

EINFLUSS VON STARKSTROMANLAGEN AUF MAGNETFELDER IN GEBÄUDEN UNTER BERÜCKSICHTIGUNG VON MODERNEN ERDUNGS- UND PA-ANLAGEN

**Wolfgang EMMER^{1*}, Ernst SCHMAUTZER¹, Robert SCHÜRHubER¹,
Lothar FICKERT¹**

Einleitung

Der technische Fortschritt im Bereich der Elektrotechnik führt zu einem vermehrten Einsatz von elektromagnetisch sensiblen elektrischen und elektronischen Geräten sowohl im beruflichen als auch im privaten Umfeld. Gleichzeitig kommt es unweigerlich zu einem höheren Bedarf an elektrischer Energie und einem damit verbundenen größeren Stromtransport auf Hochspannungs- und Niederspannungsleitungen. Sowohl im urbanen Raum erhöhen sich aufgrund der steigenden Bau- und Lastdichte als auch im Bereich von Hochspannungs-Freileitungen, -Kabeln und elektrifizierten Bahnanlagen die elektromagnetischen Emissionen und Immissionen. Aufgrund der aktuell hoch dynamischen Laststeigerungen und der Bündelung von Leitungen, muss der elektromagnetischen Verträglichkeit zwischen energietechnischen Anlagen und empfindlichen elektronischen Betriebsmitteln besonderes Augenmerk geschenkt werden. Zu den empfindlichen elektronischen Betriebsmitteln gehören insbesondere neuartige smarte Haushaltsgeräte, Brandschutz- und Einbruchschutzsysteme, Anlagen der Informationstechnik, gewerblich und industriell genutzte Verbrauchsmittel, Einrichtungen der medizinischen Versorgung (Arztpraxen, Krankenhäuser, Pflegeheime) sowie passive und aktive Implantate in Personen wie zum Beispiel Herzschrittmacher und Insulinpumpen.

Somit ergeben sich Fragestellungen hinsichtlich Lösungen zur Vermeidung bzw. Minderung von elektrischen und magnetischen Feldern in und außerhalb von Gebäuden. Es zeigt sich, dass eine Betrachtung und Beurteilung alleine der aktiven Störquellen nicht mehr ausreichend ist, sondern es müssen auch passiv leitfähige Strukturen wie z.B. Erdungs- und PA-Systeme mitberücksichtigt werden.

So müssen neben

externen aktiven Feldquellen, wie z.B.

- Hochspannungsfreileitungen
- Hochspannungskabeln
- Bahnanlagen

sowie internen Feldquellen, wie z.B.

- Transformatoren,
- Niederspannungsleitungen,
- Gebäudeinstallationen (Haupt- und Endstromkreise).

jedenfalls auch ohmsch, induktiv oder kapazitiv eingekoppelte Ströme und Spannungen in (nicht-) geerdete passiv leitfähige Gebäudestrukturen berücksichtigt werden, wie z.B.:

- PE/PEN-Leiter,
- Gebäudearmierung,
- Erdungssystem,
- Blitzableiter.

¹ Institut für Elektrische Anlagen und Netze/TU Graz, Inffeldgasse 18/I, A-8010 Graz,
Fax: +43 (0) 316 / 873-7553,
{Tel.: +43 (0) 316 / 873-8065, emmer@tugraz.at},
{Tel.: +43 (0) 316 / 873-7555, schmautzer@tugraz.at},
{Tel.: +43 (0) 316 / 873-7550, robert.schuerhuber@tugraz.at},
{Tel.: +43 (0) 316 / 873-7564, lothar.fickert@tugraz.at},
<http://www.ifea.tugraz.at>

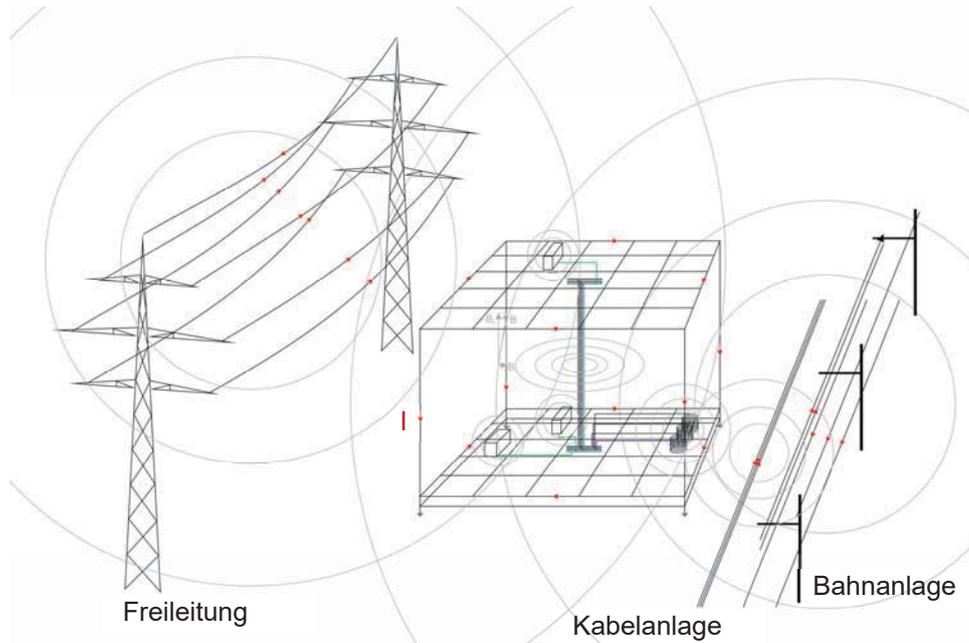


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines Gebäudes im Einflussbereich unterschiedlicher Störquellen, z.B. Bahnanlage (16,7 Hz), Kabelanlage (50 Hz) und Freileitung (50 Hz)

In der vorliegenden Arbeit wird, angeregt durch aktuelle Messergebnisse in Neubauten, anhand von Berechnungen der Einfluss von externen Feldquellen (Bahnanlage, Hochspannungsfreileitung, Kabel) sowie von passiv leitfähigen Gebäudestrukturen (Armierung, PA- und PE-Leiter) beim Auftreten von externen Magnetfeldern auf das Summen-Magnetfeld im Innern von Gebäuden dargestellt. Zusätzlich werden neben der Berechnung der Magnetfelder auch induzierte Spannungen in Leitungen der Gebäudetelekommunikationstechnik im Innern der Gebäude behandelt. Dabei finden auch Ströme über Erde, d.h. die ohmsche Kopplung von fremden Erdungsanlagen (z.B. Bahnanlage oder Objekte) und dem Erdungssystem des Gebäudes Berücksichtigung. Im Anschluss an die Beispiele werden geeignete Maßnahmen vorgeschlagen, um die auftretenden Magnetfelder technisch und ökonomisch sinnvoll auf verträgliche Größen zu minimieren. Die Berechnungen werden mithilfe von selbst erstellten Programmen in Kombination mit Matlab Simulink und FEM-Simulationen durchgeführt.

