

Beiträge zur Minimierung von elektromagnetischen Belastungen in Wohngebäuden

Teil 1 – Messungen von Bauteilen und Gebäuden

Autor

Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Leimer

Dipl.-Ing. Helgo Heuer

Prof. Dr.-Ing. Karl Heinz Kraft

HAWK–Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst Hildesheim - Fakultät Bauwesen
in Kooperation mit der Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel Fachbereich Elektrotechnik -
Labor für Hochfrequenztechnik

www.building-physics.net



Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Leimer

Studium der Architektur TFH Berlin. Studium des Bauingenieurwesens TU Braunschweig. Promotion HAB Weimar.

1984 bis 1989 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Baukonstruktion und Holzbau, Prof. Horst Schulze, TU Braunschweig. Seit 1990 Selbstständige Tätigkeit im BBS INGENIEURBÜRO – BBS INSTITUT. Seit Sept. 2000 Professor für Baukonstruktion und Bauphysik in der Fakultät Bauwesen der HAWK Hildesheim-Germany, Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst. Seit 2001 Präsident der Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e. V. in Europa. Seit 2007 Professor für Bauphysik an der Hefei University-China. Seit 2007 Direktor des Institutes für angewandte Bauphysik und Qualitätssicherung an der Hefei University-China

BBS INGENIEURBÜRO Wolfenbüttel/Weimar/Shanghai-China
Ingenieurbüro für Bauphysik, Baulonstruktion, Sanierungstechnik. Bauphysikalische Gutachten auf den Gebieten Wärme- Feuchte-, Schall-, Brandschutz; Klimasimulationsrechnungen und energetische Betrachtung von Gebäuden und Bauteilen; Firmenconsulting im bautechnischen Bereich.

BBS INSTITUTs Wolfenbüttel/Hildesheim/Hefei-China
Forschungs- und Materialprüfinstitut für angewandte Bauphysik und Werkstoffe des Bauwesens
Durchführung von Forschungsvorhaben; Baustoff- und Bauteilprüfungen im Bereich Wärme- Feuchte- und Schallschutz.



Dipl.-Ing. Helgo Heuer

Jahrgang 1972. Studium des Bauingenieurwesens an der TU Braunschweig. 1999 bis 2001 Mitarbeiter beim Schwedischen Institut für Holzforschung TRÄTEK in Skellefteå. Seit 2001 Mitarbeiter im BBS INGENIEURBÜRO.

Kurzfassung

Das Thema der Auswirkungen des Mobilfunks und der dazugehörigen Mobilfunkbasisstationen ist in den letzten Jahren sehr häufig diskutiert worden und ist derzeit, da die Anzahl der Sendestationen mit der Einführung der neuen „UMTS-Technologie“ ansteigt, noch ein Thema, welches sowohl in den Medien, als auch in Fachgremien diskutiert wird. Dies gab Anlass dazu die Exposition der Sendestationen (Frequenzbereich 890 MHz bis 2.100 MHz) von außen auf ein Gebäude zu untersuchen.

Entscheidend sind bei diesen Betrachtungen die biologischen Auswirkungen auf den Menschen. Die thermischen Effekte durch Mobilfunkstrahlung sind durch Wissenschaftler bewiesen und dienen als Grundlage für die existierenden, geltenden Grenzwerte in Deutschland und Europa. Viel umstritten sind jedoch die „nicht thermischen“ oder „athermischen“ Effekte, wie die Erhöhung des Krebsrisikos, der Einfluss auf die Sinnesrezeptoren und andere Effekte. Es existieren bereits viele Studien in diesem Bereich, die aber kein eindeutiges Bild ergeben.

Bei der Abschirmung eines Gebäudes hängt die Wahl der Abschirmungsmaterialien einerseits von dem Charakter der Störgröße und andererseits von dem vorliegenden Frequenzbereich ab. Abhängig vom Frequenzbereich unterscheidet man in elektrische Felder, magnetische Felder und elektromagnetische Wellen.

Stichwörter: EMV, Abschirmung, Schirmdämpfung, Gebäude

Research *electromagnetic shielding in Houses*

Abstract

The interest in the effects of the growing mobile radio market has increased recently, especially in special committees but also in the press in general. The main focus of this study is the exposition of transmitting stations with a frequency band of 890 MHz to 2.100 MHz and their impact on a building.

Crucial with these contemplations are the biological consequences for humans. The termic effects caused by the mobile radiation are scientificly proved and set the frame for the german and other european limiting values. On the contrary the “non termic” effects are very controversial. Although there are already a lot of studies, concerning for example the increased risk of cancer or the influence on the senses, the research on this field does not give satisfying answers.

The parameters for choosing the electromagnetic shield of a building depends on one hand on the magnitude of the interfering factors and on the other hand on the existent frequency band.

Key words: EMV, electromagnetic shielding, Buildings

1 Einführung

Mit der Zunahme informationstechnischer drahtloser Anwendungen bei hohen Frequenzen und den damit verbundenen elektromagnetischen Einflüssen rücken Fragestellungen zu möglichen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit in den Mittelpunkt des Interesses. Dabei wird das Wohngebäude zunehmend als Rückzugsbereich gesehen, von dem ein ausreichender Schutz vor elektromagnetischen Belastungen erwartet wird.

Durch eine Analyse von bestehenden Möglichkeiten und Grenzen der Abschirmung vor elektromagnetischen Feldern in Gebäuden wurde realistische Planungsziele abgeleitet und Schutzziele definiert. Den Schwerpunkt der Betrachtungen lagen hierbei der für den Mobilfunk relevante Frequenzbereich von ca. 1 GHz bis 2.5 GHz, in dem auch Datennetze auf Funkbasis („W-LAN“) angesiedelt sind. In diesem Zusammenhang ist darauf hinzuweisen, dass die zugehörigen Grenzwerte europaweit stark differieren.

Durch Bewertung der verfügbaren Schirmungsmethoden sollten baulaugliche Ansätze entwickelt und hinsicht-

lich ihrer Eignung verifiziert werden. Neben den schirmungsrelevanten Eigenschaften werden weitere bautechnisch relevante Eigenschaftsprofile untersucht. Dabei erscheinen sowohl die Integration schirmender Schichten in übliche Konstruktionslösungen oder die Realisierung bauphysikalischer Anforderungen über die Schirmschicht als mögliche Lösungsansätze.

Auf dem Markt existieren einige Produkte, die gute Dämpfungseigenschaften besitzen und eine hinreichende Abschirmung von Wand- und Dachaufbauten sowie Glasscheiben ermöglichen. Über eine sachbezogene Marktanalyse soll der aktuelle Stand eruiert und die beschriebene Eigenschaftsbewertung durchgeführt werden.

Ein besonderes Problem sind gebäudetypische Schirmungslücken. Neben der Identifikation der wesentlichen Schwachstellen soll eine Analyse zu möglichen Wirkungseinschränkungen erfolgen. Ziel ist die Entwicklung von realisierbaren Lösungen zur Beseitigung oder Reduzierung typischer Gebäudeschwachstellen. Die hierfür notwendigen baulich-konstruktiven Konzepte sollen entwickelt und hinsichtlich der realisierbaren Eigenschaftsprofile bewertet werden.

1.1 Bautechnische Grundlagen

Die Lösung der in Zusammenhang mit einer Optimierung der Schirmdämpfung von Gebäuden auftretenden Probleme setzt zunächst eine Sondierung der am Markt befindlichen Materialien und Systeme voraus. Dabei wird deutlich, dass es eine breite Auswahl an verschiedenen Stoffen und Systemen gibt, für die in den meisten Fällen qualifizierte Untersuchungsergebnisse bzw. Prüfzeugnisse vorliegen.

Neben der Schirmdämpfung der Materialien (und den aus Ihnen gebildeten Konstruktionen) sind aber vor allem Anschlussbereiche verschiedener Bauteile (z.B. Fenster - Wandanschluss) oder auch Durchdringungen (z.B. für Lüftungsrohre oder Leitungen) von entscheidender Bedeutung für die resultierende Schirmdämpfung eines Gebäudes bzw. Raumes. Diese Anschlüsse und Durchdringungen lassen sich nach geometrischen Aspekten (schlitzförmige / rechteckige und kreisförmige Aperturen) und nach materiellen und konstruktiven Merkmalen in verschiedene Gruppen einteilen.

Um den Prüfaufwand auf ein kontrollierbares Maß zu reduzieren wurde die Materialauswahl auf einige typische Vertreter der jeweiligen Gruppen beschränkt. Mittels dieser ausgewählten Materialien konnte zum einen die Eignung des entwickelten Prüfverfahrens durch Vergleich mit vorliegenden Messwerten bestätigt werden, zum anderen konnten verschiedene baupraktische Situationen im Prüfstand realitätsnah nachgebildet werden. Aus den ausgewählten Materialien und zu untersuchenden Geometrien wurde das Prüfschema von Abb. 1 entwickelt:

