

Messungen der HF-Abstrahlung bis 30 MHz von elektrischen Güterzügen und Gegenmaßnahmen

Dr. Stefan Hawlitschka

Version: 1.1

2. Oktober 2019

Inhaltsangabe

1	Einleitung	4
2	Die Schirmwirkung von vertikalen Lärmschutzwänden und von Erdwällen	5
2.1	Messkampagne bei Lüneburg	7
2.1.1	Freifeldmessung	7
2.1.2	Lärmschutzwand	8
2.1.3	Erdwall	9
2.2	Messkampagne Buschow	12
2.2.1	Freifeld	12
2.2.2	Erdwall	17
2.3	Theoretische Betrachtungen	21
2.3.1	Erdwall	21
2.3.2	Metallischer Schirm	23
2.4	Fazit der einfachen Schirme	24
3	Galeriebauwerk	25
3.1	Simulationen und Messungen am Modell 1:10	25
3.2	Simulation des Galeriebauwerks	31
4	Zusammenfassung	36

Erstellt von:

Fraunhofer FKIE
Abteilung: KOM
Fraunhoferstr. 20
53343 Wachtberg

1 Einleitung

Hintergrund der vom FKIE durchgeführten Studien ist die geplante Elektrifizierung der Eisenbahnstrecke von Wilhelmshaven zum Jade-Weser Port. Die Strecke verläuft durch den Schutzbereich der HF-Marineempfangsstelle Sengwarden. Es wurde seitens der Bundeswehr befürchtet, dass die elektrischen Güterzüge hochfrequente elektromagnetische Störungen aussenden, die das Rauschen am Ort der Antenne erhöhen und somit den Empfang schwacher Signale aufgrund der resultierenden Verringerung des Signal zu Rausch Verhältnisses (SNR) einschränken. Um die Erhöhung der Rauschpegel abschätzen zu können, wurde vom FKIE im ersten Projektteil eine Messmethode entwickelt, mit der die Störungen sicher zur Analyse aufgezeichnet werden können. Dann wurde eine Messkampagne an der von der Topographie her vergleichbaren, ebenfalls einspurigen und bereits elektrifizierten Strecke Hude-Nordenham durchgeführt. Es wurde im Frequenzbereich 2-30 MHz die Funkverträglichkeit elektrischer Güterzüge in Vorbeifahrt unter verschiedenen Lastzuständen vermessen. Die elektrischen Züge senden tatsächlich hochfrequente Strahlung aus, die auch in einer Entfernung von 900 m noch eine signifikante Erhöhung der Rauschpegel verursachen würden. Aus Erfahrungen der Vermessung von Windenergieanlagen wurde vermutet, dass die Störungen vom Frequenzumrichter des Triebfahrzeugs verursacht werden und über die Zuleitung der Stromversorgung zum Frequenzumrichter und über die Oberleitung selbst abgestrahlt werden. Die Signaturen der Störungen im Spektrogramm bei Vorbeifahrt des Triebfahrzeugs sind tatsächlich vergleichbar denen des Frequenzumrichters in Windrädern. Bei den unteren Frequenzen steigen die Pegel bei Annäherung des Zuges stetig an, was den zusätzlichen Ausbreitungsmechanismus über die Oberleitung bestätigt. Die Maxima der Abstrahlung wurden im Moment der Vorbeifahrt in den Frequenzbereichen 2-3 MHz und 4-6 MHz bestimmt. Zu höheren Frequenzen hin nehmen die Pegel der Abstrahlung ab.

