen betrachteten Leitern sinusförmige Ströme der selben Frequenz, so werden für die Beschreibung des B-Felds mit komplexen Größen in der Ebene vier Parameter benötigt³⁾. Bei den vorliegenden Berechnungen wird jedoch stets nur der *Effektivwert* des Drehfelds angegeben; es ist dies der *quadratische Mittelwert der Momentanfeldstärke über eine Netzperiode*.

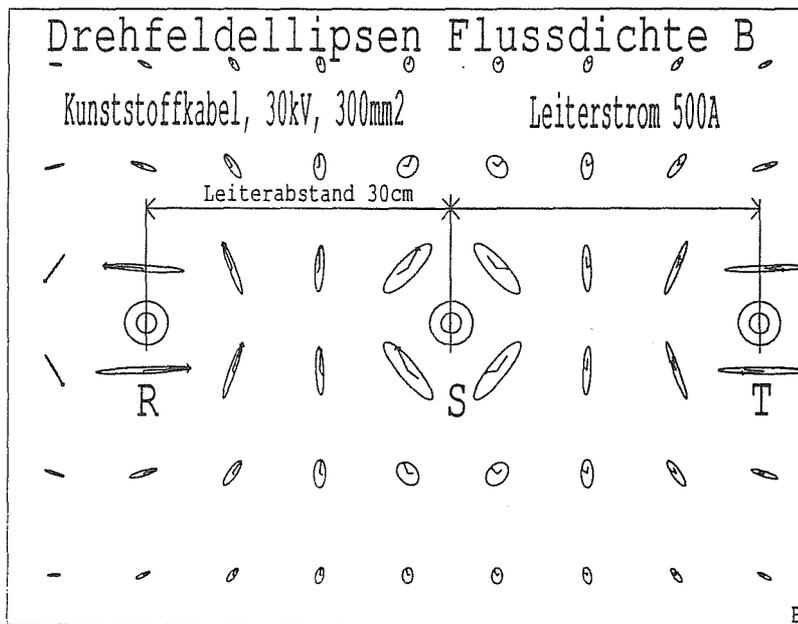
Das Verhältnis des B-Feld-Maximalwerts einer Netzperiode zum Effektivwert \hat{B}/B_{eff} nimmt Werte zwischen 1 und $\sqrt{2}$ an. An Oberflächen von Materialien mit sehr hoher Permeabilität gilt stets der Wert $\sqrt{2}$, da nur eine Feldrichtung senkrecht zur Oberfläche auftritt. Die kleine Halbachse der Ellipse wird zu Null. Der Wert 1 ergibt sich für den Spezialfall, dass die Ellipse gleichlange Halbachsen besitzt, womit sie zu einem Kreis entartet.

Figur 1 enthält ein Resultat einer Computerberechnung von *Momentanwerten* der magnetischen Flussdichte in der Umgebung eines Dreiphasensystems bestehend aus nebeneinanderliegenden einzelnen Kabeladern im Abstand von 30 cm. Die Feldvektoren im gezeigten Ausschnitt sind für den Zeitpunkt des Strommaximums in der Phase R dargestellt.

-
- 1) Mit Ausnahme von Abschnitt 3.5: "Einfluss ferromagnetischer Kabelarmierungen".
 - 2) Elektrische Felder hingegen werden bereits durch schwach leitende Objekte, wie der Pflanzenbewuchs und das Mauerwerk stark abgeschwächt.
 - 3) In zwei Raumrichtungen je eine Phase und eine Amplitude; beziehungsweise je ein Real- und ein Imaginärteil.



Figur 1 Pfeildarstellung des magnetischen Drehfelds in der Umgebung einer Kabeldrehstromleitung mit Einleiterkabeln. Festgehalten wurde der Zeitpunkt des Strommaximums an der Phase R. Die Pfeile stellen die momentane magnetische Flussdichte B an diskreten Punkten der Querschnittsebene dar (Ausgangspunkte der Pfeile). Die Pfeillängen sind proportional zum Momentanwert des Betrags. Die Richtungen der Pfeile zeigen den *räumlichen* Winkel des B -Felds an. (Diese Darstellung darf nicht mit der von Wechselstromgrößen her bekannten komplexen Zeigerdarstellung verwechselt werden).



Figur 2 Drehfeld-Ellipsendarstellung für das gleiche Kabelsystem wie in Figur 1: Die Pfeile innerhalb der Ellipsen zeigen Richtung und Betrag des Realteils an, die kurzen Striche zeigen die Richtung des Imaginärteils (zeitliche Verschiebung um 90°) an. Der Imaginärteil ist zur besseren Sichtbarkeit verkürzt gezeichnet und müsste massstäblich gesehen wie der Realteil bis zum Ellipsenrand reichen. Aus technischen Gründen konnte das Feld nicht in den selben Punkten wie in Figur 1 ausgewertet werden.

Für den selben Feldausschnitt wie Figur 1 wird in Figur 2 eine Computerdarstellung gezeigt, welche die *gesamte Information* des B-Wechselfelds in diskreten Raumpunkten enthält: Die dargestellten Ellipsen sind geometrische Ortskurven welche die Feldvektoren während einer Netzperiode beschreiben.

Berechnungsmethoden

Die Berechnung magnetischer Felder von gestreckten Leitern in einem elektrisch schlecht leitfähigen Medium konstanter Permeabilität kann bekanntlich leicht analytisch durchgeführt werden. Wird der Strom als Vektor eingeführt, so ergibt sich das B-Feld eines Leiters in einem beliebigen Raumpunkt aus der Beziehung

$$\vec{B} = \mu / (2\pi r^2) \cdot \vec{I} \times \vec{r} .$$

\vec{r} ist der Ortsvektor von der Leiterachse zum betrachteten Punkt. Nach dem Feldüberlagerungsprinzip werden die Beiträge jedes Leiters eines Kabelsystems vektoriell addiert. Sind die Ströme sinusförmig und besitzen sie die selbe Frequenz, dann können sie als komplexe Größen in obige Beziehung eingesetzt werden. Horizontal- und Vertikalkomponente des B-Felds erhalten damit je einen Real- (\Re) und Imaginärteil (\Im).

Der Effektivwert des Felds ergibt sich zu $B_{eff} = |\underline{B}| = \sqrt{(\Re B_x)^2 + (\Im B_x)^2 + (\Re B_y)^2 + (\Im B_y)^2}$.

In einigen der behandelten Beispiele wurde für die Berechnungen der Magnetfelder das Computerprogramm "*Magneto*" von Integrated Engineering Software Inc., Winnipeg verwendet. Dieses Programm erlaubt die Berechnung zweidimensionaler und axial-symmetrischer Felder mittels des gegenüber obiger Beziehung allgemeineren Elementarsatzes von Laplace:

$$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \iiint_V \frac{1}{r^3} (\vec{j} \times \vec{r}) dV$$

dabei ist: \vec{r} der Ortsvektor vom stromdurchflossenen Volumenelement zum betrachten Punkt im Raum,
 \vec{j} die Stromdichte im Volumenelement.