Key Words: EMV, ohmsche und induktive Beeinflussung, Freileitungen, Kabel, Bahnanlagen, PA-System, Armierung, Feldreduzierung

Das Simulationsmodell

Um die Verteilung von Magnetfeldern in Gebäuden korrekt abbilden zu können, reicht es nicht, wie schon in der Einleitung erwähnt, nur die externen und die internen aktiven Feldquellen in der Berechnung zu berücksichtigen, sondern es müssen auch passiv leitfähige vermaschte Gebäudestrukturen sowie zweiseitig aufgelegte oder vermaschte PA- und PE-Leitungssysteme berücksichtigt werden, die durch in sie eingekoppelte Ströme das Magnetfeld im Nahbereich dieser PE-, PA-Leiter und der elektrisch verbundenen Armierung im Gebäude verzerren. Diese in Messungen beobachtbaren Feldverzerrungen können bei der Beurteilung des im Gebäude auftretenden Magnetfelds hinsichtlich der einzuhaltenden Grenzen für den Schutz von Personen, v.a. aber für die Einhaltung der noch niedrigeren Störfestigkeitsgrenzen von sensiblen elektronischen Geräten und deren zuverlässigen Funktion von großer Bedeutung sein. In den folgenden Ausführungen wird anhand einfacher Gebäudestrukturen Schritt für Schritt eine Basis für das Verständnis dieser Beeinflussung erarbeitet. Dabei wird anhand der elektrischen Netzwerktheorie ein Simulationsmodell mithilfe von Matlab und Matlab Simulink erstellt, das die eingekoppelten Ströme aufgrund der ohmschen und der induktiven Beeinflussung² miteinbezieht und nach dem Gesetz von Biot-Savart die sich daraus ergebenden Magnetfelder berechnet.

² Die kapazitiv eingekoppelten Ströme werden in den ausgeführten Betrachtungen vorerst vernachlässigt, da sie in einem Gebäude nur eine geringe Auswirkung haben.

Die in den Abbildungen 2 bis 5 dargestellten einfachen Beeinflussungsanordnungen, auf deren Basis die Berechnungen durchgeführt wurden, gehen anfänglich von einem Gebäude mit einem einfachen Ringpotentialausgleich (Ringerder) aus. Durch

- zusätzliche Vermaschung des Gebäuderingspotentialausgleichs auf insgesamt vier Maschen (Gebäudepotenzialausgleich),
- Erweiterung des Gebäudes auf eine zweite mit der ersten verbundenen Ebene des Gebäudes,
- Veränderung der Erdungssituation,
- Veränderung des Abstands zwischen Beeinflussungsquelle und Gebäude sowie
- Betrachtung verschiedener Beeinflussungsquellen

werden die Auswirkungen auf die Verzerrungen des Magnetfelds im Inneren des Gebäudes analysiert und verglichen.

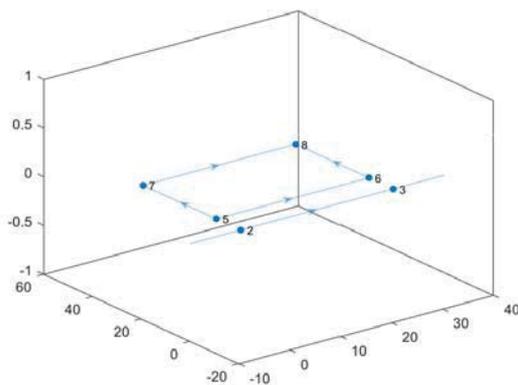


Abbildung 2: Gebäude mit PA in einer Ebene mit einer PA-Masche und einem induzierenden Leiter

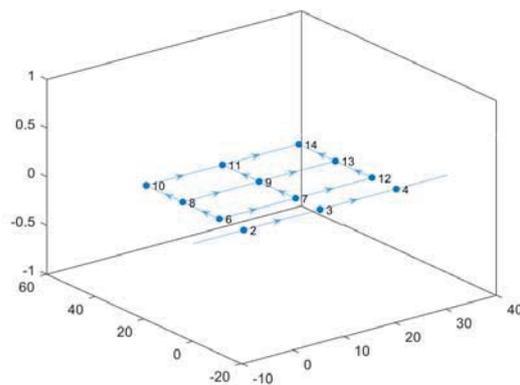


Abbildung 3: Gebäude mit PA in einer Ebene mit vier PA-Maschen und einem induzierenden Leiter

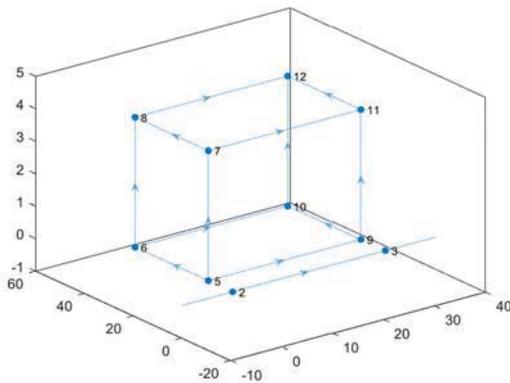


Abbildung 4: Gebäude mit PA in zwei Ebenen mit jeweils einer PA-Masche und einem induzierenden Leiter

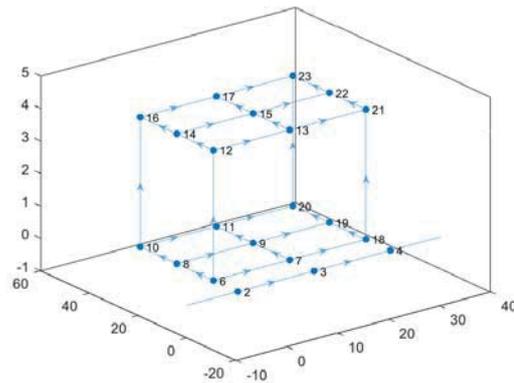


Abbildung 5: Gebäude mit PA in zwei Ebenen mit jeweils vier PA-Maschen und einem induzierenden Leiter

Die Gebäudedimensionen werden mit einer Länge l und Breite b von 30 m quadratisch, die Stockwerkhöhe mit $h = 4$ m angenommen. Die PA-Leiterstruktur besteht aus Rundstahl mit einem Durchmesser von 10 mm, die Erdung wird an den vier Ecken des Gebäudes niederohmig ($R_E = 0 \Omega$) vorgenommen. Außerhalb des Gebäudes wird eine beeinflussende Quelle in 10 m Entfernung (beeinflussende Leitersysteme verlaufen in dieser Arbeit immer entlang der x-Achse und ihre Systemachse liegt auf $y = 0$ m) auf Bodenniveau platziert; am Anfang wird aus Gründen der Einfachheit ein einphasiger Leiter mit einem Strom von $I = 1000 \text{ A} \angle 0^\circ$ als Beeinflussungsquelle angenommen. Die Frequenz wird mit $f = 50 \text{ Hz}$ festgelegt.