Daraufhin wurden Gegenmaßnahmen von einer Modifikation der Triebfahrzeuge und der Filterung der Oberleitung untersucht. Eine Modifikation der Triebfahrzeuge erwies sich jedoch als schwer durchführbar. Es wäre eine erhebliche Entwicklungszeit und hohe Kosten nötig, um eine stabile und während der gesamten Lebenszeit der Lokomotive zuverlässig funktionierende Lösung zu entwickeln. Zudem entsteht das Problem, dass die DB Netz AG einen diskriminierungsfreien Zugang zu ihrem Schienennetz gewährleisten muss und der ist nur gegeben, wenn Triebfahrzeuge im Serienzustand die Strecke befahren dürfen. Der Einbau von Hochfrequenzfiltern an die Oberleitung ist nur an den Masten möglich, um die Störungen des Triebfahrzeugs zur Erde abzuleiten. Die freie Leitungslänge ohne Filter zwischen den Masten würde immer noch 65 m betragen. Simulationsrechnungen zeigten, dass dies für eine effektive Abstrahlung reichen würde. Das Triebfahrzeug selbst würde ebenfalls weiterhin strahlen. Auch kann das Einbringen von Induktivitäten und Kapazitäten in das Oberleitungsnetz zu Instabilitäten führen, die eine stabile Stromversorgung gefährden. Als nächste Möglichkeit wurde eine Abschirmung bzw. Abdeckung der strahlenden Komponenten in Richtung der Marineempfangsstelle untersucht. Die bereits bei der Deutschen Bahn eingeführten und genehmigten Bauwerke metallische Lärmschutzwand und absorbierender Erddamm wurden auf ihre Eignung zur Abschirmung der HF-Emissionen untersucht. Weiterhin wird ausführlich die Schirmwirkung eines Galeriebauwerks analysiert, das eine seitliche und obere Abdeckung der Bahnstrecke erlaubt. Dieses existiert noch nicht real, weshalb die Untersuchungen auf Messungen an einem einfachen Modell und auf Simulationsrechnungen beruhen. Das Galeriebauwerk wird im Bericht auch als Einhausung bezeichnet.

2 Die Schirmwirkung von vertikalen Lärmschutzwänden und von Erdwällen

Für die Messungen wurden der Spektrumanalysator Rohde&Schwarz ESR-7 und die magnetische Rahmenantenne R&S HFH2-Z2 sowie eine modifizierte Schwarzbeck EFS 9218 verwendet. Es stellte sich heraus, dass bei einem Messabstand von 50 m die Empfindlichkeit beider Antennen ausreicht, um auch hinter Abschirmungen die Störsignale sicher zu erfassen.

Da die Züge jeweils in Vorbeifahrt gemessen wurden, wurden nicht nur Einzelspektren, sondern es wurde ihre Zeitreihe in Form von Spektrogrammen aufgezeichnet. Der ESR zeichnet im FFT-Modus in schneller Folge Spektren auf, so dass die von den Zügen ausgehenden Störungen sicher erfasst werden. Im FFT-Modus beträgt selbst bei einer Auflösungsbandbreite von 100 Hz die Messdauer je nach gesamter Breite des gemessenen Spektrums einige Millisekunden bis 130 ms. Das Spektrum 2-30 MHz wird vom ESR bei den gewählten Einstellungen nicht in einem Stück abgetastet, sondern in Teilbereiche aufgeteilt und diese werden nacheinander abgetastet. So entstehen Zeitlücken in einzelnen Frequenzbereichen, die allerdings deutlich kleiner sind als bei einem durchlaufenden Filter. Beim durchlaufenden Betrieb kann es theoretisch passieren, dass periodisch wiederkehrende Störungen überhaupt nicht erfasst werden. Durch die FFT-Betriebsart wird diese Gefahr praktisch eliminiert. Es stellte sich in Voruntersuchungen heraus, dass die höchsten Amplituden im unteren Frequenzbereich bis 6 MHz auftreten. Trotzdem soll der Nachweis über das Vorhandensein oder Nichtvorhandensein von Störungen über den gesamten Frequenzbereich geführt werden. Die Dämpfung des Spektrumanalysators wird kleinstmöglich eingestellt, um das Systemrauschen des Messsystems niedrig zu halten. Aufgrund der deutlichen Muster, die sich bei Vorbeifahrt der Lokomotiven in den Spektrogrammen ausbilden, wird davon ausgegangen, dass die Signaturen der Züge sicher erfasst werden. Allerdings überlagern sich die ohnehin vorhandenen Aussendungen von Radiostationen und Funkdiensten, was die Auswertung erschwert.