Das Programm Magneto löst auch die Feldgleichungen für Anordnungen mit Zonen unterschiedlicher Permeabilität. Es besitzt eine graphische Benutzeroberfläche und arbeitet unter dem Betriebssystem DOS. Alle Berechnungen wurden mit einem Arbeitsplatzrechner basierend auf den Intel-Prozessoren 80386/80387SX ausgeführt. Heutzutage sind eine ganze Reihe Programme auf dem Markt erhältlich, welche sich für die Berechnung elektrischer und magnetischer Felder in der elektrischen Energietechnik eignen.

Messung magnetischer Felder von Kabelanlagen

Obwohl bisher nur wenige Magnetfeldmessungen an Kabelanlagen publiziert wurden, sind solche Messungen schnell und einfach durchzuführen. Handelsübliche tragbare Geräte besitzen typische Empfindlichkeiten von einigen nT (nano-Tesla). Dieser Wert liegt in der Regel unterhalb von Hintergrundfeldern in bewohnten Gebieten. Einige der Geräte messen die Felder in allen drei Raumrichtungen und besitzen auch Messwertspeicher, so dass Magnetfeldbelastungen über längere Zeit registriert werden können.

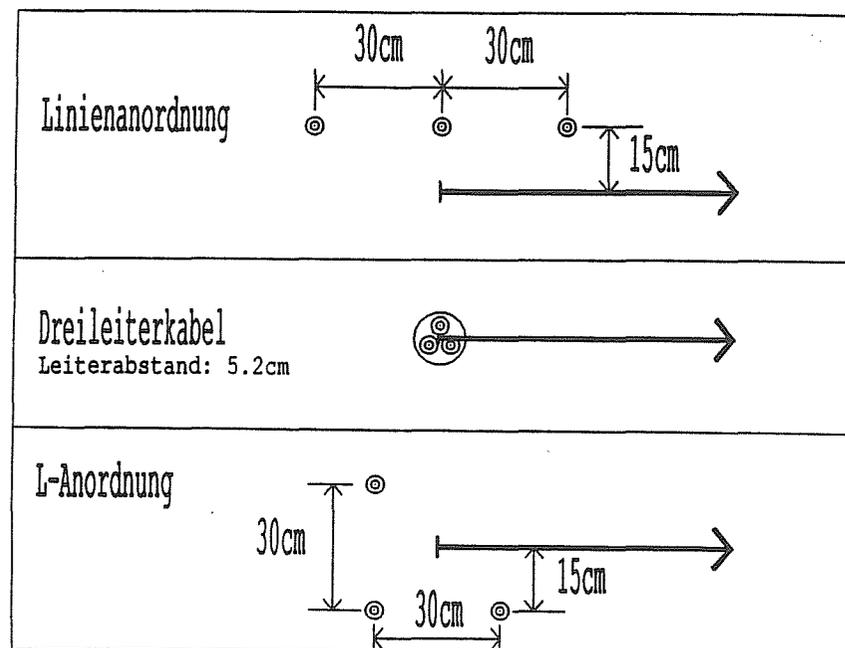
Gemessene und näherungsweise berechnete Felder weichen zumindest im Nahbereich von einigen Metern Abstand zur Leitungsachse nur um wenige Prozente voneinander ab (P.S. Neelakanta, R. Lordan, V. Ungvichian, P.F. Wahid, 1991).

3. Beispiele von Kabelanordnungen, B-Feld-bestimmende Faktoren

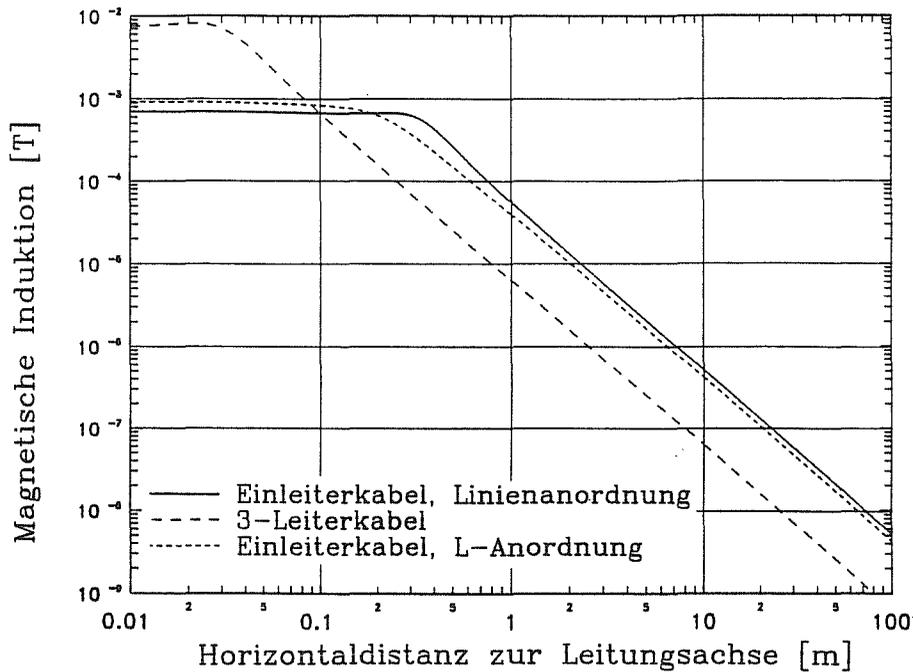
Für die Quantifizierung der für Personen relevanten B-Feld-Emissionen einer Energieleitung ist die Betrachtung von *horizontalen Querprofilen zur Leitungsachse in einer Höhe von einem Meter über Boden* sehr verbreitet. Die meisten folgenden Beispiele zur Illustration von Einflussfaktoren auf die B-Felder von Kabelanlagen wurden deshalb in Form solcher Profile dargestellt.

3.1 Gegenüberstellung Einleiterkabel, Dreileiterkabel

Aufgrund des sehr geringen Abstands zwischen den einzelnen Leitern erzeugen Dreileiterkabel bereits ab einem halben Meter Distanz von der Leitungsachse um etwa eine Größenordnung kleinere Flussdichten als Einzelleiterkabel mit typisch 30 cm Leiterabstand. Figur 4 enthält einen entsprechenden Vergleich.



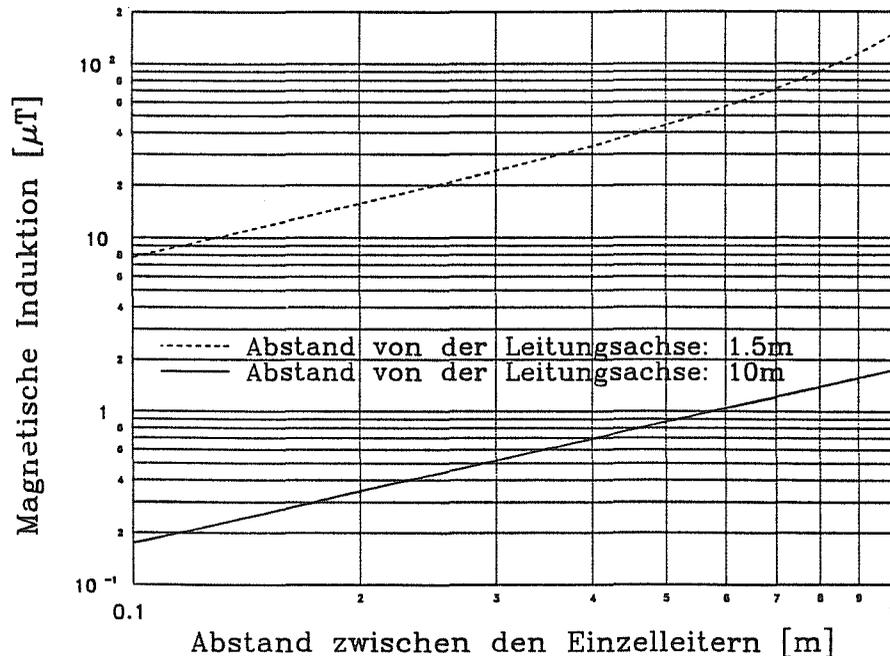
Figur 3 Typische geometrische Leiteranordnungen bei zwei Einzelleiterkabeln und einem Dreileiterkabel. Die ausgezogenen Pfeile definieren den Startpunkt und die Richtung der in Figur 4 aufgetragenen B-Feld-Querprofile. Zur besseren Vergleichbarkeit der Profile der beiden Einzelleiterverlegungsarten wurde bei der Linienanordnung in Anlehnung zur L-Anordnung ein minimaler Abstand zwischen Leiter und Profil von 15 cm gewählt.