Der vorliegende Beitrag behandelt konkret die Ergebnisse der folgenden Varianten:

- Variante 1: Gebäude mit PA auf einer Ebene mit einer PA-Masche
- Variante 2: Gebäude mit PA auf einer Ebene mit vier PA-Maschen
- Variante 3: Gebäude mit PA auf zwei Ebenen mit jeweils einer PA-Masche
- Variante 4: Gebäude mit PA auf zwei Ebenen mit jeweils vier PA-Maschen
- Variante 5: Gebäude mit PA auf zwei Ebenen mit jeweils vier PA-Maschen ohne Erdung
- Variante 6: Gebäude mit PA auf zwei Ebenen mit jeweils vier PA-Maschen beeinflusst durch ein Hochspannungskabel
- Variante 7: Gebäude mit PA auf zwei Ebenen mit jeweils vier PA-Maschen beeinflusst durch eine Hochspannungsfreileitung
- Variante 8: Gebäude mit PA auf zwei Ebenen mit jeweils vier PA-Maschen beeinflusst durch eine Bahnstrecke
- Variante 9: Gebäude mit PA auf zwei Ebenen mit jeweils vier PA-Maschen, ohmsche Beeinflussung
- Variante 10: Gebäude mit PA auf zwei Ebenen mit jeweils vier PA-Maschen, Kombination ohmsche und induktive Beeinflussung

Magnetfelder aufgrund induktiver Beeinflussung

In diesem Kapitel wird die Wirkung der vom externen einphasigen stromdurchflossenen Leiter in den PA-Leitern des Gebäudes induzierten Ströme auf das Magnetfeld im Inneren des Gebäudes untersucht.

Vergleich der Varianten 1 bis 4

In einem ersten Schritt werden die induzierten Teilleiterströme in den vier verschiedenen Gebäudestrukturen aus den Abbildungen 2 bis 5 miteinander verglichen. Aus den Abbildungen 6 bis 9 ist zu erkennen, dass die Ströme in den äußeren PA-Leitern in y-Richtung in den zwei Varianten mit den vier PA-Maschen je Ebene (Varianten 2 und 4) größer sind als in den zwei Varianten mit einer PA-Masche je Ebene (Varianten 1 und 3). Das resultiert daraus, dass der induzierte Strom aus den mittigen PA-Leitern in der Mitte zu den Erdungspunkten fließen muss.

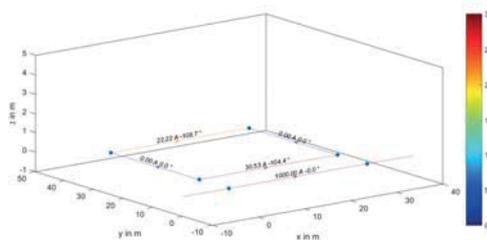


Abbildung 6: Induktive Beeinflussung - PA-Leiter-Stromaufteilung in einem Gebäude mit PA auf einer Ebene mit einer PA-Masche (Variante 1)

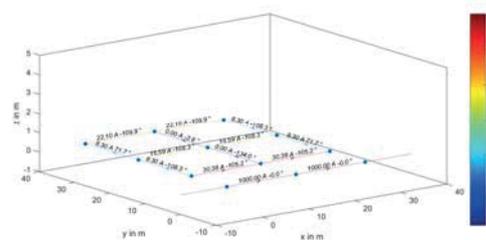


Abbildung 7: Induktive Beeinflussung - PA-Leiter-Stromaufteilung in einem Gebäude mit PA auf einer Ebene mit vier PA-Maschen (Variante 2)

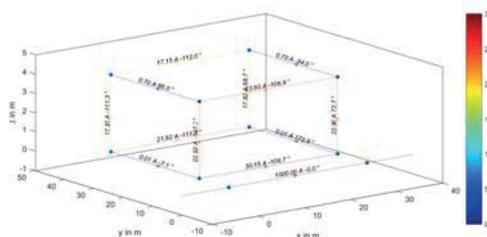


Abbildung 8: Induktive Beeinflussung PA-Leiter-Stromaufteilung in einem Gebäude mit PA auf zwei Ebenen mit jeweils einer PA-Masche (Variante 3)

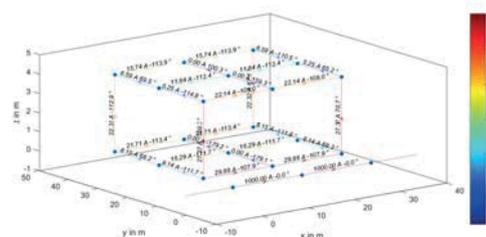


Abbildung 9: Induktive Beeinflussung PA-Leiter-Stromaufteilung in einem Gebäude mit PA auf zwei Ebenen mit jeweils vier PA-Maschen (Variante 4)

In den im Folgenden dargestellten Vertikalschnitten (siehe Abbildungen 10 bis 13) ist die Verteilung der magnetischen Flussdichte im Gebäude, verursacht einerseits durch den Strom von 1000 A im beeinflussenden Leiter links im Bild und andererseits verursacht durch die in die PA-Leiter in der rechten Bildhälfte eingekoppelten Ströme zu erkennen. Vergleicht man die Ergebnisse der Berechnungen, so fällt einerseits auf, dass es bei den Gebäudestrukturen mit jeweils einer PA-Masche (Varianten 1 und 3) zu geringeren PA-Leiterströmen gegenüber jenen mit jeweils vier PA-Maschen (Varianten 2 und 4) kommt. Die mittleren PA-Leiter der viermaschigen PA-Strukturen rufen starke Inhomogenitäten mit höheren Magnetfeldern im Bereich dieser Leiter hervor. Andererseits sind hier (Varianten 2 und 4) aber auch Bereiche zu finden, in denen aufgrund des entgegengesetzten Stromes im mittleren PA-Leiter das Magnetfeld geschwächt wird. In diesen Bereichen ergeben sich dabei in der Variante mit der zweiebenigen Gebäudestruktur größere Magnetfelder im Vergleich zu den einebenen Gebäuden.

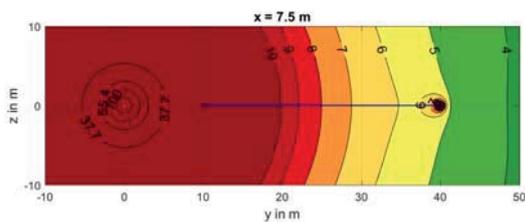


Abbildung 10: Magn. Flussdichte in μT - Vertikalschnitt bei $x = 7,5 \text{ m}$ in einem Gebäude mit PA auf einer Ebene mit einer PA-Masche (Variante 1)

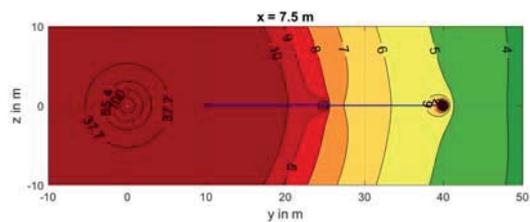


Abbildung 11: Magn. Flussdichte in μT - Vertikalschnitt bei $x = 7,5 \text{ m}$ in einem Gebäude mit PA auf einer Ebene mit vier PA-Maschen (Variante 2)

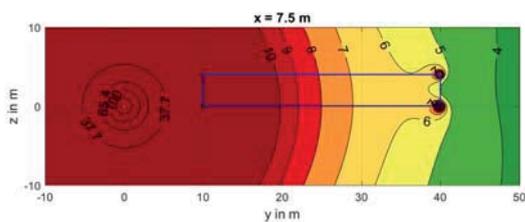


Abbildung 12: Magn. Flussdichte in μT - Vertikalschnitt bei $x = 7,5 \text{ m}$ in einem Gebäude mit PA auf zwei Ebenen mit jeweils einer PA-Masche (Variante 3)