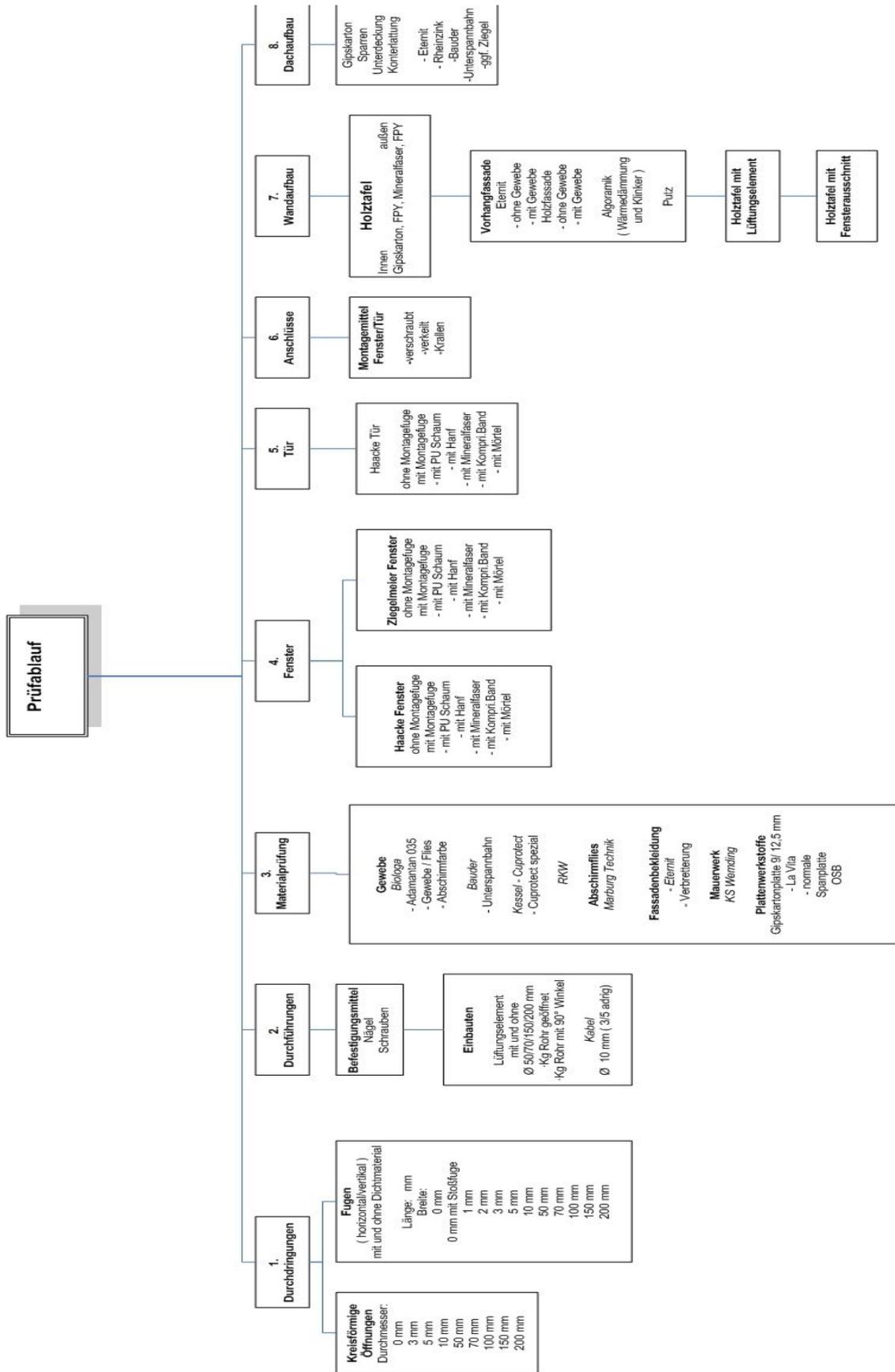


Abb. 1. Prüfablauf (nur ein Teil der dargestellten Prüfungen wird in diesem Teil der Veröffentlichung dargestellt)

2 Messmethoden und Aufbau eines Referenz-Messplatzes

2.1 Allgemeines

Zur Durchführung von Referenzmessungen und zum Test auch großflächiger Prüfkörper wird ein Messplatz mit größeren Abmessungen benötigt, der in Abb. 2 dargestellt ist und eine größere Öffnung zur Anbringung von Gebäudekomponenten enthält.



Abb. 2. Referenz-Messplatz.

2.2 Mechanische und geometrische Eigenschaften

Der Referenz-Messplatz ist durch folgende Eigenschaften gekennzeichnet:

- Außenabmessungen (Breite, Tiefe, Höhe) 1.45 m, 1.50 m, 2.80 m;
- Wandstärke 3 cm, bestehend aus Spanplatte (2 cm) und Gipskartonplatte (innen, 1 cm);
- Außenschicht handelsübliche Aluminiumfolie, Dicke 13 μm ;
- Aufbau auf Groundplane (Aluminiumblech, damit großflächig geerdet);
- Vorderseite als Prüffläche, Rückseite mit festverschließbarer Tür (Einsatz von Dichtungstreifen);
- Einbau verschiedener Messobjekte und Materialien an der Vorderseite, die der außen aufgestellten Sendeantenne zugekehrt ist.

2.3 Referenzmessungen

Zunächst ist zu untersuchen, welche Schirmdämpfung der hermetisch mit Aluminiumfolie abgeschirmte Messkörper aufweist. Dazu wird die Sendeantenne im Abstand von 40 cm in mittlerer Höhe vor der Vorderseite des Messkörpers aufgestellt. Die Empfangsantenne befindet sich etwa in der geometrischen Mitte des Messkör-

pers, im Abstand von 30 cm hinter der Vorderseite, so dass die gesamte Messentfernung mit Beachtung der Wanddicke $r=70$ cm beträgt. Der Test bezieht sich sowohl auf horizontale Polarisation (Ausrichtung) als auch auf vertikale Polarisation der beiden Antennen, bei einer Höhe von $h=146$ cm.

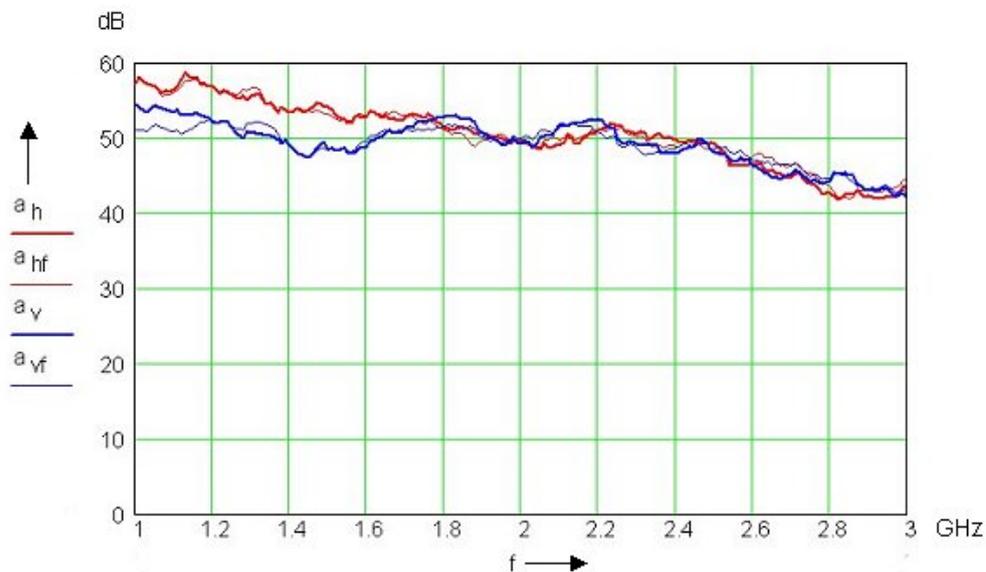


Abb. 3. Gemessene Schirmdämpfung des Referenz-Messplatzes; horizontale und vertikale Polarisation, jeweils bezogen auf den Fall mit offener Tür sowie auf den freien Raum.

Es wird deutlich, dass sich horizontale und vertikale Polarisation kaum unterscheiden, dass die Fälle mit Bezug auf die offene Tür und auf den freien Raum sehr ähnlich sind und dass die Dämpfung mit der Frequenz abnimmt. Die erreichten Werte zwischen ca. 42 dB und 58 dB sind durchaus beachtlich und zeigen, dass der Messkörper korrekt mit Aluminiumfolie „eingepackt“ worden ist, so dass keine „Schlupflöcher“ frei bleiben.

3 Ergebnisse ausgewählter Messungen

3.1 Grundlegende Aussagen zum Messplatz

Durch die Abstrahlcharakteristik bikonischer Antennen kommt es in Verbindung mit dem geringen Abstand von ca. 30 cm zu einer „Bestrahlung“ einer Fläche von ca. 60 cm Durchmesser auf der Vorderseite des Prüfstandes. Dies entspricht in etwa den Abmessungen der Materialproben von ca. 60 x 60 cm. In der Folge kann davon ausgegangen werden, dass mit dem gewählten Versuchsaufbau tatsächlich nur die Schirmdämpfung des Materials und nicht eine flächengewichtete resultierende Dämpfung der Frontwand mit Prüfobjekt gemessen wird.

3.2 Übersicht der Messergebnisse

An oben beschriebenem Referenzmessplatz wurde die Schirmdämpfung einer Vielzahl von Materialien und Konstruktionen untersucht. Die Darstellung aller Ergebnisse im Text würde den Rahmen dieses Berichtes sprengen, so dass hier nur für eine Auswahl der gemessenen Schirmdämpfungswerte für die wichtigsten Frequenzen entsprechend den gängigen Mobilfunkfrequenzen tabellarisch wiedergegeben werden.

Tab. 1: Schirmdämpfungswerte der untersuchten Materialien und Konstruktionen

Baustoffgruppe Bezeichnung	Schirmdämpfungswerte [dB]			
	D-Netz 0,90 GHz	E-Netz 1,80 GHz	UMTS 2,00 GHz	W-Lan 2,45 GHz
Holzwerkstoffe, Vollholz				
Spanplatte 16 mm	8,48	2,76	2,44	6,58

Baustoffgruppe Bezeichnung	Schirmdämpfungswerte [dB]			
	D-Netz 0,90 GHz	E-Netz 1,80 GHz	UMTS 2,00 GHz	W-Lan 2,45 GHz
Sperrholz Buche 12 mm	2,29	5,17	5,30	5,23
Sperrholz Teak 12mm	1,70	4,98	5,04	3,54
Fichte Profildreher 20 mm	9,44	4,32	3,77	6,95
Plattenwerkstoffe				
Gipskartonplatte 9 mm	7,94	2,02	1,47	5,68
Faserzementplatte	0,75	2,38	1,78	4,18
EMV Gipskartonplatte- Schutzplatte	12,49	14,72	13,63	15,32
Dämmstoffe				
Mineralwolle 100 mm	7,37	1,54	0,97	4,20
Wärmedämmverbundsysteme				
WDVS mit Abschirmgewebe	47,90	48,51	46,75	49,42
Fenster				
Holzfenster	20,07	20,73	25,22	22,48
Kunststofffenster	23,13	26,07	26,09	31,40
EMV Holzfenster	21,94	22,30	23,79	20,53
EMV Festverglasung	55,60	49,27	48,70	44,99
Gewebe				
Unterspannbahnen	31,00	28,37	28,32	29,33
Metallgewebe	41,65	41,95	39,29	35,98
Kupfergewebe	41,24	40,48	40,79	41,15
Abschirmvlies	47,43	48,40	46,94	47,29
Wandaufbauten				
Holzständerwand, EMV-optimiert	53,66	51,18	50,05	48,56
... - mit Fenster	28,78	21,53	23,28	27,01
... - mit Durchdringung	19,73	20,90	17,94	22,98

3.3 Beschreibung ausgewählter Messergebnisse

3.3.1 Materialien

Eine gute Schirmdämpfung kann z.B. mit Aluminiumfolie oder anderen flächigen Materialien erreicht werden, wie die Messergebnisse für die Referenzwand in Abschnitt 2.3 zeigen. Im Vergleich hierzu sind z.B. aluminiumkaschierte GK-Platten (genadelt und nicht genadelt) sowie sehr feinmaschiges Kupfergewebe oder Gipskarton-Schutzplatten-EMV zu betrachten.