Figur 4 Vergleich von B-Feld-Querprofilen bei einem Dreileiterkabel und zwei typischen Anordnungen mit Einleiterkabeln gemäss Figur 3. Die Betriebsströme betragen bei allen Geometrien 500 A. Die Darstellung demonstriert die quadratische Abnahme des B-Felds mit der Distanz zur Leitungsachse (zwei Dekaden in y-Richtung für eine Dekade in x-Richtung).

3.2 Einfluss des Leiterabstands

Für grosse Entfernungen von der Leitungsachse (verglichen mit dem Abstand zwischen den Einzelleitern) verhält sich die magnetische Flussdichte **proportional zum Abstand zwischen den Einzelleitern** (Figur 5). Felder von Drehstromsystemen simulieren für grosse Entfernungen Dipolfelder. In jedem Moment bildet einer der Leiter den Hinleiter und die anderen zwei den Rückleiter. Der Abstand zwischen Hinleiter und Schwerpunkt der Rückleiter bestimmt das Dipolmoment. Es ist deshalb proportional zum Abstand der Einzelleiter.



Figur 5 Magnetische Induktion 1.5 m und 10 m über einer Kabelleitung in Linienanordnung bei 500 A Betriebsstrom in Funktion der Abstände von den äusseren Leitern zum Mittelleiter.

3.3 Magnetische Flussdichten bei Mehrsystem-Kabelanlagen

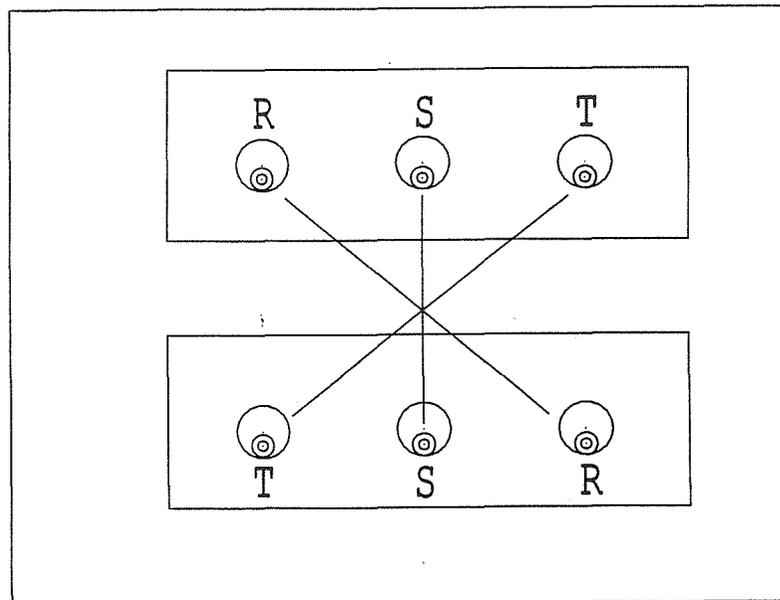
Besteht eine Kabelleitung aus mehreren Drehstromsystemen, treten durch ungleiche und wechselnde Lasten Phasenverschiebungen zwischen den gleichnamigen Phasen verschiedener Systeme auf. Solche Phasenverschiebungen wirken sich auf den Effektivwert des gemeinsamen magnetischen Flussdichtefelds aus. Die B-Felder der einzelnen Systeme können sich je nach Betriebszustand und Konfiguration gegenseitig verstärken oder auch aufheben.

Das resultierende B-Feld einer aus mehreren Systemen bestehenden Leitung hängt von den einzelnen **Systemströmen** von der **Phasenlage** und der **Leitergeometrie** ab. Bei einer Doppelstranganlage lassen sich folgende Grenzen für das überlagerte Feld der beiden Systeme angeben:

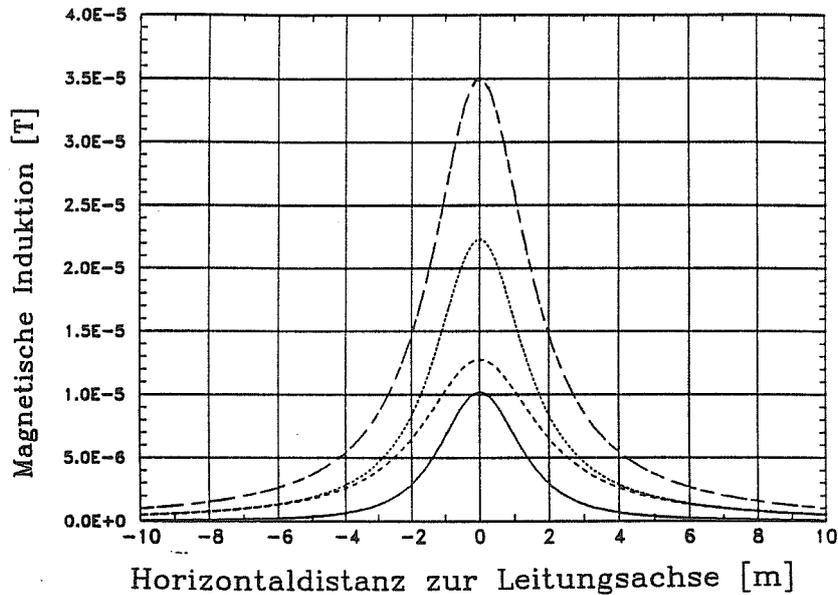
Bei ungünstigster Phasenlage und Leiteranordnung kann der resultierende B-Feld-Effektivwert **höchstens die Summe** der entsprechenden Werte jedes einzelnen Systems erreichen. Bei günstigster gegenseitiger Phasenlage und Leiteranordnung ist der resultierende B-Feld-Effektivwert **mindestens so gross wie die Differenz** der entsprechenden Werte jedes einzelnen Systems.

Niedrige Werte im B-Feld von Mehrsystemleitungen werden insbesondere dann erreicht, wenn die Phasen aller Systeme so angeordnet werden, dass die geometrischen Schwerpunkte der Leiter aller vorkommenden Phasenlagen zusammenfallen.