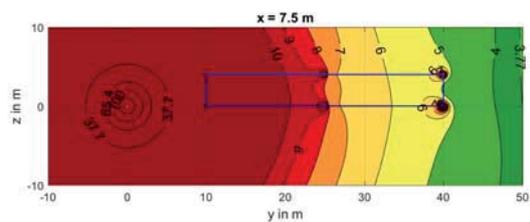


Abbildung 13: Magn. Flussdichte in μT - Vertikalschnitt bei $x = 7,5 \text{ m}$ in einem Gebäude mit PA auf zwei Ebenen mit jeweils vier PA-Maschen (Variante 4)

Diese dargestellten Charakteristiken der Magnetfelder sind auch in den Horizontalschnitten (siehe Abbildungen 14 bis 17) zu erkennen. Weiters ist auch zu erkennen, dass das Magnetfeld parallel zur x-Achse relativ konstant bleibt. Es ist jedoch auch hier auf Inhomogenitäten im Bereich der äußeren PA-Leiter v.a. in den viermaschigen PA-Strukturen zu achten, da dort Ströme fließen, die das Magnetfeld durch den primären induzierenden Leiter sowohl im Betrag als auch in der Richtung verändern.

In den folgenden Abbildungen erkennt man, dass im Nahbereich der PA-Leiter erhöhte magnetische Flussdichten gegenüber den unbeeinflussten Regionen des Raums auftreten. So ergeben sich zum Beispiel in einem Abstand von 10 cm vom PA-Leiter Flussdichten in der Höhe von $7 \mu\text{T}$, die Störnempfindlichkeitsgrenze von elektronischen Geräten liegt jedoch bereits bei $3,77 \mu\text{T}$ (50 Hz, siehe ÖVE/ÖNORM EN 61000-6-1).

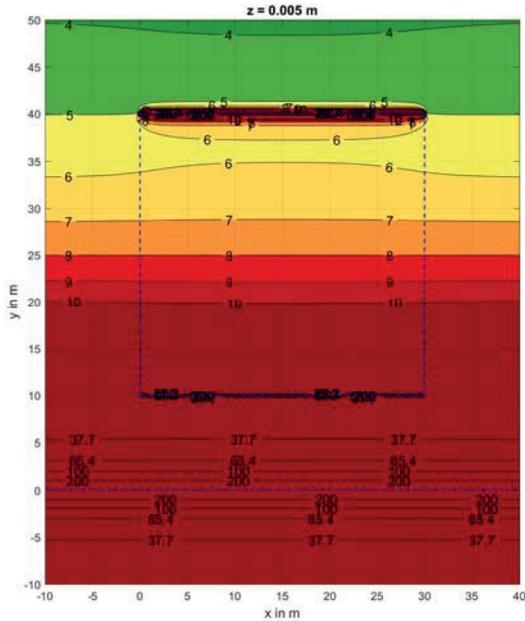


Abbildung 14: Magn. Flussdichte in μT - Horizontalschnitt bei $z = 5 \text{ mm}$ in einem Gebäude mit PA auf einer Ebene mit einer PA-Masche (Variante 1)

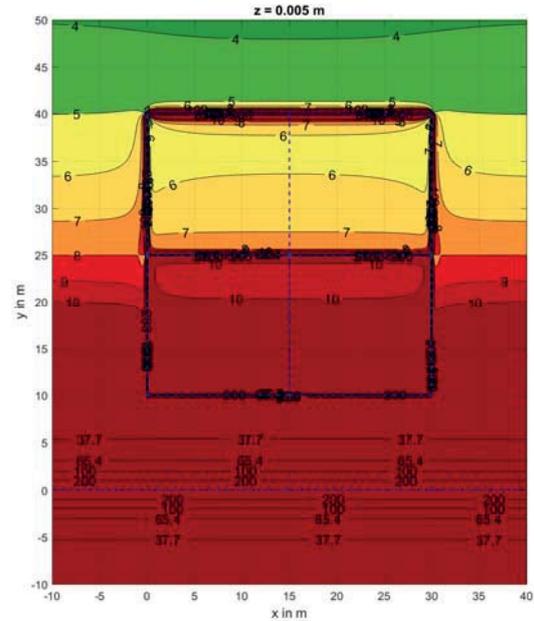


Abbildung 15: Magn. Flussdichte in μT - Horizontalschnitt bei $z = 5 \text{ mm}$ in einem Gebäude mit PA auf einer Ebene mit vier PA-Maschen (Variante 2)

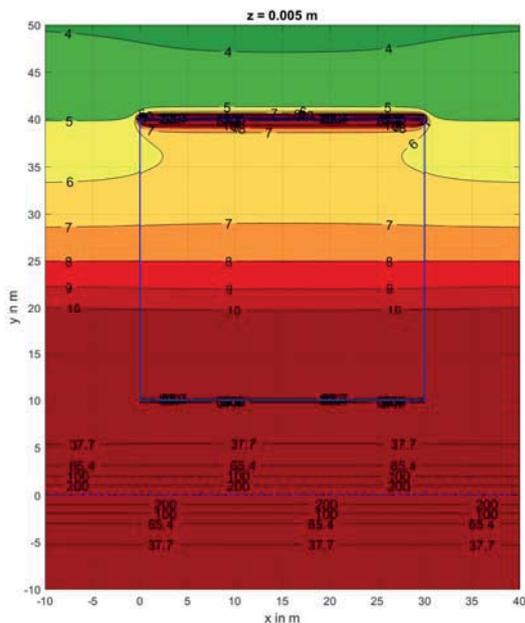


Abbildung 16: Magn. Flussdichte in μT - Horizontalschnitt bei $z = 5 \text{ mm}$ in einem Gebäude mit PA auf zwei Ebenen mit jeweils einer PA-Masche (Variante 3)

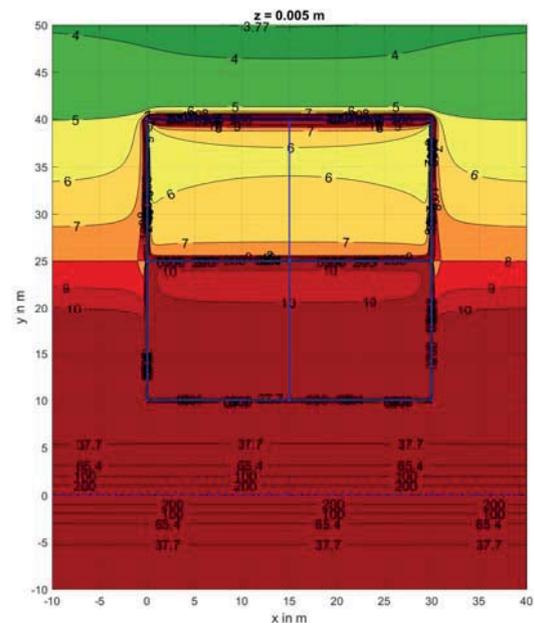


Abbildung 17: Magn. Flussdichte in μT - Horizontalschnitt bei $z = 5 \text{ mm}$ in einem Gebäude mit PA auf zwei Ebenen mit jeweils vier PA-Maschen (Variante 4)

Vergleich der Varianten 4 und 5

Ausgehend von der Variante 4 „Gebäude mit PA auf zwei Ebenen mit jeweils vier PA-Maschen“ soll nun die Auswirkung untersucht werden, wenn die PA-Struktur isoliert, d.h. nicht geerdet ist³. In diesem Fall ist schon bei der Darstellung der Stromverteilung zu erkennen, dass die Ströme im PA-System viel geringer sind. Dieses Phänomen ist dadurch zu erklären, dass die Ströme in den vier Maschen, abhängig von der Inhomogenität des von außen kommenden Magnetfeldes, nahezu gleich sind. Dadurch kommt es zu einer Verdrängung des Stromflusses nach außen und in weiterer Folge im

³ Dies stellt einen in der Realität nur selten vorkommenden Fall dar.