Abb. 4 zeigt die Schirmdämpfung für zwei aluminiumkaschierte GK-Platten. Trotz einer feinen Nadelung (Lochdurchmesser 0.4 mm, Raster 1x1 cm) wird eine gute Dämpfung erzielt. Der erwünschte Effekt der Nadelung liegt dabei in der Erhöhung der Diffusionsfähigkeit. Im Vergleich dazu ist der Verlauf der Schirmdämpfung des mit Aluminiumfolie verkleideten Prüfstandes dargestellt.

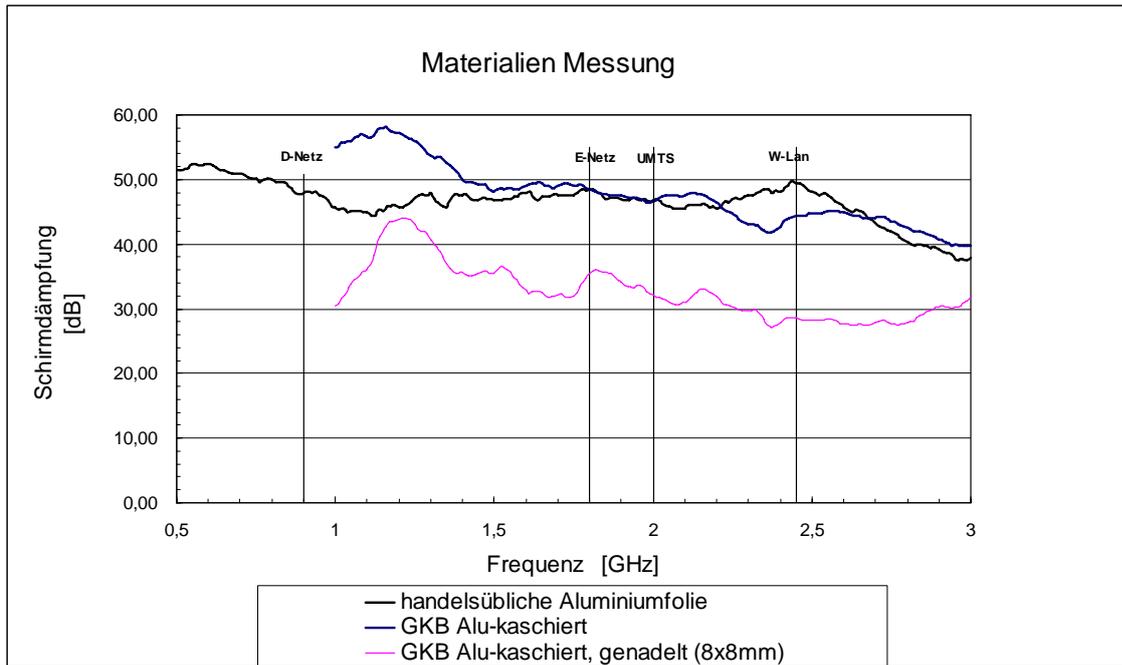


Abb. 4. Alukaschierte GK-Platten: ohne Lochung (blaue Linie oben) und mit feiner Nadelung (violette Linie Mitte)

Kupfergewebe sowie spezielle Gipskarton-Schutzplatten-EMV werden bereits seit einigen Jahren in der Praxis eingesetzt. Bei sehr feinmaschigem Gewebe (hier: 0.5 mm Maschenweite) können sehr gute Dämpfungswerte erzielt werden. Mit zunehmender Maschenweite nimmt die Dämpfung ab und entspricht ab einer Maschenweite von ca. 3 mm der Dämpfung einer Gipskarton-Schutzplatte.

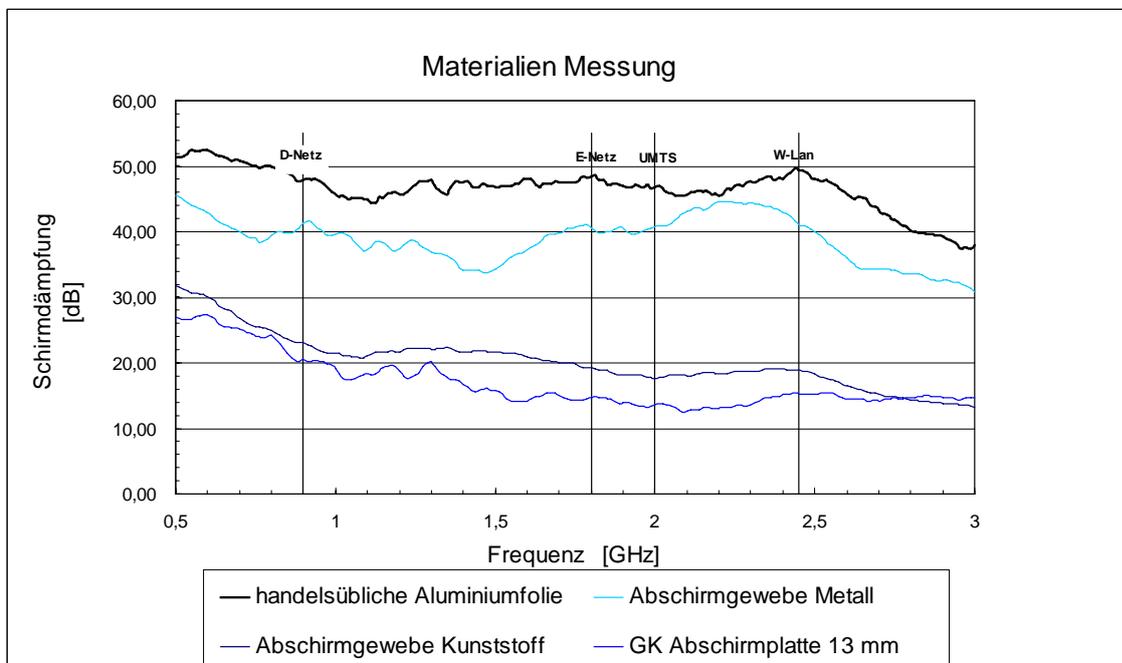


Abb. 5 : Abschirmgewebe (Maschenweite $d=0.5$ mm 2. Reihe von oben und $d=3$ mm 2. Reihe von unten) im Vergleich zu einer GK-Schutzplatte

3.3.2 Konstruktionen

An die Prüfung der einzelnen Materialien schließt sich die Untersuchung von Konstruktionen bzw. Systemen an. Dazu zählen z.B. Wärmedämmverbundsysteme mit schirmenden Gewebeeinlagen, Fenster und Wandaufbauten. Als Wandaufbau dient eine Holzständerwand, welche in verschiedener Weise modifiziert wird. Die Modifikationen umfassen dabei unterschiedliche Beplankungen außen- wie innenseitig sowie den Einbau von Durchdringungen und Fenstern.

Wie aus Abb. 6 zu erkennen ist, hat die Wanddicke keinen Einfluss auf die Schirmdämpfung, woraus unmittelbar abgeleitet werden kann, dass der im Wandquerschnitt verwendete Mineralfaserdämmstoff keine Schirmdämpfung besitzt.

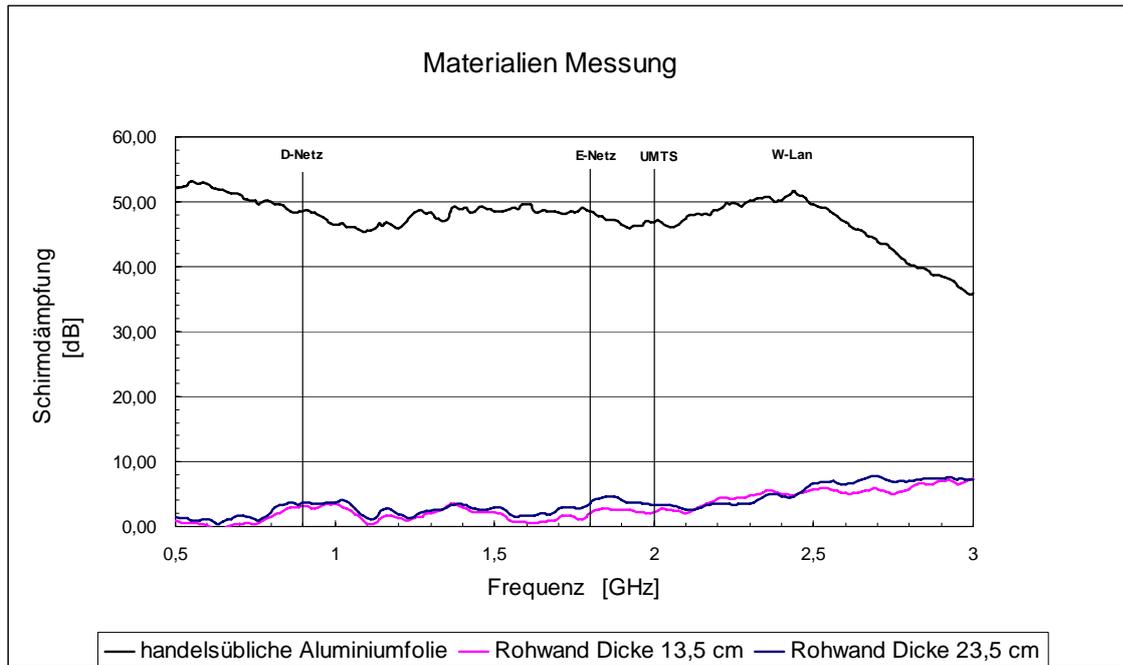


Abb. 6 : Schirmdämpfung von Holzständerwänden unterschiedlicher Dicke

Zur Verbesserung der Schirmdämpfung der Wand ($d=200$ mm) wird raumseitig eine Beplankung aus Gipskarton-Schutzplatten-EMV aufgebracht. Die Beplankung wird zunächst einlagig, dann zweilagig ausgeführt. Die Ergebnisse zeigt Abb. 7 :