Die Figuren 6,7 und 8 zeigen den Einfluss der Betriebszustände und Phasenlagen auf die magnetische Flussdichte einer solchen Anordnung bestehend aus zwei Systemen.



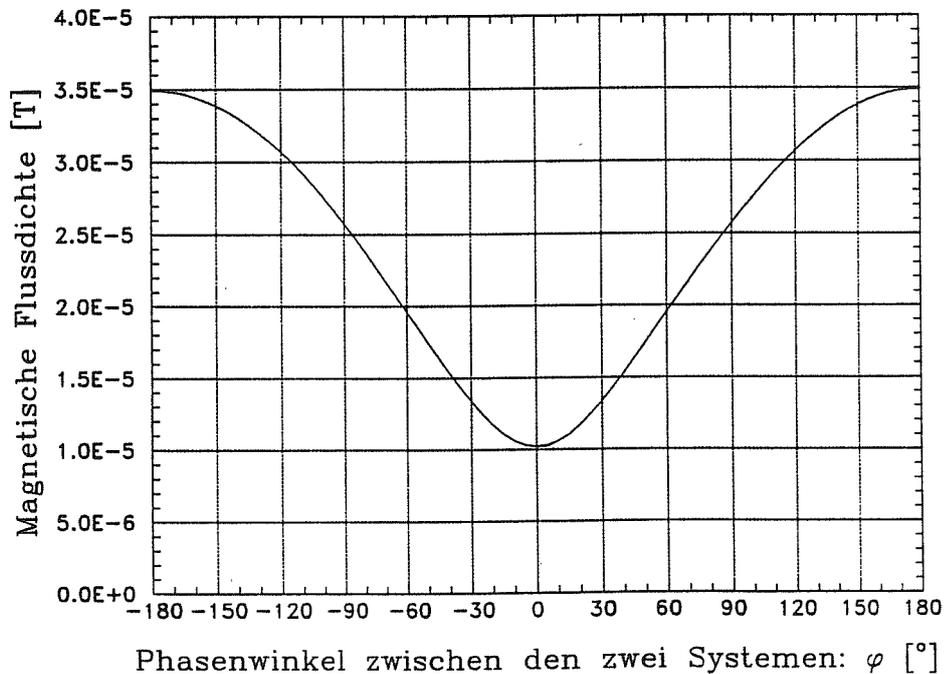
Figur 6 Querschnitt einer Leiteranordnung bei zwei Kabelsystemen für niedrige B-Feldwerte: Der Schwerpunkt der gleichphasigen Einzelleiter fällt für jede Phasenlage auf einen gemeinsamen Punkt.



Figur 7

B-Feld-Querprofile für 2 Drehstrom Kabelsysteme nach der geometrischen Leiteranordnung von Figur 6. Die gezeichneten Profile beziehen sich auf eine Höhe von 1.5 m über dem oberen Leitungssystem. Die Ströme betragen jeweils 500 A. Es werden nachstehende Phasenfolgen und Betriebszustände dargestellt:

- Optimale Phasenfolge nach Figur 6.
- - - Nur unteres System in Betrieb.
- · · Nur oberes System in Betrieb.
- · - Gleiche Phasenfolge in beiden Systemen - und auf der selben Kurve liegend: Optimale Phasenfolge (wie ausgezogene Linie), aber Ströme fließen gegenläufig (Phasenverschiebung 180°).



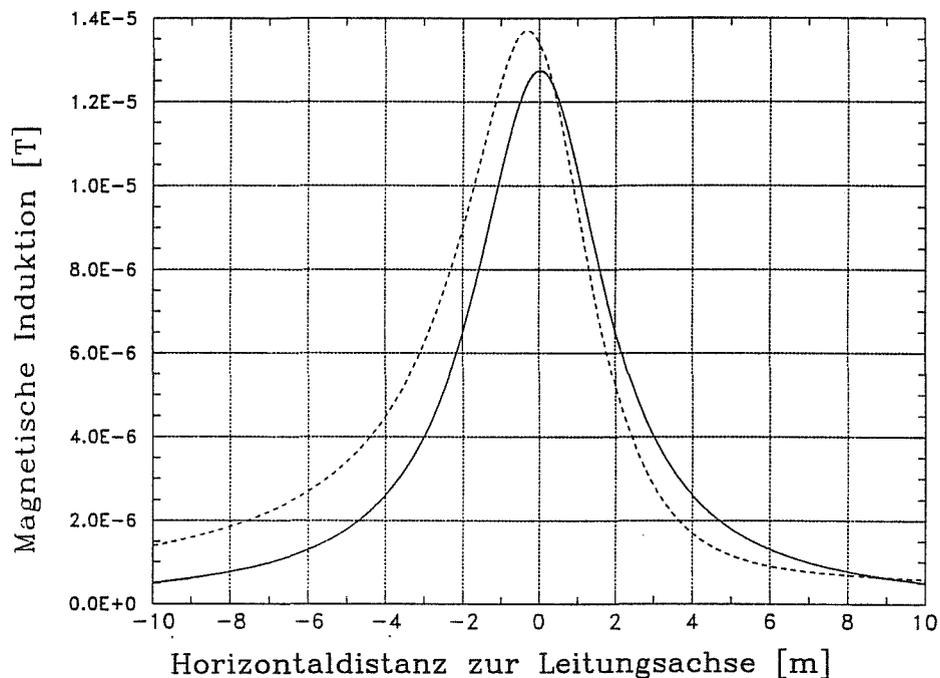
Figur 8

Einfluss des Phasenwinkels zwischen zwei Leitersystemen auf den Effektivwert des gemeinsamen B-Felds. Der Betriebsstrom beträgt in beiden Systemen 500 A. Die geometrische Anordnung der beiden Kabelsysteme entspricht der von Figur 6. Dargestellt ist der Effektivwert an einem Referenzpunkt 1.5 m über der mittleren Phase des oberen Systems.

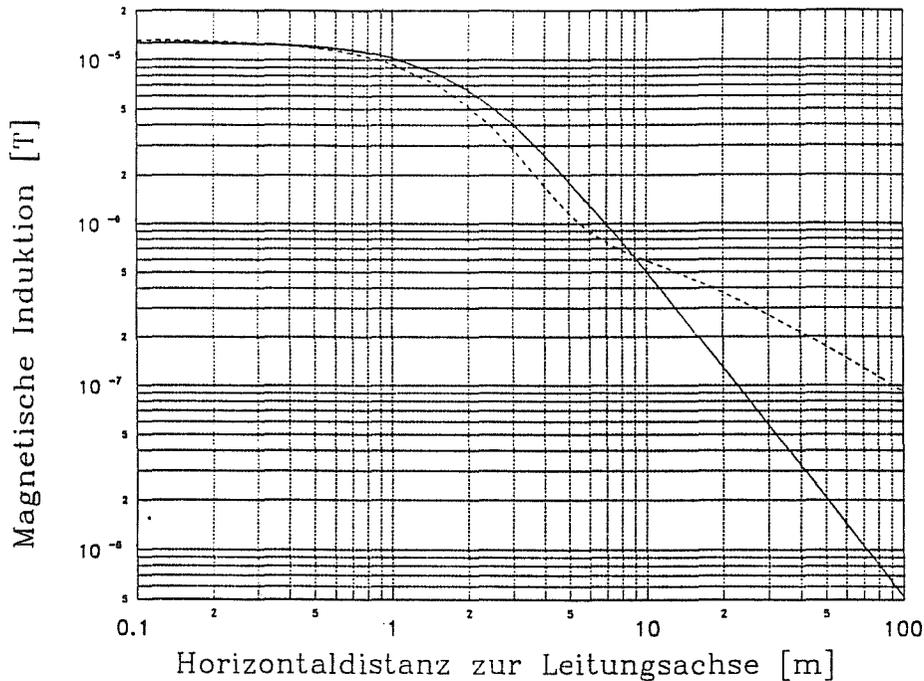
3.4 Die Wirkung von Summenströmen

Ströme in einem *symmetrischen* Dreiphasensystem verursachen ein mit zunehmender Entfernung *invers quadratisch* abfallendes B-Feld. Ein nicht verschwindender *Summenstrom* erzeugt hingegen ein *linear* abfallendes B-Feld. Als Summenstrom sind dabei die Ströme der Innenleiter und deren Schirme gemeinsam zu betrachten.