Inneren des Gebäudes zu einer Homogenisierung ähnlich wie bei den Varianten 1 und 3 „Gebäude mit PA mit jeweils einer PA-Masche“.

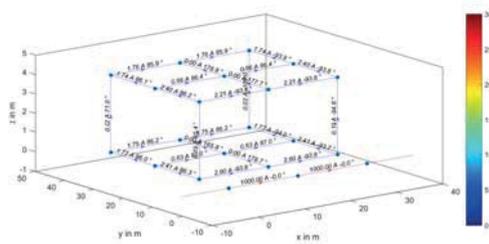


Abbildung 18: Induktive Beeinflussung - PA-Leiter-Stromaufteilung in einem Gebäude mit PA auf zwei Ebenen mit jeweils vier PA-Maschen ohne Erdung (Variante 5)

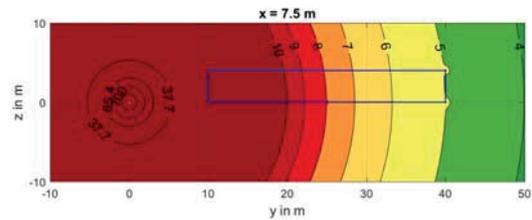


Abbildung 19: Magn. Flussdichte im Gebäude in μT - Vertikalschnitt bei $x = 7,5$ m in einem Gebäude mit PA auf zwei Ebenen mit jeweils vier PA-Maschen ohne Erdung (Variante 5)

Ist im Gegensatz zu den Abbildungen 18 bis 20 das von außen kommende magnetische Feld homogen, tritt in den mittigen PA-Leitern nur noch ein geringer Reststrom auf, d. h. im Inneren des Gebäudes kommt es zu einer Reduzierung und Homogenisierung des magnetischen Feldes.

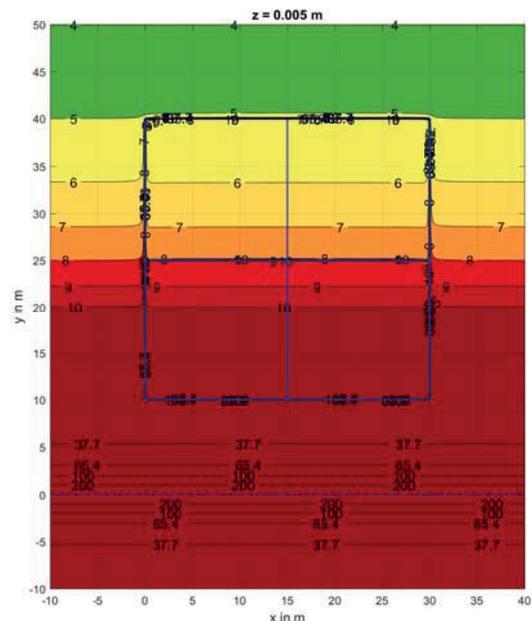


Abbildung 20: Magn. Flussdichte im Gebäude in μT - Horizontalschnitt bei $z = 5$ mm in einem Gebäude mit PA auf zwei Ebenen mit jeweils vier PA-Maschen ohne Erdung (Variante 5)

Vergleich der Varianten 4 und 6 bis 8

Ausgehend von der Variante 4 (die beeinflussende Quelle ist ein einphasiges Kabel) werden verschiedene beeinflussende Quellen untersucht.

In Variante 6 (Abbildungen 24, 27 und 30) wird als beeinflussende Quelle ein dreiphasiges Kabel in Dreieckanordnung (Abstand zwischen den Leiternmittelpunkten 12 cm), in Variante 7 (Abbildungen 25, 28 und 31) eine dreiphasige zweisystemige 110-kV-Hochspannungsfreileitung in Tonnenmastausführung und in Variante 8 (Abbildungen 26, 29 und 32) eine eingleisige Bahntrasse (16,7 Hz) ohne Verstärkungsleiter aber mit Rückleiter dargestellt.

Bei gleicher Spannungsebene wird die Leistung über das einphasige Kabel ($I = 1000$ A), das dreiphasige Kabel ($I = 577$ A) und die dreiphasige Hochspannungsfreileitung ($I = 577$ A) als konstant angenommen und somit nur der Strom angepasst. Bei der Bahn wurde als Strom der Bemessungsstrom einer üblichen Bahnstrecke angenommen ($I = 1027$ A).

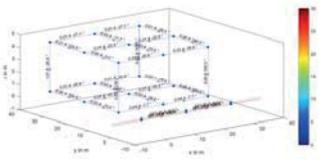


Abbildung 21: Induktive Beeinflussung - PA-Leiter-Stromaufteilung in einem Gebäude mit PA auf zwei Ebenen mit jeweils vier PA-Maschen beeinflusst durch ein dreiphasiges Kabel (Variante 6)

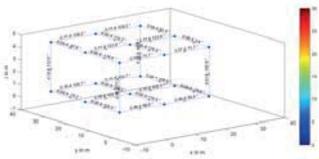


Abbildung 22: Induktive Beeinflussung - PA-Leiter-Stromaufteilung in einem Gebäude mit PA auf zwei Ebenen mit jeweils vier PA-Maschen beeinflusst durch eine Hochspannungsfreileitung (Variante 7)

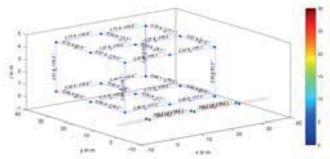


Abbildung 23: Induktive Beeinflussung - PA-Leiter-Stromaufteilung in einem Gebäude mit PA auf zwei Ebenen mit jeweils vier PA-Maschen beeinflusst durch eine Bahntrasse (16,7 Hz) (Variante 8)

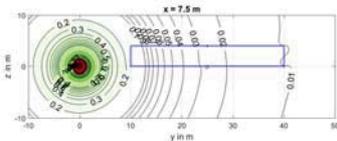


Abbildung 24: Magn. Flussdichte in μT - Vertikalschnitt bei $x = 7,5 m$ in einem Gebäude mit PA auf zwei Ebenen mit jeweils vier PA-Maschen beeinflusst durch ein dreiphasiges Kabel (Variante 6)