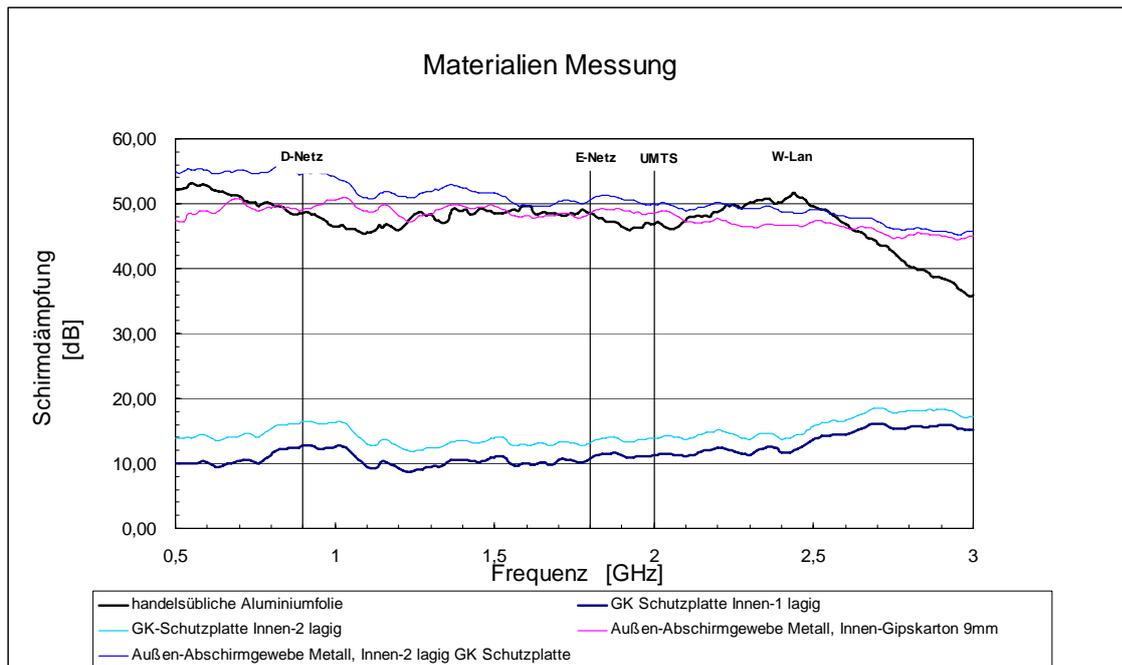


Abb. 7 : Holzständerwand mit zusätzlichen Schirmungsmaßnahmen

Durch das Anbringen eines Abschirmgewebes (im gezeigten Beispiel: Kupfergewebe, Maschenweite <0.5 mm) kann die Schirmdämpfung der Wand signifikant gesteigert werden.

3.3.3 Fenster

Die Messung von Fenstern im Prüfstand ergab für die Verglasungen erwartungsgemäß gute Werte. Die Dämpfungsmaße von Standard-Wärmeschutzverglasungen liegen im Mittel bei ca. 20 bis 25 dB. Spezialverglasungen mit besonderen Beschichtungen wie z.B. Sonnenschutzverglasungen oder auch Wärmeschutzverglasungen mit drei Glasebenen (und dadurch einer zusätzlichen metallbedampften Schicht) erzielen Werte bis zu 50 dB!

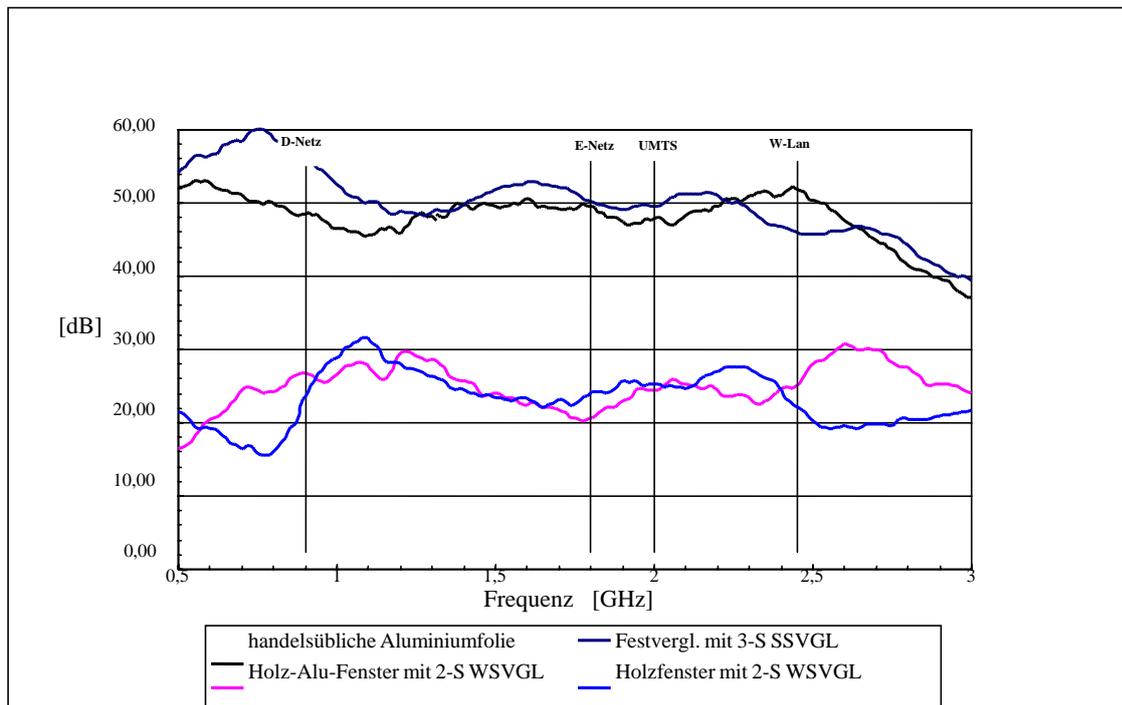


Abb. 8: Schirmdämpfung von 2-Scheiben-Wärmeschutzverglasung und 3-Scheiben-Sonnenschutzverglasung

Die Schwachstelle bei Fenstern ist wiederum im Bereich des Anschlusses an den Baukörper bzw. in der Funktionsfuge zwischen Fensterflügel und Rahmen zu sehen. Die folgenden Abbildungen zeigen die Messresultate im Bereich des Fensterrahmens bzw. der Anschlussfuge im Vergleich zur Schirmdämpfung in Scheibenmitte einmal am Beispiel eines handelsüblichen Holzfensters und einmal für ein speziell ausgerüstetes EMV-Schutzfenster, ebenfalls mit Holzrahmen. Bei dem Spezialfenster wurde ein Kupfergewebe in den Holzrahmen eingearbeitet. Während beim herkömmlichen Fenster die Dämpfung im Bereich der Randfugen stark abnimmt, bleibt sie beim speziell ausgerüsteten Schutzfenster auf dem Niveau der Verglasung bzw. übersteigt dieses sogar noch (siehe Abb. 9)!

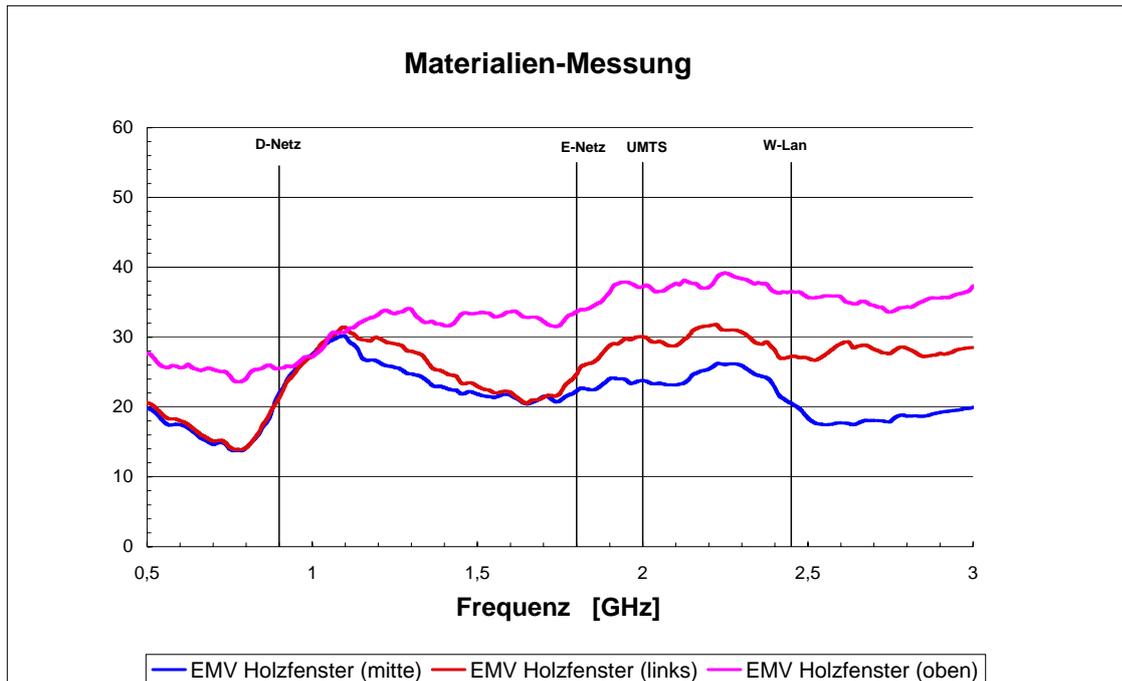


Abb. 9: Schirmdämpfung der Verglasung und der Randbereiche eines speziellen EMV-Holzfensters

4 Messungen an Gebäuden

4.1 Räumlich-geometrische Anordnung

An zwei Holzhäusern in Tafelbauart, 1) in Celle (Typ „C“), 2) in Potsdam (Typ „P“), konnten im Rahmen des Projektes Messungen der effektiven Schirmdämpfung (as[dB]) durchgeführt werden. Beide Häuser sind vom Typ Stadtvilla. Die Häuser weisen im Prinzip ähnliche Grundrisse und Abmessungen auf, jedoch wurde bei dem Haus „P“ explizit Wert auf eine umwelttechnisch nachhaltige und auch EMV abschirmende Ausrichtung gelegt. So sind bei diesem Gebäude Dämmstoffe auf Basis von nachwachsenden Rohstoffen (Hanf und Kork) verwendet worden. Die raumseitigen Wandoberflächen sind mit Gipskartonplatten-Schutzplatten-EMV beplankt.