Bei zweiseitiger Schirmerdung fließt nur ein Teil eines allenfalls vorhandenen Summenstroms durch die Kabelschirme oder den PEN-Leiter zurück. Der Restanteil des Stroms findet seinen Weg über den Erdboden, über Wasser- und Telefonleitungen und über andere Energieübertragungsleitungen. Durch die Überlagerung dieses Feldanteils mit dem Drehfeld entsteht im Nahbereich von einigen Metern auch bei symmetrischer Leitergeometrie eine räumlich unsymmetrische Feldstärkeverteilung (Figur 9). Obwohl der Summenstrom normalerweise sehr niedrig ist, kann sein B-Feldanteil bereits in einigen Metern Abstand zur Kabelachse jenen der symmetrischen Leiterströme übersteigen. Für die Linienanordnung, Figur 3 oben, befindet sich dieser Schnittpunkt in einer Distanz von ca 9 m (Figur 10). Erst in einem Abstand zur Kabelleitung, welche etwa dem mittleren Abstand zum Summenstroms im Erdboden entspricht, geht der B-Feldverlauf dieser Komponente allmählich in die quadratische Abstandsabhängigkeit über (ausserhalb des in Figur 10 enthaltenen Bereichs).



Figur 9 Querprofil des B-Feld-Effektivwerts 2 m über einer Kabelleitung in horizontaler Linienanordnung, Leiterabstand 30 cm:
 Ausgezogene Linie: symmetrische Ströme, 500 A,
 Gestrichelte Linie: mit zusätzlich überlagertem Summenstrom, 50 A.



Figur 10 Darstellung der gleichen Werte wie in Figur 9 im doppellogarithmischen Massstab.

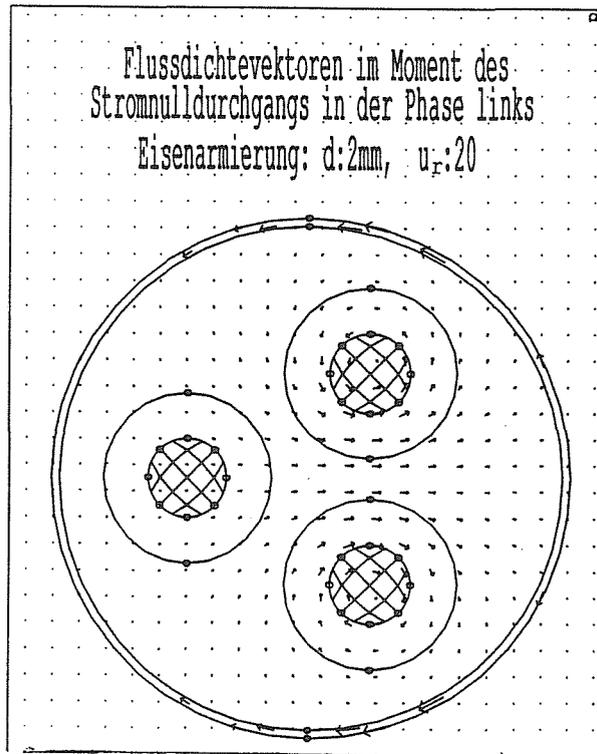
3.5 Einfluss ferromagnetischer Kabelarmierungen

Rohre und Armierungen von Kabeln aus ferromagnetischem Material besitzen, vom Einfluss der Wirbelströme abgesehen, ausschliesslich eine abschirmende Wirkung auf symmetrische Ströme¹⁾, das heisst auf die Mit- und Gegenkomponente des Stroms. **Felder der Nullkomponente werden durch magnetische Schirme nicht beeinflusst**, da der von ihr ausserhalb des Kabels erzeugte Fluss die ferromagnetische Armierung nicht durchdringen muss. Figur 11 demonstriert die B-Feld-Abschirmwirkung der Armierung für ein solches Dreileiterkabel bei symmetrischer Belastung.

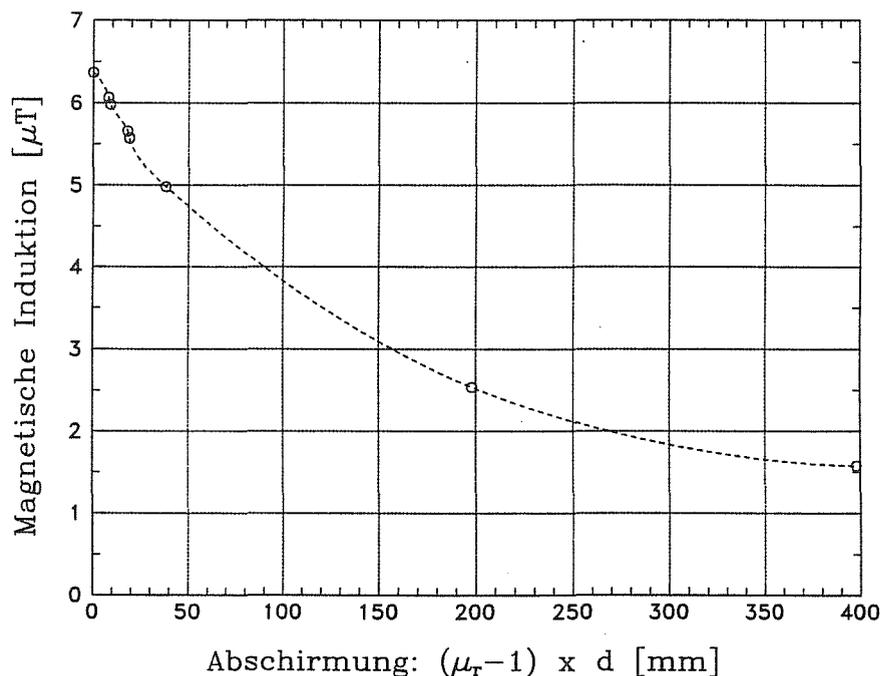
Ein Mass für die Feldabschwächung von symmetrischen Strömen in der Nähe des Kabels ist der tangentielle magnetische Leitwert der Kabelarmierung. Zur Quantifizierung der Schirmwirkung kann eine resultierende Magnetisierbarkeit der Armierungsstruktur $(\mu_{r(res)} - 1)$, unter Berücksichtigung der Luftspalten) definiert werden²⁾. Die Schirmwirkung auf das B-Feld ist dann gegeben durch das Produkt aus dieser virtuellen Magnetisierbarkeit mit der Armierungsdicke d . Der Quotient aus dem durch die Armierung abgeschwächten Feld zum Feld ohne Armierung (B/B_0) ist genau dann eine eindeutige Funktion von $(\mu_{r(res)} - 1) \cdot d$, wenn der Abstand der Leiter zur Armierung wesentlich grösser ist als die Dicke d der Armierung (siehe Figur 12).