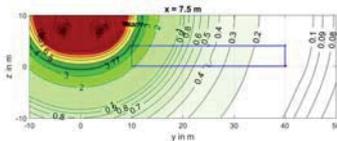


Abbildung 25: Magn. Flussdichte in μT - Vertikalschnitt bei $x = 7,5 m$ in einem Gebäude mit PA auf zwei Ebenen mit jeweils vier PA-Maschen beeinflusst durch eine Hochspannungsfreileitung (Variante 7)

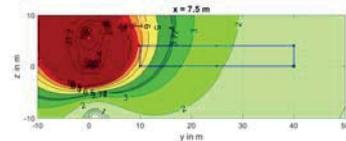


Abbildung 26: Magn. Flussdichte in μT - Vertikalschnitt bei $x = 7,5 m$ in einem Gebäude mit PA auf zwei Ebenen mit jeweils vier PA-Maschen beeinflusst durch eine Bahntrasse (16,7 Hz) (Variante 8)

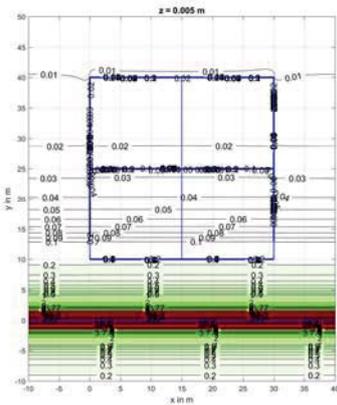


Abbildung 27: Magn. Flussdichte in μT - Horizontalschnitt bei $z = 5 mm$ in einem Gebäude mit PA auf zwei Ebenen mit jeweils vier PA-Maschen beeinflusst durch ein dreiphasiges Kabel (Variante 6)

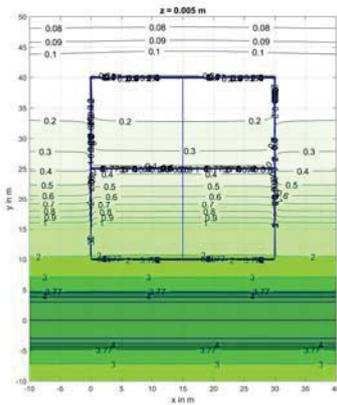


Abbildung 28: Magn. Flussdichte in μT - Horizontalschnitt bei $z = 5 mm$ in einem Gebäude mit PA auf zwei Ebenen mit jeweils vier PA-Maschen beeinflusst durch eine Hochspannungsfreileitung (Variante 7)

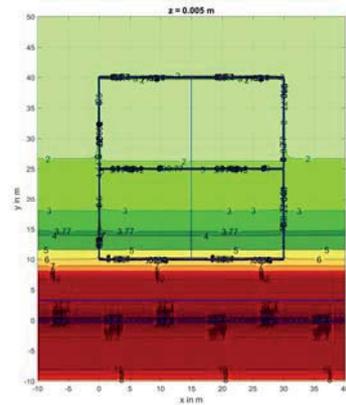


Abbildung 29: Magn. Flussdichte in μT - Horizontalschnitt bei $z = 5 mm$ in einem Gebäude mit PA auf zwei Ebenen mit jeweils vier PA-Maschen beeinflusst durch eine Bahntrasse (16,7 Hz) (Variante 8)

In den vorangegangenen Abbildungen der Varianten 6 bis 8 ist erkennbar, dass sowohl die magnetischen Felder als auch die Feldverzerrungen im Inneren des Gebäudes geringer sind als bei Variante 4 mit einem einphasigen Kabel. Erklärbar ist dies einerseits dadurch, dass bei den dreiphasigen Systemen die drei um 120° verschobenen Phasen und bei der Bahn die Schienen und der Rückleiter als Kompensationsleiter für das Magnetfeld eine schnellere Feldverringern mit dem Abstand bewirken ($1/r^2$ -Charakteristik gegenüber der $1/r$ -Charakteristik eines 1-Leitersystems). Außerdem ergeben sich aufgrund des größeren Abstandes zwischen den Leitern bei der Hochspannungsfreileitung höhere magnetische Felder als bei einem dreiphasigen Kabel, selbst wenn deren Kabelschirme nicht beidseitig sondern einseitig geerdet sind. Weiters ergeben sich bei den Varianten 6 bis 8 im Vergleich zu Variante 4 aufgrund des geringeren Feldes im Gebäudebereich auch geringere induzierte Ströme, was zur Folge hat, dass die Magnetfeld-Verzerrungen durch die PA-Struktur geringer ausfallen. Bei der Bahntrasse kommt noch hinzu, dass aufgrund der geringeren Frequenz die induzierten Ströme geringer sind und die Verzerrungen noch kleiner werden.

Magnetfelder aufgrund ohmscher Beeinflussung

In diesem Kapitel wird in einem ersten Schritt die Wirkung der vom externen einphasig stromdurchflossenen Leiter im Potentialausgleich des Gebäudes ohmsch eingekoppelten Ströme (diese ergeben sich durch die Stromaufteilung aufgrund des Widerstandsverhältnisses der Leiter), auf das Magnetfeld im Inneren des Gebäudes untersucht und als zweiter Schritt das gleichzeitige Auftreten von ohmscher und induktiver Beeinflussung auf Basis von Variante 4 simuliert.

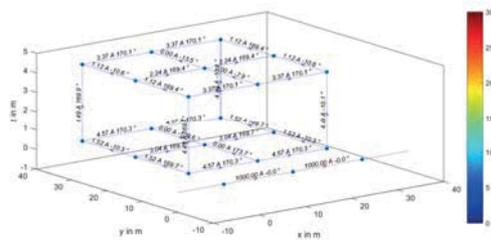


Abbildung 30: PA-Leiter-Stromaufteilung in einem Gebäude mit PA auf zwei Ebenen mit jeweils vier PA-Maschen bei ohmscher Beeinflussung (Variante 9)

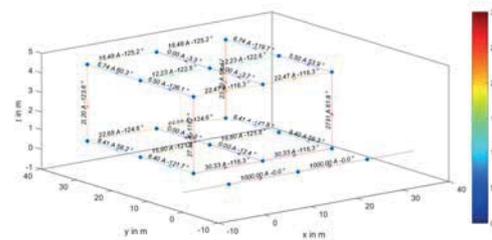


Abbildung 31: PA-Leiter-Stromaufteilung in einem Gebäude mit PA auf zwei Ebenen mit jeweils vier PA-Maschen bei Überlagerung der induktiven und ohmschen Beeinflussung (Variante 10)

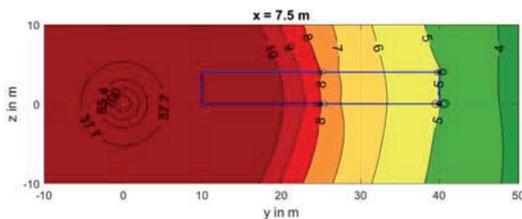


Abbildung 32: Magn. Flussdichte in μT - Vertikalschnitt bei $x = 7,5 \text{ m}$ in einem Gebäude mit PA auf zwei Ebenen mit jeweils vier PA-Maschen bei ohmscher Beeinflussung (Variante 9)