Tab. 2: Wandaufbauten der untersuchten Musterhäuser

Haus Typ „C“		Haus Typ „P“	
Klinker-Riemchen	ca. 16 mm	Mineralischer Außenputz	ca. 5 mm
Wärmedämmung Polystyrol	40 mm	Wärmedämmung auf Korkbasis	40 mm
Spanplatte V100 ff	13 mm	Spanplatte V100 ff	13 mm
Holzständerwand mit mineralischer Faserdämmung	160 mm	Holzständerwand mit Dämmstoff auf Hanfbasis	200 mm
Spanplatte V100 ff	13 mm	Spanplatte V100 ff	13 mm
Gipskarton, tapeziert	9 mm	EMV Schutzplatte, tapeziert	9 mm

In beiden Musterhäusern sind Holzfenster mit einer gewöhnlichen Wärmeschutzverglasung (U-Wert 1.1 W/(m²K)) eingebaut.

Zur Messung der resultierenden Schirmdämpfung wird die Sendeantenne außerhalb der Gebäude in definiertem Abstand aufgestellt, während die Empfangsantenne an speziellen Stellen innerhalb der Gebäude positioniert wird. Für die Untersuchung einzelner Schwachstellen oder Bauteile wie z.B. Wänden oder Fensterverglasungen wird ein definierter Abstand von $r=1.00$ m gewählt.

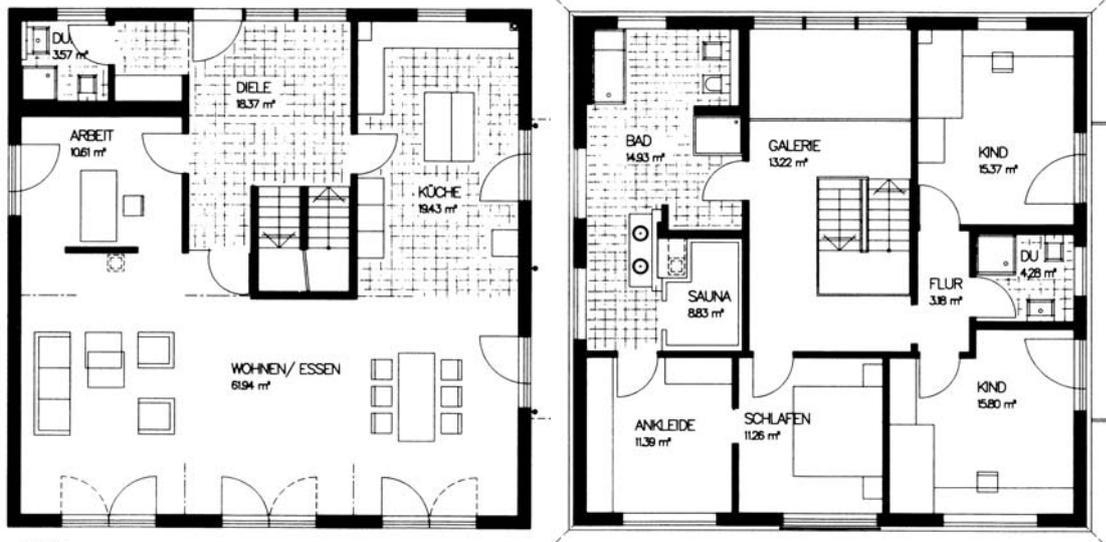


Abb. 10: Grundriss von Typ „C“.

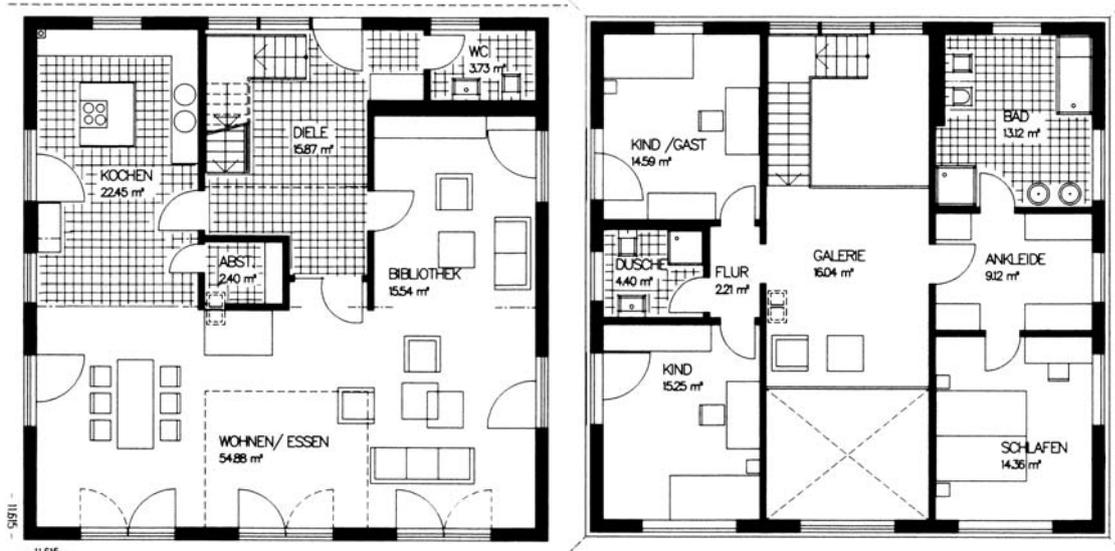


Abb. 11: Grundriss von Typ „P“.

4.2 Messergebnisse

Die Auswertung der Messungen erfolgt in mehreren Schritten:

- Definition von Referenzwerten über Freifeldmessungen,
- Auswertung für Typ „C“,
- Auswertung für Typ „P“,
- ausgewählte Vergleiche.

Die Schirmdämpfung wird über die Beziehung $a_s = P_{e0}^* - P_e^*$ gewonnen, mit der Empfangsleistung P_{e0}^* (in dBm) im freien Raum als Referenz, bei unterschiedlichen Entfernungen, die hier bei verschiedenen Messpunkten in den Gebäuden unvermeidlich sind, ist eine Entfernungskorrektur über den Zusammenhang $P_{e1}^* = P_{e0}^* - 20 \cdot \log(r_1/r_0)$ erforderlich. Dabei geben $r_0 = 10$ m und der Pegel P_{e0}^* die nominellen Bezugsgrößen an, während P_{e1}^* den korrigierten Wert für die Entfernung r_1 liefert. Diese Umrechnung ergibt sich über die ideale Freiraumdämpfung $a_F = 10 \cdot \log(4 \cdot \pi \cdot r / \lambda)^2$ dB. Im Übrigen beziehen sich alle Messungen in diesem Zusammenhang auf horizontale Ausrichtung der beiden Antennen.

4.2.1 Freifeldmessungen

Die Ergebnisse verschiedener Messungen im Freifeld sind in Abb. 12 zu sehen, und zwar für $r_0 = 10$ m in Celle und Potsdam, jeweils geglättet und ohne Glättung mit der typischen Welligkeit, die durch Reflexionen in der Messumgebung, insbesondere am Boden entstehen. Die Einbrüche (lokale Minima der gestrichelten Kurven) hängen von der Messentfernung, von der Antennenhöhe, von den frequenzabhängigen Antenneneigenschaften und von den Reflexionseigenschaften der Umgebung ab, wobei hier der feuchte Boden bei horizontaler Polarisation einen Reflexionsfaktor von $R \approx -1$ ergibt. Wegen der unterschiedlichen Messumgebungen weichen die Ergebnisse natürlich leicht von einander ab. Abb. 12 enthält weiterhin das Ergebnis für die Korrektur bei $r = 1$ m. In diesen Empfangspegeln ist die Leitungsdämpfung der verwendeten Koaxialkabel enthalten. Die Gesamtlänge beträgt hier ca. 40 m, was wegen der Positionierung des Messgeräts (VNA) im Gebäude notwendig war. Sie hebt sich natürlich bei der Messung der Schirmdämpfung heraus, weil bei der Untersuchung der Schirmwirkung dieselben Komponenten eingesetzt werden.



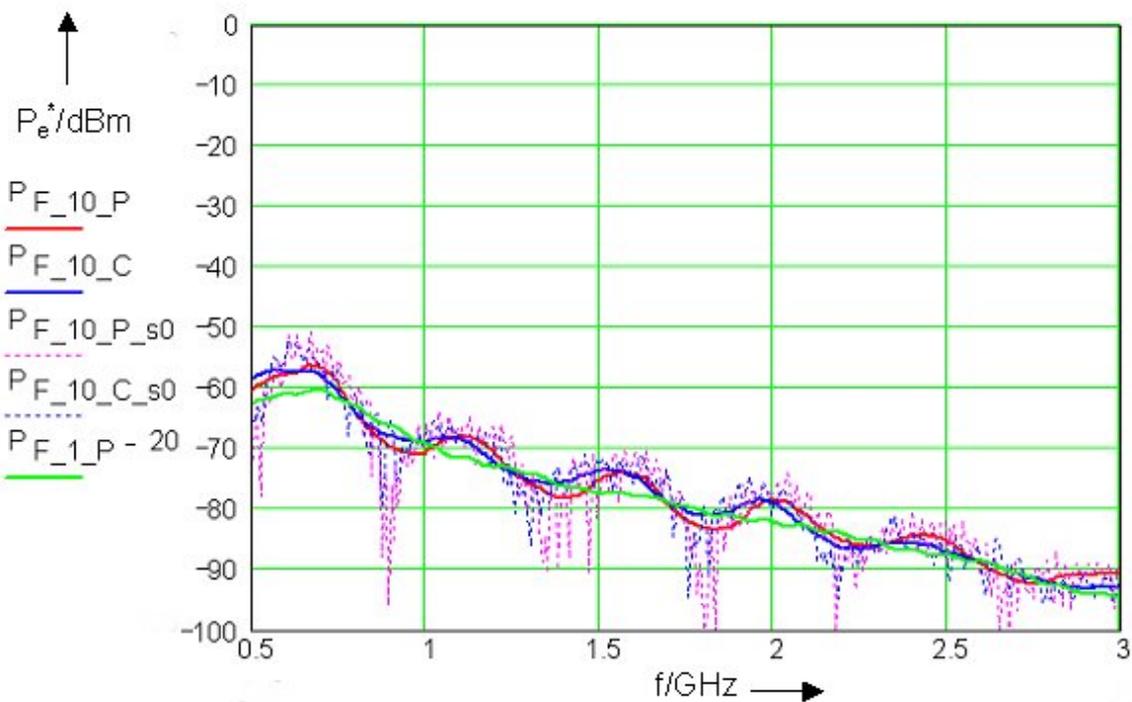


Abb. 12: Empfangspegel bei Freifeldmessungen in Celle („C“) und in Potsdam („P“).