- 1) Die Wirkung von Wirbelströmen dürfte praktisch immer vernachlässigbar sein, da andernfalls Verluste in den Schutzarmierungen zu gross würden.
- 2) Die resultierende Permeabilität $\mu_{r(res)}$ des Armierungsgefüges ergibt sich in erster Näherung aus der Serieschaltung der magnetischen Widerstände der Luftspalten und der Armierungsbänder:

$$\mu_{r(res)} = \frac{(1 + \bar{d}_L) \cdot \mu_{rFe}}{1 + \bar{d}_L \cdot \mu_{rFe}} \quad \text{mit} \quad \bar{d}_L = d_L / d_{Fe} \quad (\text{Verhältnis: Luftspaltenbreite zu Stahlbandbreite})$$



Figur 11 Pfeildarstellung für einen Momentanzustand der B-Feldverteilung in einem Dreileiterkabel mit Stahlbandarmierung zur Illustration der Abschirmwirkung bei symmetrischen Strömen: Ein Teil des Felds wird durch die Armierung geführt und tritt deshalb nicht aus dem Kabel aus.



Figur 12 Magnetische Flussdichte in der Umgebung eines Dreileiterkabels in Abhängigkeit des Produkts aus der Magnetisierbarkeit und der Dicke $(\mu_{r(res)} - 1) \cdot d$ einer Stahlbandarmierung. Abstand der Leiterzentren vom Kabelzentrum: 30 mm , Innenradius der Armierung: 62 mm , Leiterstrom: 500 A .

3.6 Einfluss der Bodenleitfähigkeit

Ein besonderes Problem bei der exakten Magnetfeldberechnung bei Drehstromleitungen ergibt sich aus der schwachen Wechselwirkung des B-Felds mit dem elektrisch leitenden Erdboden. In Abhängigkeit der Beschaffenheit des Untergrunds werden Wirbelströme im Erdboden induziert, welche das magnetische Feld vor allem im Fernbereich beeinflussen. Bei bekannter Bodenleitfähigkeit, kann dieser Einfluss durch die Einführung von Spiegelströmen in grosser Tiefe berücksichtigt werden (*D.W. Deno, 1976*). Diese *virtuellen Spiegelströme* liegen je nach Verteilung der Bodenleitfähigkeit bei Tiefen von einigen hundert bis tausend Metern¹⁾. **Der Einfluss des Erdbodens ist deshalb vor allem im Nahbereich der Leitung sehr klein, wirkt aber mit zunehmender Distanz von der Leitung (nach einigen hundert Metern) feldreduzierend.**

Da bei den vorliegenden Betrachtungen die Magnetfelder in grosser Entfernung zur Kabelleitung sehr klein und deshalb nicht von zentraler Bedeutung sind, wurde der schwer quantifizierbare Einfluss des Erdbodens bei der verwendeten Rechenmethode vernachlässigt. Bei der Berechnung von B-Feldern ohne Berücksichtigung der Bodenleitfähigkeit ergeben sich demnach im Fernbereich tendenziell zu hohe Werte. Solche vereinfachte Berechnungen liegen also in Hinblick auf die Angabe maximal möglicher B-Feldwerte auf der sicheren Seite.

4. Typische Immissionswerte

Im Hinblick auf eine Beurteilung der Magnetfelder von Leitungen als gesundheitsrelevante Einflussgrösse wird im folgenden aufgezeigt, mit welchen Feldstärken in den Aufenthaltsräumen der Normalbevölkerung typischerweise zu rechnen ist.

4.1 Magnetfelder von Kabel- und Freileitungen im Vergleich

Auf den ersten Blick versprechen Kabelleitungen geringere Magnetfelder zu erzeugen als Freileitungen. Vergleicht man das B-Feldprofil einer Kabelleitung mit demjenigen einer entsprechenden Freileitung bei gleichem Betriebsstrom, so stellt man im Fernbereich (Abstand zur Leitungsachse grösser etwa 10 m) bei Kabeln erheblich geringere Flussdichten fest als bei Freileitungen. Der Grund liegt im bedeutend kleineren Abstand zwischen den Einzelleitern des Kabelsystems. Ein entsprechender Vergleich der B-Feldprofile von Kabeln und Freileitungen ist in Figur 14 dargestellt; die zu Grunde gelegten Systeme sind in Figur 13 skizziert. Die Magnetfelder von Kabelsystemen können allerdings in weiten Grenzen variieren; dafür sind die im vorgegangenen Abschnitt diskutierten Einflussfaktoren verantwortlich.

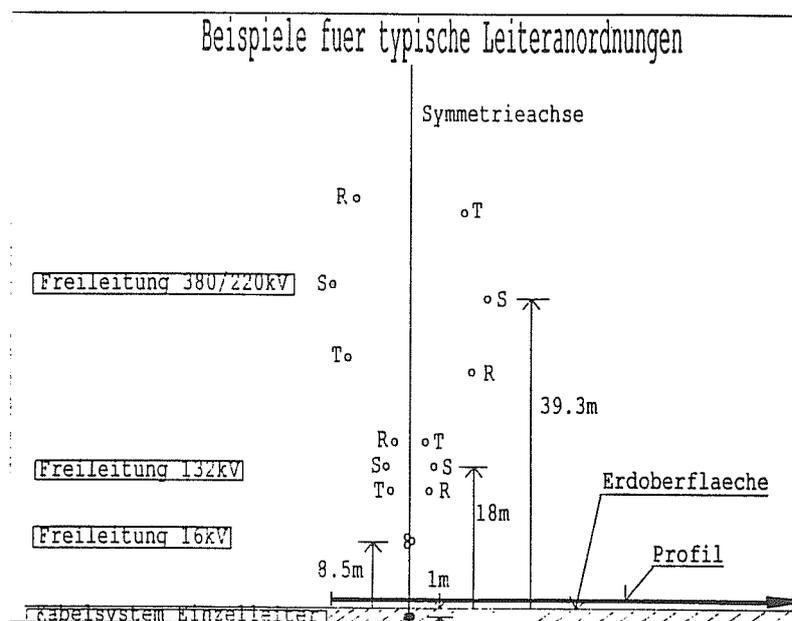
Im Nahbereich der Trassen fällt der Vergleich von Magnetfeldern im allgemeinen zuungunsten der Kabel aus. Je nach Bauweise des Kabelrohrblocks, bzw. Gestaltung des Mastbildes sowie der Phasenbelegung können die Verhältnisse zwar sehr unterschiedlich liegen, im Falle von Einleiterkabeln in separaten Rohren wird man jedoch üblicherweise in einem Korridor von 10 bis 20 m Breite für das Kabelsystem höhere

1) Bei der Berechnung von elektrischen Feldern werden analog zu den Spiegelströmen bei B-Feldern Spiegelladungen eingeführt. Diese Ladungen befindet sich symmetrisch zur Erdoberfläche in einer Tiefe, die der Leiterseilhöhe entspricht und müssen deshalb stets berücksichtigt werden.