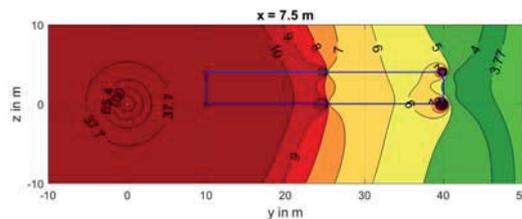


Abbildung 33: Magn. Flussdichte in μT - Vertikalschnitt bei $x = 7,5 \text{ m}$ in einem Gebäude mit PA auf zwei Ebenen mit jeweils vier PA-Maschen bei Überlagerung der induktiven und ohmschen Beeinflussung (Variante 10)

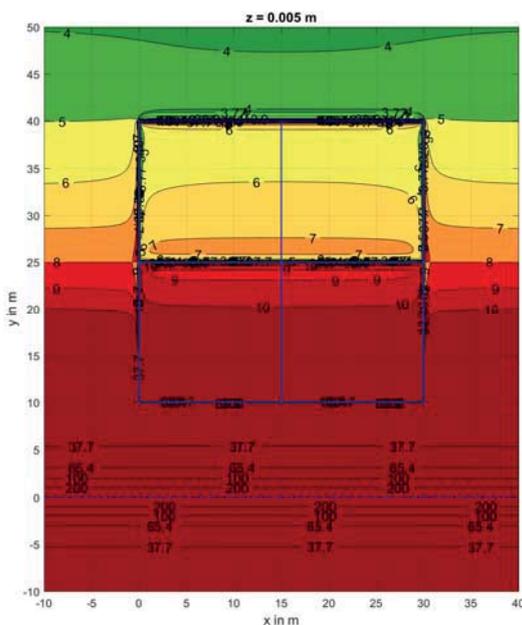


Abbildung 34: Magn. Flussdichte in μT - Horizontalschnitt bei $z = 5 \text{ mm}$ in einem Gebäude mit PA auf zwei Ebenen mit jeweils vier PA-Maschen bei ohmscher Beeinflussung (Variante 9)

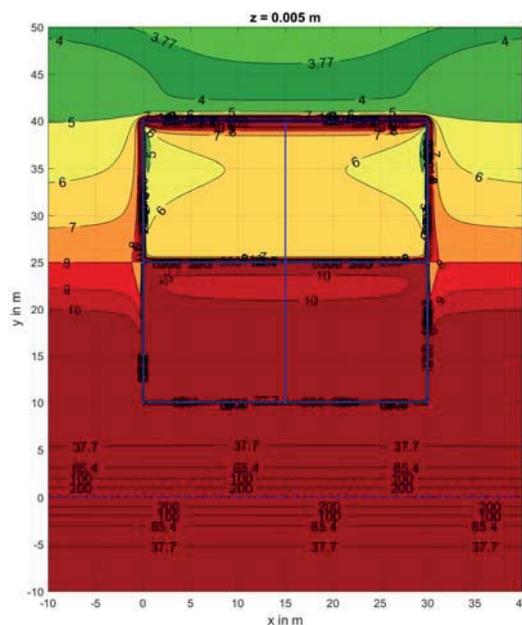


Abbildung 35: Magn. Flussdichte in μT - Horizontalschnitt bei $z = 5 \text{ mm}$ in einem Gebäude mit PA auf zwei Ebenen mit jeweils vier PA-Maschen bei Überlagerung der induktiven und ohmschen Beeinflussung (Variante 10)

Im Vergleich zur Variante 4 (induktive Beeinflussung) kommt es in Variante 9 (ohmsche Beeinflussung) zu einem homogenen und kleineren Feld innerhalb des Gebäudes (siehe Abbildungen 30, 32 und 34). Hier ist jedoch anzumerken, dass die eingekoppelten Ströme durch die ohmsche Beeinflussung stark von der Größe der Rückströme abhängen, die z.B. im Falle eines symmetrisch belasteten dreiphasigen Leitersystems gegen 0 gehen.

Im Falle einer Überlagerung der induktiven und ohmschen Kopplung kann es, wie in den Abbildungen 31, 33 und 35 zu sehen, zu einer Erhöhung der Magnetfelder im Inneren des Gebäudes kommen. Es kann aber durchaus, abhängig von den Phasenlagen der ohmsch und induktiv eingekoppelten Ströme, auch zu einer Verringerung des Magnetfelds kommen. Somit ist also eine Teilbetrachtung des Systems im Sinne einer alleinigen Berücksichtigung der ohmschen oder induktiven Beeinflussung hinsichtlich der Beurteilung der Höhe des auftretenden magnetischen Feldes im Innern eines Gebäudes nicht zielführend.

Induzierte Spannung in einem Telekommunikationsleiter

In Abbildung 36 ist ein im Gebäude befindlicher Telekommunikationsleiter (rot) eingezeichnet, in dem für die Varianten 1 bis 10 die in Tabelle 1 angeführten Spannungen gegen Erdpotential angeführt sind.

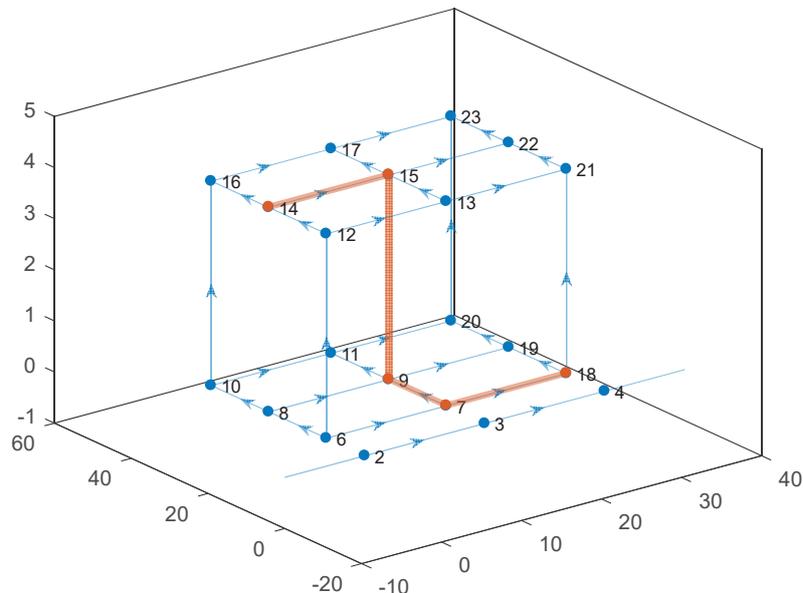


Abbildung 36: Prinzipielle Beeinflussungsanordnung mit Telekommunikationsleiter (rot)

Die induzierte Spannung in einen Teilleiter kann wie folgt berechnet werden:

$$U_i = I_j \cdot Z_{ik}$$

\underline{U}_i	induzierte Spannung in V
\underline{I}_j	beeinflussender Strom in A
\underline{Z}_{ik}	Koppelimpedanz in Ω/m

Für induktive Kopplungen zwischen Freileitungen, Kabeln, Kabelschirmen, Erdseilen, Reduktionsleitern und isolierten Leitern wird die folgende Näherung von Dubanton [5], [6] verwendet:

$$Z_{ik} = j \frac{\omega \mu_0}{2\pi} \cdot \ln \left(\frac{\sqrt{(h_i + h_k + 2\underline{p})^2 + x_{ik}^2}}{d_{ik}} \right) \quad \text{mit } \underline{p} = \frac{1}{\sqrt{j\omega\mu_0 / \rho}}$$