4.2.2 Schirmdämpfung im Musterhaus „C“

Die Messungen beziehen sich auf drei Messpunkte im Erdgeschoss (Esszimmer „E“, Mitte zwischen Ess- und Wohnzimmer „EW“ und Flur „Fl“, siehe Abb. 13) sowie auf drei Messpunkte im Dachgeschoss (Kinderzimmer 1 „K1“, Schlafzimmer „S“ und Flur oben „Flob“, siehe Abb. 14). Die unterschiedlichen Entfernungen zwischen 10 m und 20 m wurden bei der Auswertung berücksichtigt und sind bei den Bezeichnungen der Messkurven mit angegeben. Die Dämpfungswerte liegen je nach Frequenz zwischen 0 und ca. 18 dB. Der Bereich „EW“ schneidet am ungünstigsten ab (Außenwand in der direkten Verbindungslinie zwischen Sende- und Empfangsantenne; der negative Bereich bei ca. 0.8 GHz ergibt sich aus destruktiven Reflexionen). Der Fensterbereich (dominierend bei „E“ liefert etwas bessere Werte, während der Flurbereich (vermutlich wegen der Zwischenwände) die höchste Schirmdämpfung zeigt. In einem Gebäude ist grundsätzlich mit erheblichen Feldstärkeschwankungen zu rechnen, je nach Einstrahlungsrichtung und Frequenz, was auch durch Abb. 14 (Dachgeschoss) bestätigt wird. Die Wertebereiche im Dachgeschoss sind ähnlich wie im Erdgeschoss.



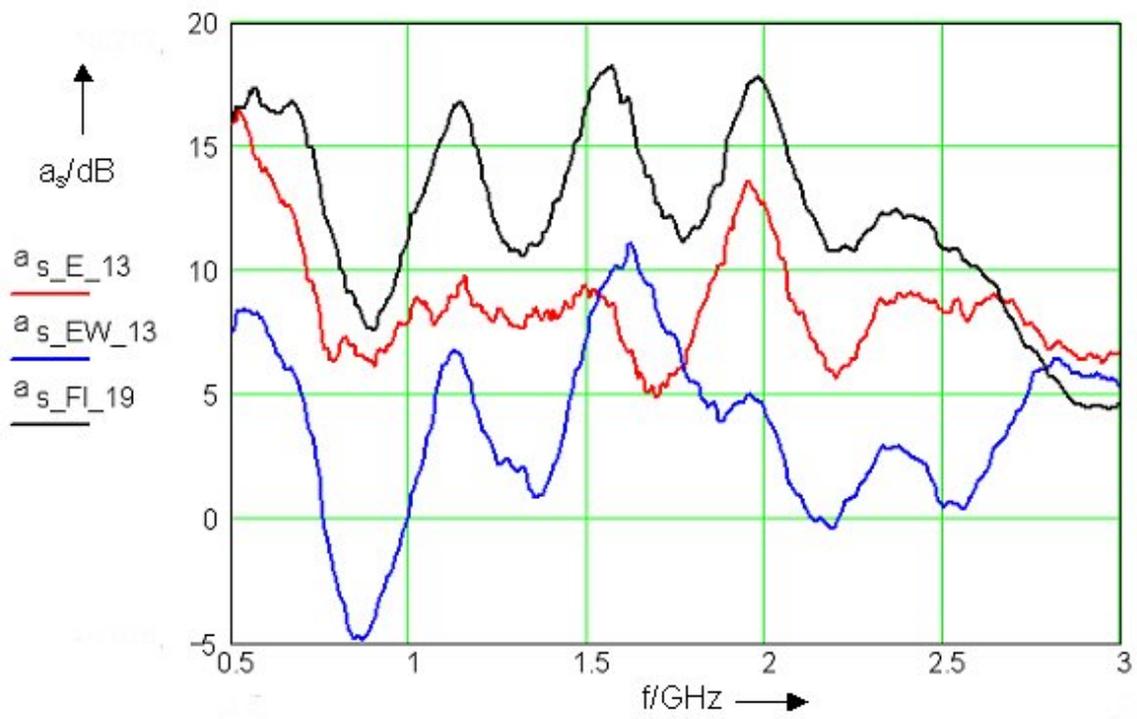


Abb. 13: Schirmdämpfung für verschiedene Messpunkte im EG von Haus „C“.



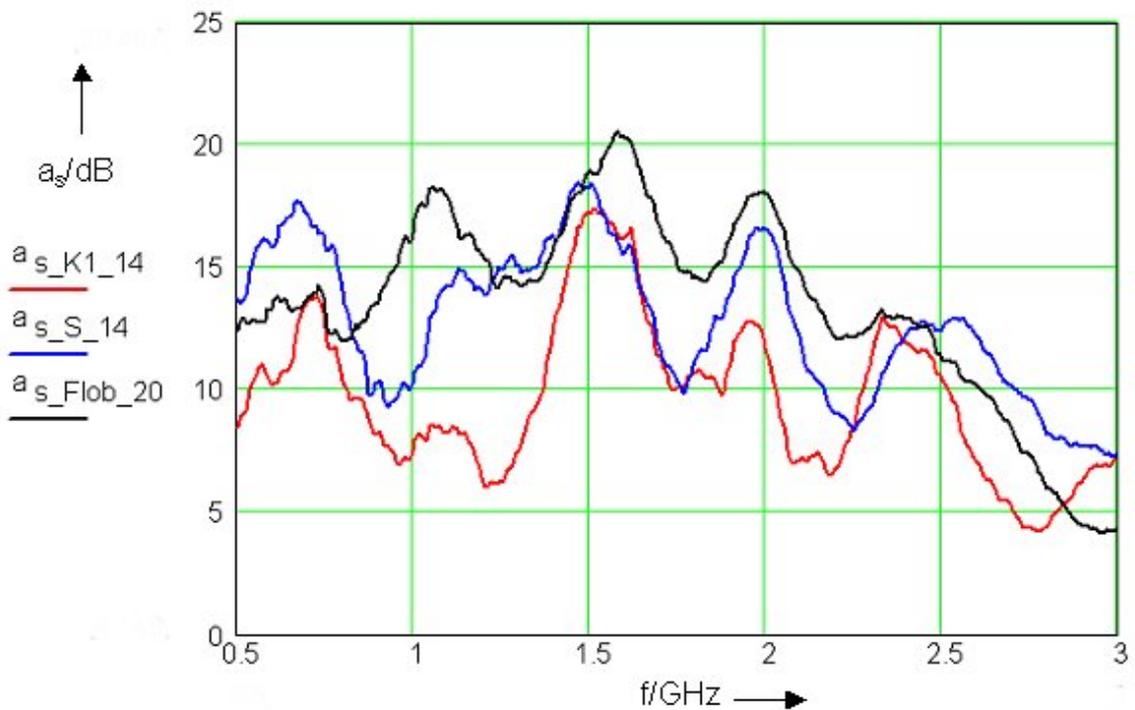


Abb. 14: Schirmdämpfung für verschiedene Messpunkte im DG von Haus „C“.

Zur speziellen Betrachtung der Bereiche „Fenster“ und „Wand“ dient die Auswertung der zugehörigen Messungen, vorzugsweise im Messabstand von 1 m. Im Detail handelt es sich um die Bereiche Wand „W“, Fenster gesamt „Fe“, Scheibe „Sch“ und Anschluss „A“. Auch hier kann man eine starke Frequenzabhängigkeit beobachten. Auffällig ist die hohe durchschnittliche Dämpfung der reinen Scheibe.



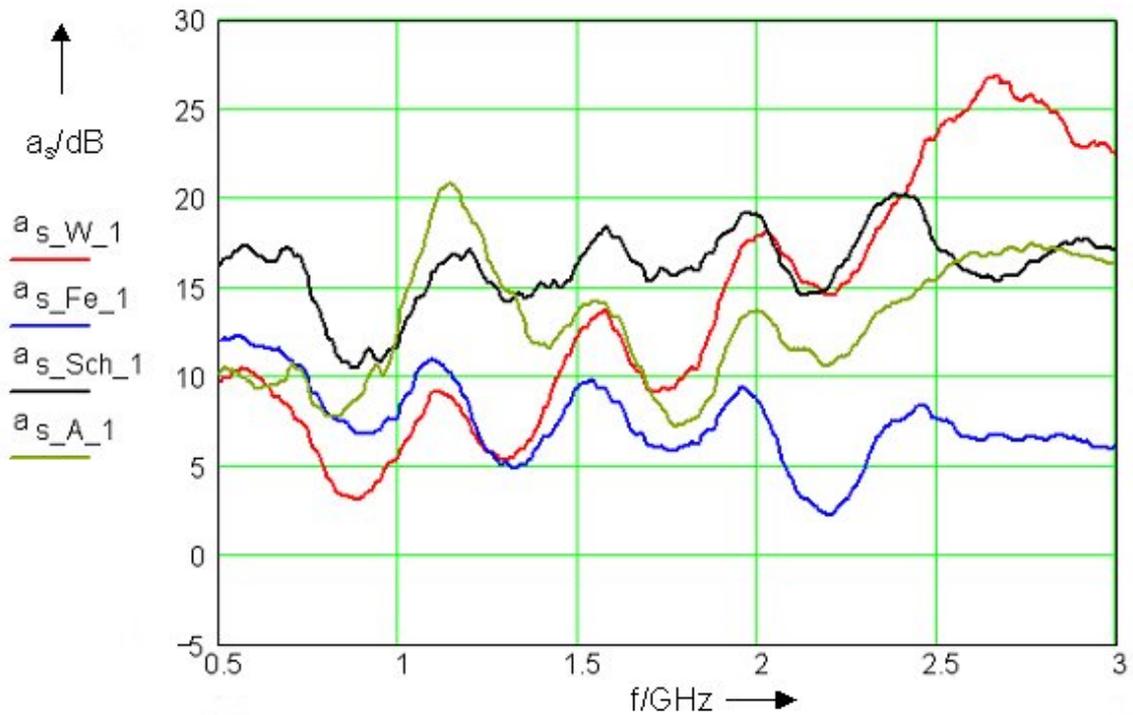


Abb. 15: Schirmdämpfung in den Bereichen Wand und Fenster für Typ „C“.