Feldstärken feststellen. Figur 14 zeigt die Situation für eine in Ebene mit 30 cm Phasenabstand verlegte Kabelanlage, was im Spannungsbereich bis etwa 150kV dem diesbezüglich ungünstigsten Fall entspricht.

Das entsprechende B-Feldprofil für Dreileiterkabel, wie sie normalerweise im Mittelspannungsbereich eingesetzt werden, liegt um rund eine Dekade tiefer (vergleiche dazu Figur 4). Bezogen auf diese Anordnung sind die personenwirksamen Magnetfelder von Kabelanlagen wesentlich kleiner als jene von Freileitungen gleicher Funktion.

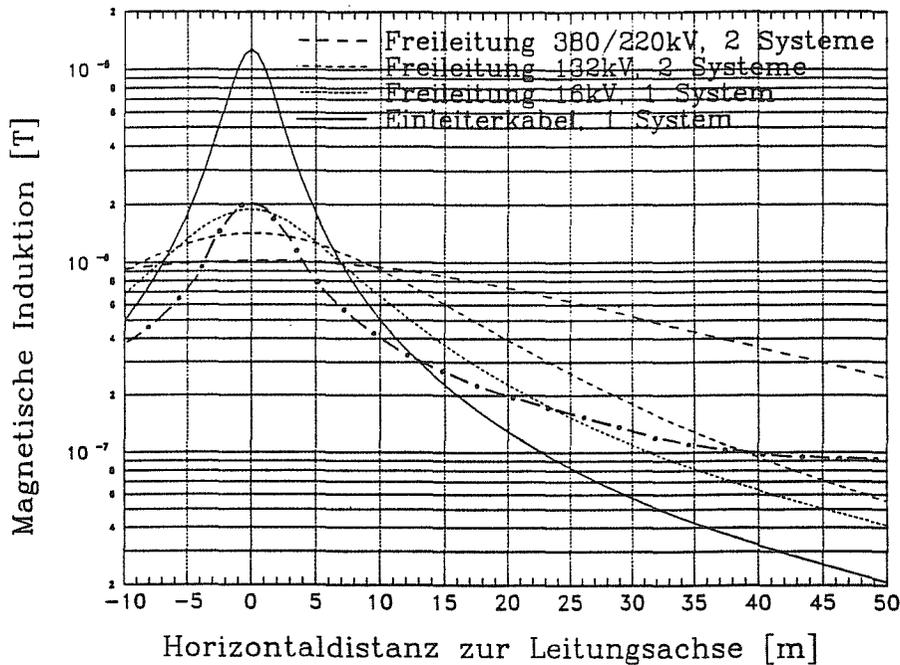
Im diesbezüglichen Vergleich von Freileitung und Kabel fällt in der Praxis ausserdem ins Gewicht, dass Kabelanlagen in Benützung bestehender Verkehrswege unter Umständen in unmittelbarer Nähe zu den Aufenthaltsräumen der Bevölkerung verlaufen. Trotz bedeutend rascheren Abklingens des Feldes sind deshalb die von Einleiter-Kabelanlagen ausgehenden Immissionen nicht unbedingt kleiner als jene der alternativen Freileitung.



Figur 13 Typische Leiteranordnungen bei verschiedenen Freileitungen und einer Einleiter-Kabelanlage; Festlegung der Profilachse für Figur 14:

- 380/220-kV-Freileitung
- 132-kV-Freileitung, zwei Systeme
- 16-kV-Regelleitung
- Einleiter-Kabelanlage, in Ebene, Achsabstand 0,3 m, Verlegetiefe 1 m.

Ein weiterer Aspekt, der vornehmlich bei Verkabelungen von Mittel- und Niederspannungsleitungen von Bedeutung ist, sind die Erdausgleichsströme, bzw. Summenströme. Sie entstehen in erster Linie innerhalb der Niederspannungsnetze infolge unsymmetrischer Belastungen und sind bei genullten Systemen eine unvermeidbare Erscheinung. Sobald Erdverbindungen zum Beispiel in Form von Kabelschirmen oder -armierungen vorliegen, ist mit dem Auftreten von Ausgleichsströmen, die mit dem betreffenden Stromsystem unter Umständen in keinem Zusammenhang stehen, zu rechnen. In Figur 14 ist das B-Feldprofil für einen Ausgleichsstrom von 20 A eingetragen, welcher beispielsweise auf den Schirmen eines 1 m tief verlegten Dreileiter-Mittelspannungskabels fliesst. Auffällig ist der vergleichsweise flache Verlauf des B-Feldprofils des unidirektionalen Stromes. Unter den gewählten Annahmen liegen die



Figur 14 Vergleich von Querprofilen des B-Feldefektivwerts im Abstand von 1 m über der Erdoberfläche für typische Leitungssysteme gemäss Figur 13. Alle Systeme führen je 500 A; keine Phasenverschiebung bei System mit zwei Strängen. Die strichpunktierte (---) Kurve steht für einen Ausgleichsstrom von 20 A auf einer Erdleitung anstelle der Kabelanlage.

Feldstärken des Ausgleichsstromes in der gleichen Grössenordnung wie jene der mit 500 A belasteten 16-kV-Freileitung. Aus diesem Grund ist die Verkabelung einer Mittelspannungsleitung im Hinblick auf eine Feldreduktion nicht gerechtfertigt. In der Praxis liegen die Ausgleichsströme typischerweise im Bereich von 1 bis 20 A und sind für das weitherum feststellbare Hintergrund-Magnetfeld verantwortlich

4.2 Bewertung der Feldstärken

Zur Bewertung der personenwirksamen Feldstärken von Kabel- und Freileitungen ist zunächst der Bezug auf die Grenzwertempfehlungen der Internationalen Strahlenschutzvereinigung (IRPA: International Radiation Protection Association, 1990) angezeigt. Deren unverbindlicher, aber weltweit anerkannter Grenzwert für die Normalbevölkerung beträgt beim B-Feld 100 μT .

Wie die berechneten B-Feldprofile für die verschiedenartigen Leitungstypen zeigen, werden selbst entlang den Achsen der Leitungen nur sehr selten Feldstärken von mehr als 10 μT erreicht. Damit besteht also bei üblichen Betriebsströmen ein respektablem Abstand zum Grenzwert der IRPA. Unter Berufung auf diesen Grenzwert, müssten also die Felder der gebräuchlichen Kabel- und Freileitungstypen als gesundheitlich unbedenklich akzeptiert werden.

Wenn sich die Frage nach biologischen Wirkungen der Felder gleichwohl stellt, dann ist dies formal durch die Vorbehalte begründet, welche bei der Anwendung der IRPA-Grenzwerte auf Wohnräume angebracht werden können: Die IRPA stützte ihre Analysen auf die hinreichend geklärten *akuten* Wirkungen, verursacht durch induzierte Ströme; auf allfällige *Langzeitwirkungen* wird mangels konsistenten Datenmaterials kein Bezug genommen.