- $d_{ik} = \sqrt{x_{ik}^2 + (h_i - h_k)^2}$ Distanz zwischen den gekoppelten Leitern in m
- h_i Höhe des induzierenden Leiters in m
- h_k Höhe des induzierten Leiters in m
- \underline{p} komplexe Erdstromtiefe in m
- x_{ik} horizontale Distanz zwischen den gekoppelten Leitern in m
- $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Induktionskonstante in Vs/Am
- ρ spezifischer Bodenwiderstand in Ωm
- $\omega = 2\pi f$ Kreisfrequenz in $1/\text{s}$

U_{ind}	Variante									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$ U $ in V	8,48	8,44	8,37	8,29	8,60	0,01	0,11	0,84	8,74	8,48
Phase in °	75,9	74,8	73,5	71,4	80,0	168,3	-96,1	63,0	70,8	62,2

Tabelle 1: Induzierte Spannung in einem im Gebäude befindlichen Telekommunikationsleiter

Wie zu erwarten, ist die induzierte Spannung bei Beeinflussung durch ein dreiphasiges Kabel aufgrund des geringsten emittierten Feldes am kleinsten gefolgt von der Hochspannungsfreileitung und der Bahntrasse.

Aufgrund der Ausführungen in den vorherigen Kapiteln ist es überraschend, dass die Variante 9 „ohmsche Beeinflussung“ den höchsten Spannungswert ergibt und die Variante 10 „Überlagerung induktive und ohmsche Beeinflussung“ eine kleinere Spannung als in Variante 9. Hierbei muss wieder angemerkt werden, dass wegen der Komplexität des Beeinflussungssystems die induzierte Spannung in beeinflussten Leitern einzeln betrachtet werden muss, da je nach Lage des Leiters sich jede Variante als schlechteste erweisen könnte.

Maßnahmen

Um die Magnetfelder und damit EMV-Störungen zu minimieren werden hier drei konkrete in der Praxis zur Anwendung kommende Maßnahmen kurz dargestellt.

Die erste Maßnahme, um eine Minimierung der Magnetfelder zu erreichen, ist ein sorgfältig geplantes Erdungs- und PA-System unter Berücksichtigung des Gebäudestandortes, der architektonischen Gebäudestruktur, der technischen Gebäudeausführung hinsichtlich Armierung und Beachtung der zu erwartenden Emissionen von Betriebsmitteln im Gebäude. Schon anhand der einfachen Beispiele in der vorliegenden Arbeit ist zu erkennen, dass Erdungs- und PA-Systeme je nach Aufbau und Einfluss von außen unterschiedliche Wirkungen auf das Magnetfeld im Inneren des Gebäudes haben.

Weiters besteht die Möglichkeit das Magnetfeld mittels Abschirmungen zu minimieren. Erstens ist dabei als Anwendung die passive Abschirmung durch elektrisch leitfähige und/oder hochpermeable Platten zu erwähnen. Damit können ganze Räume oder sogar größere Gebäudebereiche sowohl gegen hohe als niedrige Magnetfelder abgeschirmt werden. Sollen nur räumlich eng eingegrenzte Bereiche abgeschirmt werden, kann eine aktive Abschirmung verwendet werden. Dabei werden drei parallele orthogonal zueinanderstehende Spulen nach dem Prinzip der Helmholtzspule im Raum angeordnet und abhängig vom am Ort des Magnetfeldsensors auftretenden Magnetfelds Ströme in die Spulen

eingepägt, um ein am Ort des Sensors entgegengesetztes Magnetfeld aufzubauen, um das störende Magnetfeld zu kompensieren.

Zusätzlich können noch sogenannte Kompensationsleiter in optimaler Nähe zu aktiven Leitern gebracht werden, sodass das Magnetfeld der Ströme in diesen Kompensationsleitern das Magnetfeld der aktiven Leiter minimiert.

Schließlich ist anzumerken, dass schon bei Beginn der Planung eines Gebäudes alle beteiligten Personen dem Thema der elektromagnetischen Beeinflussung genügend Bedeutung einräumen müssen, um in weiterer Folge benötigte Maßnahmen für den Gebäudebau in die Planung miteinfließen zu lassen. Diese Vorgangsweise hat sich schon in vielen Projekten als ökonomisch sinnvoll herausgestellt.

Schlussfolgerungen und Ausblick

In dieser Arbeit wird gezeigt, wie wichtig die Gesamtbetrachtung aller Störquellen (aktiv und passiv) außerhalb und innerhalb eines Gebäudes sowie die kombinierte Berücksichtigung der ohmschen und induktiven Beeinflussung im Hinblick auf die Beurteilung und Auswahl der richtigen Maßnahmen zur Feldverringern innerhalb eines Gebäudes ist.

Weiters werden die induzierten Spannungen in einen Telekommunikationsleiter, der im Gebäude verlegt wurde, berechnet und angeführt.

Ein wichtiger wissenschaftlicher Beitrag dieser Arbeit liegt in der qualitativen und quantitativen Erfassung bzw. Berechnung der Wirkung von passiv leitfähigen Gebäudestrukturen auf das Magnetfeld im Inneren eines Gebäudes. Es ist erkennbar, dass Gebäudestrukturen über mehrere Stockwerke hinweg zu einer Homogenisierung des Feldes innerhalb eines Gebäudes beitragen können, aber im Nahbereich der passiven Leiter durchaus auch deutlich höhere Felder zu erwarten sind.

In den weiterführenden Arbeiten müssen auf Basis der hier behandelten Beeinflussungsanordnungen komplexere Anordnungen und detailliertere Parameteruntersuchungen analysiert werden.

Literatur

- [1] W. Emmer, E. Schmutzner, K. Tiran, „Asymmetries of earthing arrangements and equipotential bonding systems in buildings and the effects on EMC“, 51st International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Coimbra, Portugal, 2016
- [2] ÖVE/ÖNORM EN 50310: Ausgabe 2011-06-01, „Anwendung von Maßnahmen für Erdung und Potentialausgleich in Gebäuden mit Einrichtungen der Informationstechnik“
- [3] ÖVE/ÖNORM EN 50173-1: Ausgabe 2011-10-01, „Informationstechnik - Anwendungsneutrale Kommunikationskabelanlagen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen“
- [4] ÖVE/ÖNORM EN 61000-6-1: Ausgabe 2007-12-01, „Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – Teil 6-1: Fachgrundnormen – Störfestigkeit für Wohnbereich, Geschäfts- und Gewerbebereiche sowie Kleinbetriebe (IEC 61000-6-1:2005)“
- [5] Á. Déri, G. Tevan: „Mathematical verification of Dubanton’s simplified calculations of overhead transmission line parameters and its physical interpretation“, Archiv für Elektrotechnik 63, 491-498
- [6] ITU-T, “Directives concerning the protection of telecommunication lines against harmful effects from electric power and electrified railway lines”, Vol. II, Calculating induced voltages and currents in practical cases, 1998
- [7] W. Emmer, „Programm zur Berechnung induktiver Beeinflussungen“, laufende Diplomarbeit am Institut für Elektrische Anlagen der TU Graz, 2014