4.2.3 Schirmdämpfung im Musterhaus „P“

Analog zu Typ „C“ können die Messergebnisse im Musterhaus „P“ diskutiert werden (Abb. 16 bis 18). Die Zuordnung der Räume (anderer Grundriss) ist unterschiedlich, die Messanordnung aber sehr ähnlich. Die Ergebnisse „E“ und „EW“ zeigen nur geringe Unterschiede. Dagegen liegen die Werte für „F1“ bei niedrigen Frequenzen etwas höher, weisen aber sonst keine signifikanten Unterschiede auf. Ähnliche Resultate zeigen die Messungen im Dachgeschoss. Maximal werden Werte bis zu 20 dB erreicht.



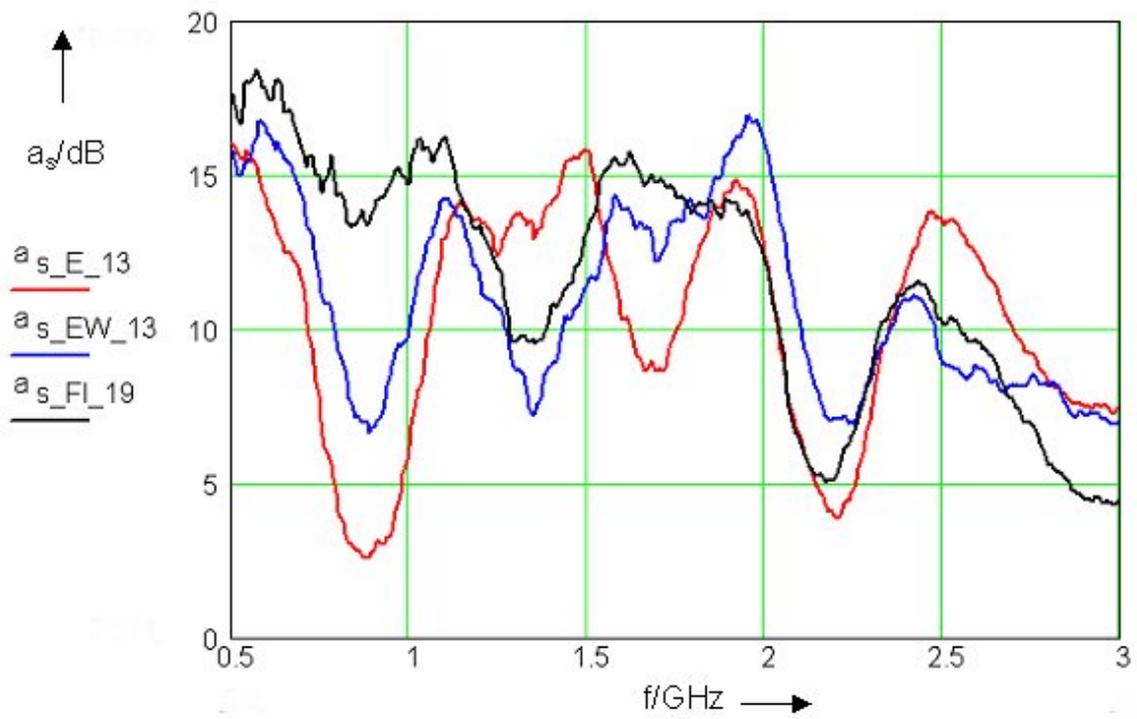


Abb. 16: Schirmdämpfung für verschiedene Messpunkte im EG von Haus „P“.



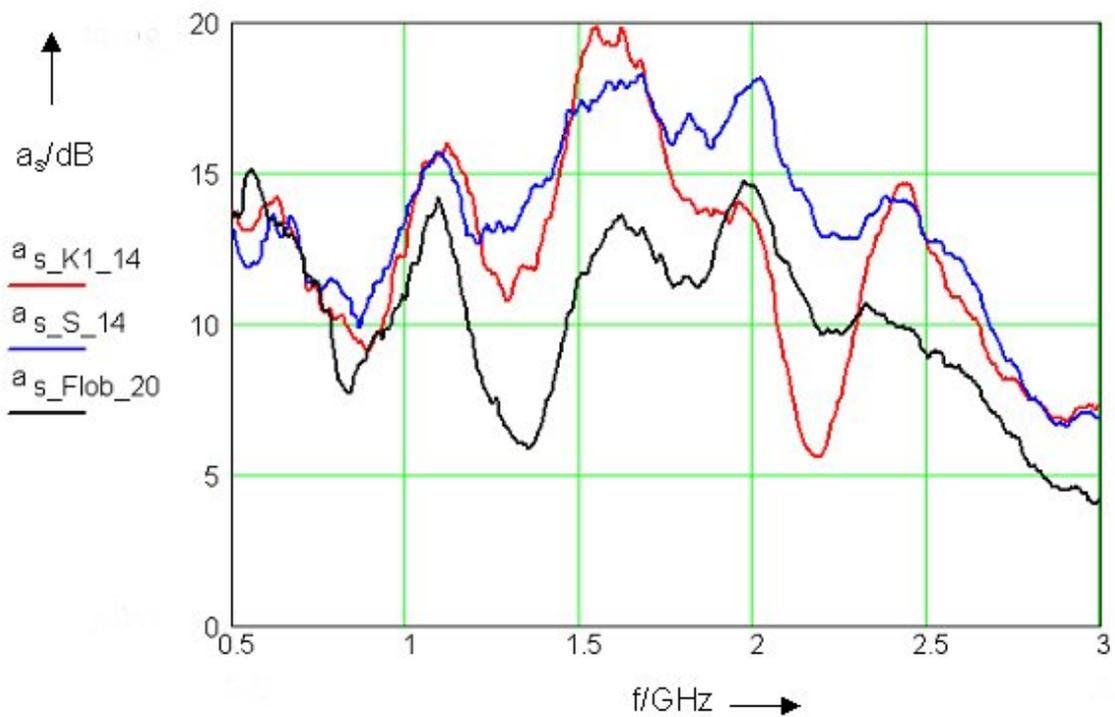


Abb. 17: Schirmdämpfung für verschiedene Messpunkte im DG von Haus „P“.

Bei der Auswertung von Wand- und Fensterbereich schneidet auch hier die Scheibe am besten ab, es ergibt sich ein mittlerer Wert von ungefähr 20 dB, während die Wand nur auf ca. 10 dB kommt. Das Fenster mit Öffnungsvorrichtung in der Mitte zeigt bei zentraler Ausrichtung der Antennen deutlich schlechtere Dämpfungswerte als die reine Scheibe, wie auch bei Abb. 15.



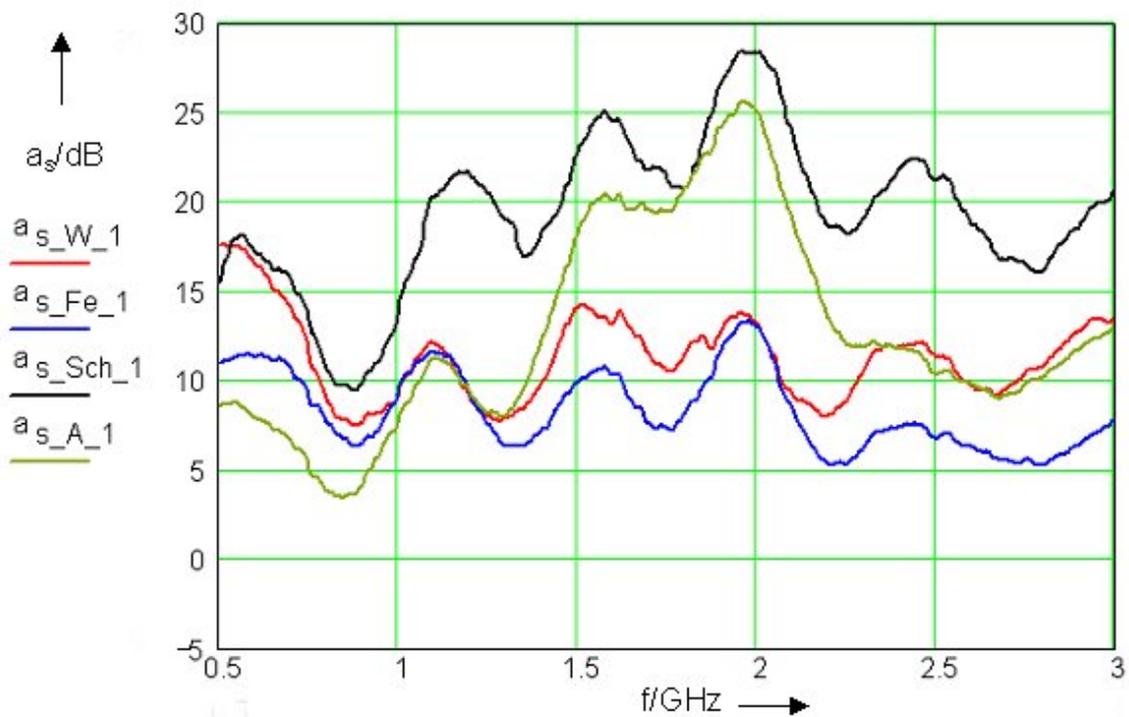


Abb. 18: Schirmdämpfung in den Bereichen Wand und Fenster für Typ „P“.

4.2.4 Vergleich der Schirmdämpfungswerte

Wie sich bei der Auswertung der Messungen für beide Haustypen zeigt, ergeben sich zum Teil Ähnlichkeiten, aber auch Unterschiede. Ein direkter Vergleich, d.h. Gegenüberstellung der Abb. 13 bis 15 für Typ „C“ einerseits und der Abb. 16 bis 18 für Typ „P“ andererseits, wird dadurch erschwert, dass alle Ergebnisse stark frequenzabhängig sind. Exemplarisch sollen zwei von der Geometrie sehr ähnlich gelagerte Fälle in einem Diagramm gegenübergestellt werden, und zwar die Schirmdämpfungen in den beiden Flurbereichen sowie in den beiden Schlafbereichen im Hinblick auf die Abschirmung eines speziellen Raums in einem Wohnhaus. Dieser Vergleich lässt sich anhand der Abb. 19 und 20 durchführen, jeweils mit recht ähnlichen Ergebnissen.