Bis zu jenem Abstand, in welchem sich seitlich von Freileitungen oder Kabeln normalerweise erste Wohnhäuser befinden, sind die Feldstärken bereits unter $2 \mu T$ abgesunken. Typische, von Leitungen herrührende Feldstärken innerhalb nahegelegener Häusern betragen $0,1$ bis $1 \mu T$. Gerade in diesem Feldstärkebereich trifft man aber im Alltag auf zahllose andere Feldquellen. Neben den Ausgleichsströmen auf Wasserleitungen und Kabelschirmen sowie allfälligen Traktionsströmen der Bahn sind dies vor allem Elektrizitätsanwendungen im Wohnbereich. Einige typische Feldstärken von elektrischen Geräten in Gebrauchsdistanz sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

PC-, Schreibmaschinenarbeitsplatz:	$< 3 \mu T$
Elektrischer Wecker (30 cm Abstand):	$< 4 \mu T$
Kochherd mit Dampfabzug:	$< 6 \mu T$
Haartrockner, Rasierapparat (Gebrauchsdistanz):	$< 200 \mu T$
Elektrische Handwerkzeuge (Gebrauchsdistanz):	$< 2500 \mu T$
Hintergrundfeld: Erdausgleichsströme, Hausinstallationen, Verteilleitungen:	$< 1.5 \mu T$

Tabelle 1 Übliche Werte für die magnetische Flussdichte einiger verbreiteter Emittenten.

Kabel oder Freileitungen erzeugen demnach auch in nahegelegenen Häusern keine aussergewöhnlichen Feldstärken. Natürlich darf die Tatsache, dass Felder der gleichen Grössenordnung auch von zahlreichen alltäglichen Einrichtungen erzeugt werden, nicht als Beweis für die biologische Unbedenklichkeit der Felder von Leitungen angesehen werden. Man kann aber sicher daraus schliessen, dass die Anwesenheit einer Leitung kein aussergewöhnliches Risiko darstellt. Besondere Vorsichtsmassnahmen an Kabel- und Freileitungen sind deshalb nicht indiziert. Gleichwohl erscheint es aber angezeigt, die vorhandenen Freiheitsgrade bei der Gestaltung von Leitungen im Sinne einer Minimierung der Feldemissionen zu nutzen: Niedrige Feldstärken, bzw. ein rasch abklingender Feldverlauf werden vor allem dann erreicht, wenn eine Leitung mit zwei parallel betriebenen Systemen erstellt werden kann und wenn dabei die sechs Phasen in geringem Abstand und in optimaler Verteilung angeordnet sind. Im Mittelspannungsbereich ist das Dreileiterkabel optimal. - Solche Massnahmen tragen den vereinzelt, noch nicht endgültig abgeklärten Hinweisen auf schwache biologische Wirkungen niederfrequenter Magnetfelder Rechnung.

5. Erkenntnisstand bezüglich biologischer Wirkungen

Aufgrund des heutigen Erkenntnisstandes können *akute* gesundheitsschädigende Wirkungen mit Sicherheit ausgeschlossen werden - d.h. eine eher kurzzeitige Exposition in niederfrequenten Feldern üblicher Stärke stellt bestimmt keine Gefahr dar. Bei sehr starken, in der Öffentlichkeit nicht auftretenden Feldern sind zwar gewisse Effekte, wie Sehstörungen oder Veränderungen des Blutbildes bekannt, doch sind diese vollständig reversibel und haben deshalb keinen eigentlichen Krankheitswert.

Kurzzeitwirkungen bei relativ hohen Feldstärken gelten heute als geklärt. Hinsichtlich der *Langzeitwirkungen* ist die Faktenlage jedoch komplexer. Immerhin hat sich der ursprüngliche Verdacht zwischenzeitlich als unhaltbar erwiesen: Langzeiteffekte der *elektrischen* Feldkomponente als eine spezifische Begleiterscheinung von Freileitungen lassen sich nicht nachweisen. Hingegen haben epidemiologischen Bevölkerungsstudien sowie Laboruntersuchungen einzelne Hinweise auf Langzeitwirkungen schwacher *Magnetfelder* ergeben, die weiterer Abklärungen bedürfen. Beispielsweise wird vermutet, dass Magnetfelder die Entstehung gewisser Krebserkrankungen indirekt begünstigen könnten. Entsprechende Erklärungsansätze sind: die beobachtete Feldsensibilität des zellulären Kalziumflusses sowie die Beeinflussung der Produktion gewisser Hormone, wie zum Beispiel das Melatonin aus einer Drüse des Hirns. Dieses Hormon ist an der Immunabwehr, und damit im speziellen auch an der Krebsabwehr beteiligt. Es regelt ausserdem den Tag-Nacht-Zyklus. Darin könnte ferner eine Ursache von denkbaren Befindlichkeitsstörungen bei entsprechend disponierten Personen bestehen.

Ein tatsächliches, im Labor nachvollziehbares Wirkungsmodell für die postulierten Langzeiteffekte konnte allerdings noch nicht entwickelt werden, und abgesehen davon zeichnen die wenigen positiven Befunde ein äusserst unscharfes Bild. Man hat deshalb allen Grund anzunehmen, dass die vermuteten Risiken höchstens marginal sein können. Ausserdem erscheint es angesichts der zahlreichen allgegenwärtigen Karzinogene äusserst fraglich, ob man diesbezüglich überhaupt je zu aussagekräftigen Resultaten gelangen kann.

6. Schlussbemerkung

Freileitung oder Kabel? - Die Antwort auf diese Frage muss sich an topografischen, betrieblichen, ästhetischen und wirtschaftlichen Kriterien orientieren; die elektromagnetischen Felder können dabei keinen ausschlagenden Aspekt darstellen! Aufgrund des heutigen Erkenntnisstandes ist die gebotene Vorsicht gewahrt, wenn ein neu geschaffenes Freileitungstrasse nicht direkt an Wohnhäuser angrenzt und die Phasenordnung im Rahmen des möglichen optimiert ist. Wird die Option Verkabelung gewählt, dann gerät die Leitung vermutlich bald in Vergessenheit, weil man sie nicht sieht; die Feldemissionen werden bei dieser Variante aber nicht in jedem Fall geringer sein, besonders dann nicht, wenn es sich um Mittelspannungsleitungen handelt.

Die öffentliche Wahrnehmung der Erkenntnisse und Meinungen zu den biologischen Feldwirkungen enthält keine reale Risikoabwägung. Es ist zeittypisch, dass gerade kleinste Risiken subjektiv weit überschätzt werden, besonders wenn das betreffende Risiko nicht freiwillig eingegangen wird. Die resultierende Verängstigung kann in der Folge entscheidend zum Auftreten einer allfälligen Störung beitragen.

Literaturstellen:

D.W. Deno,
"Transmission line fields",
IEEE Transactions on Power and Apparatus, Vol. PAS-95, no. 5, Sept./Okt. 1976.

P.S. Neelakanta, R. Lordan, V. Ungvichian, P.F. Wahid,
"Electromagnetic field above the earth's surface due to a buried three-phase high-voltage power-line",
ETEP Vol. 1, No. 2, March/April 1991, pp 103-106.

International Radiation Protection Association: "Interim Guidelines on Limits of Exposure to 50/60 Hz Electric and Magnetic Fields." Health Physics, 58, 1990, pp 113 - 122.