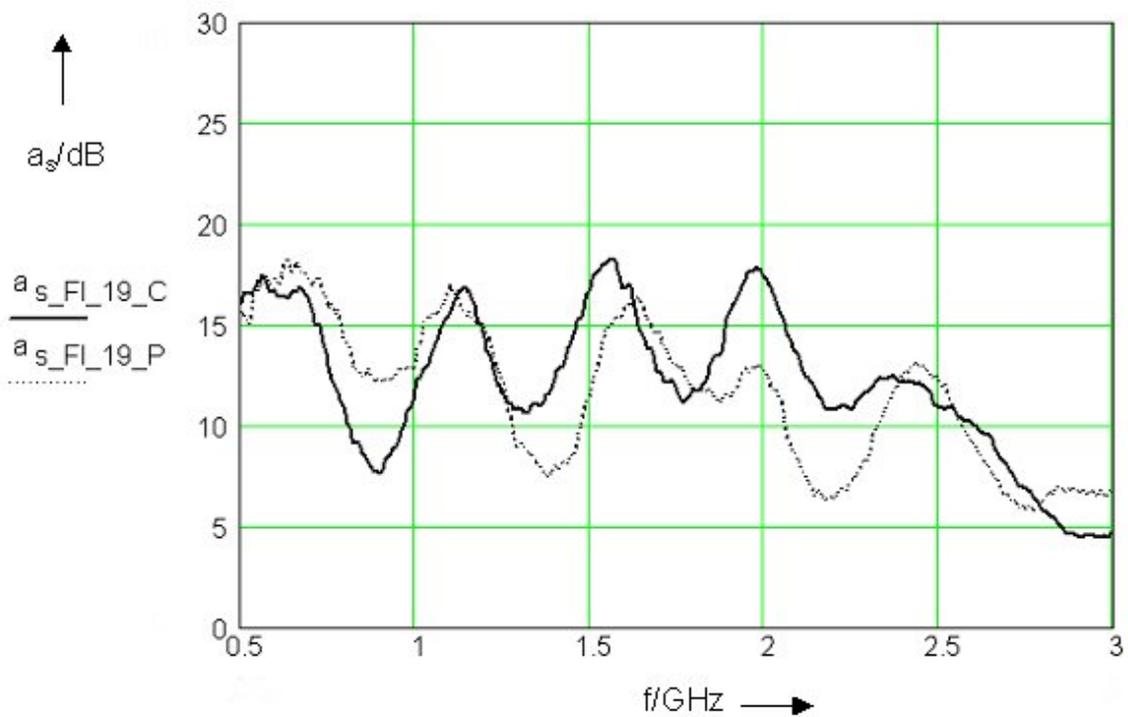


Abb. 19: Schirmdämpfung im Flur (Erdgeschoss) bei den Typen „C“ und „P“.

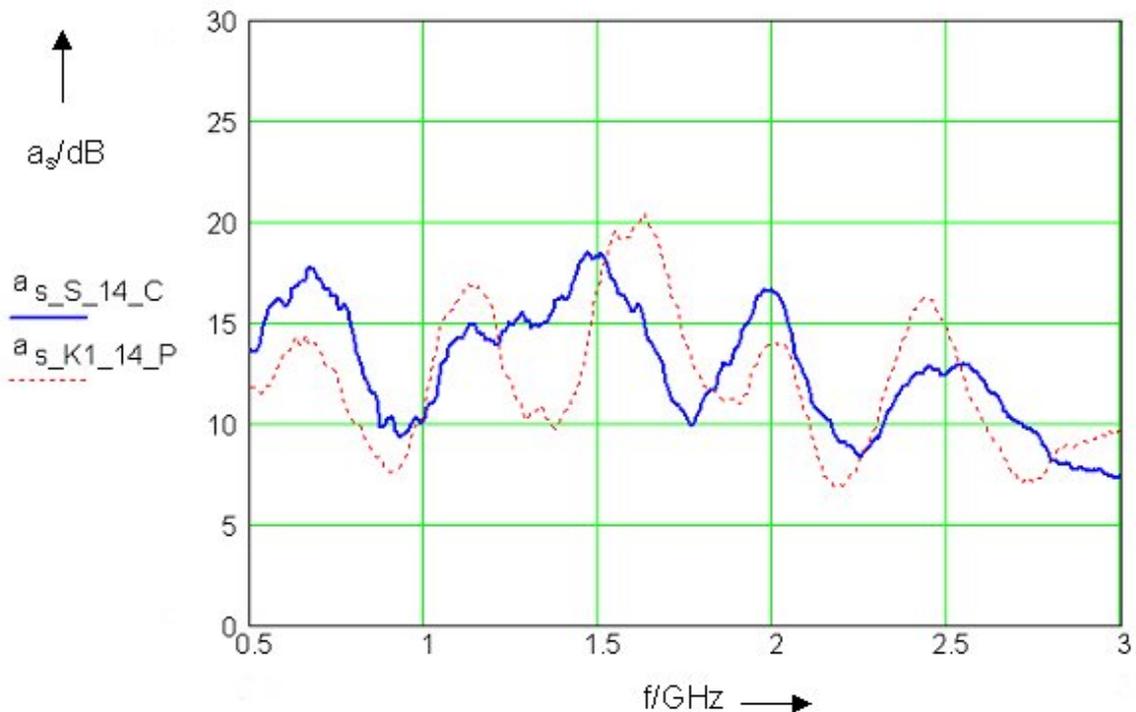


Abb. 20: Schirmdämpfung im Schlafzimmer von Typ „C“ und im Kinderzimmer 1 von Typ „P“ (jeweils Dachgeschoss, gleiche räumliche Zuordnung).

5 Zusammenfassung und Ausblick

In dem von der AGIP geförderten Forschungsprojekt „Beiträge zur Minimierung von elektromagnetischen Belastungen in Wohngebäuden“ geht es in erster Linie um die Messung und Beurteilung von Schirmungsmaßnahmen gegen hochfrequente elektromagnetische Wellen. Um die Wirkung von Materialien, Bauteilen und

Wohnräumen im Frequenzbereich von 0.5 bis 3 GHz beurteilen zu können sind verschiedene Lösungsschritte erforderlich:

- Zusammenstellung hochfrequenztechnischer Grundlagen und Messverfahren zur Wellenausbreitung und zur Schirmdämpfungsbestimmung sowie Beschaffung von Messkomponenten;
- orientierende Messungen an Prüfkörpern;
- Aufbau und Test eines größeren Referenz-Messplatzes;
- Test diverser Komponenten im Rahmen des Messplatzes, u.a. Gipskartonplatten, Fensterelemente, metallische Flächen mit verschiedenen Aperturen;
- Messungen an Gebäuden.

Die Diskussion der Grenzwerte beschränkt sich hier auf den rein konstruktiven Aspekt. Dazu wird aus der Vielzahl von Grenz- und Empfehlungswerten ein häufig genannter Wert ($S=1 \text{ mW/m}^2$) berücksichtigt. Zur Beurteilung der Schirmwirkung liegen damit u.a. die folgenden Ergebnisse und Empfehlungen vor:

- Die Größe von ungeschirmten Öffnungen z.B. in der Wand ist im Hinblick auf die hier vorliegenden kleinen Wellenlängen im Zentimeterbereich auf recht geringe Werte zu begrenzen.
- Mehrere kleine Teilflächen sind günstiger als eine große zusammenhängende Fläche gleicher Größe. Gegebenenfalls kann der „Kamineffekt“ ausgenutzt werden.
- Schirmendes Material sollte eine „flächige“ dichte Struktur aufweisen (z.B. Aluminiumfolie), Gewebe dürfen nur sehr geringe Maschenweiten besitzen.
- Bauteilanschlussfugen sind mit schirmendem Material zu kaschieren, die Schirmebene ist dabei kontinuierlich auszuAbb.en.
- Fensterscheiben mit handelsüblicher Wärmeschutzverglasung weisen bereits ausreichende Schirmdämpfungswerte auf.
- Funktionsfugen von Fenstern und Türen sind mit HF-Dichtungen zu versehen.
- Alle Messungen zeigen relativ starke Frequenzabhängigkeiten.
- Bei typischen Wohnhäusern lässt sich eine befriedigende Schirmdämpfung feststellen. Besondere Einzelmaßnahmen wirken sich allerdings nur dann positiv aus, wenn ein sehr hoher Aufwand zur Vermeidung von Schirmungslücken getrieben wird.

Damit wird deutlich, dass eine ausreichende Abschirmung zumindest von einzelnen ausgewählten Räumen oder auch bei entsprechendem Aufwand von ganzen Gebäuden nach außen möglich ist, jedoch eine besondere Betrachtung der Bauteilanschlüsse erfordert, da diese die Schwachstellen der Schirmhülle darstellen.

Nachdem in diesem Projekt einige Grundlagen und verschiedene spezielle Probleme der Schirmung untersucht und eine Reihe von Fragen beantwortet werden konnten, sind abschließend Aspekte der Weiterführung und Anwendung zu diskutieren. Nach den hier gewonnenen Erkenntnissen bietet sich in Zukunft eine Bearbeitung der folgenden Aufgaben an:

- Aufbau eines „quasi-mobilen“ Schirmdämpfungsmessplatzes in Leichtbauweise mit Einsatz der bereits angeschafften und erprobten Messgeräte;
- Definition eines Standardverfahrens zum Test von Bauelementen;
- aus hochfrequenztechnischer Sicht Modellierung und Simulation der Wellenausbreitung mit einem Feldanalyseprogramm und Vergleich mit experimentellen Ergebnissen;
- aus bautechnischer und konstruktiver Sicht Entwurf eines strahlungsarmen Wohnraums mit Berücksichtigung der bisherigen Ergebnisse.

Literatur

- [1] EU, 1999: EU-Richtlinien vom 12.Juli 1999
- [2] BImSchG: Bundes-Immissionsschutzgesetz vom 26. September 2002
- [3] 26. BImSchV: Bundes-Immissionsschutzverordnung vom 16. Dezember 1996
- [4] Umweltschutzgesetz vom 7.Oktober 1983 (Schweiz)

- [5] NISV: Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung vom 23. September 1999 (Schweiz)
- [6] Sage, C.: Übersicht über Studien zur Wirkung hochfrequenter Felder (mit Relevanz für die Mobilkommunikation und Daten) Juni 2000 (Internationale Konferenz Situierung von Mobilfunksendern Land Salzburg)
- [7] Gonschorek, K.-H.: EMV für Geräteentwickler und Systemintegratoren. Springer, 2005.
- [8] Goedbloed, J.: Elektromagnetische Verträglichkeit. Pflaum, 1990.
- [9] Schwab, A.: Elektromagnetische Verträglichkeit. Springer, 1990.