Als Detektor wird der MaxPeak-Detektor verwendet, da die jeweils höchsten Pegel die Störung bestimmen. Der in der Messung von Impulsstörungen häufig eingesetzte QuasiPeak-Detektor braucht eine höhere Messzeit und ist deshalb für diese Messungen ungeeignet.

Die Messentfernung betrug jeweils 50 m. Erfahrungsgemäß ist man bei den betrachteten Frequenzen aus dem physikalischen Nahfeld heraus.

Bei den Messungen an der Strecke Hude-Nordenham konnten Güterzüge in unterschiedlichen Lastzuständen während der Vorbeifahrt gemessen werden. Es zeigten sich typische Frequenzmuster für Frequenzumrichter, wie sie in ähnlicher Form auch bei Windenergieanlagen auftreten. Aus der gemessenen Feldstärke der Triebfahrzeuge in 50 m Entfernung und der Abschätzung der Ausbreitungsdämpfung bis zum Mindestabstand von 900 m konnte erkannt werden, dass Störungen beim Empfang von HF-Signalen an der Marineempfangsstelle Sengwarden auftreten würden. Die Signale würden das natürliche und das mittlere vom Menschen gemachte (man made noise) Rauschen erheblich überschreiten. Diese Überschreitung würde das Signal zu Rausch Verhältnis (SNR) der zu empfangenden Signale insbesondere im unteren Frequenzbereich stark beeinträchtigen. Bei den höheren Frequenzen ist die zusätzliche Dämpfung der Bodenwelle durch die Ausbreitung von Anteilen im Erdboden höher.

In diesem Bericht werden zwei Arten von Gegenmaßnahmen untersucht:

- Eine Schirmung mit leitendem Material, bei dem im leitenden Material ein Strom induziert wird, der seinerseits ein Feld erzeugt, dass dem einfallenden entgegengerichtet ist und im Idealfall aufhebt. Es ist eine gute Erdung notwendig, damit Erde und Schirm auf gleichem Potential sind und die Schirmung nicht selbst zu einem Strahler wird. Desgleichen ist auf gute leitende Verbindung aller metallischen Teile eines Schirms zu achten. Genauer werden in dieser Studie eine metallische Lärmschutzwand und ein Galeriebauwerk auf ihre Schirmwirkung hin betrachtet. Prinzipiell sind die metallischen Werkstoffe Aluminium und

Stahl aufgrund ihrer hohen Leitfähigkeit gut geeignet, um eine ausreichende Schirmwirkung gegen hochfrequente elektrische und magnetische Felder herzustellen.

- Eine Abdeckung der Störquelle mit absorbierendem Material, in dem die Energie der Welle in Wärme umgewandelt wird.

Da diese Bauwerke nicht wie ein Faraday'scher Käfig geschlossen sind, ist die Beugung der hochfrequenten Wellen um die Begrenzung der Bauwerke herum in Richtung Marineempfangsstelle von entscheidender Bedeutung und bestimmt wesentlich die notwendige Ausdehnung der Bauwerke.

Die Berechnung der Frequenzabhängigkeit der Ausbreitungsdämpfung mit NEC liefert weitere wichtige Hinweise zur Auslegung des Bauwerks. So ist die Dämpfung der Störung auf dem Weg von der Messdistanz bis zum minimalen Abstand der Bahnstrecke zur Empfangsantenne der Marinefunkstation bei 5 MHz bereits um a. 5 dB höher als bei 2 MHz und bei 30 MHz um etwa 11 dB höher als bei 2 MHz. Interessant ist weiterhin, dass eine Verlegung der Strecke um den Schutzbereich herum bei den meisten Frequenzen eine Verringerung um der Feldstärken von ca. 12 bis gut 13 dB bewirken würde. Die Frequenzabhängigkeit der Dämpfung bei Ausbreitung hochfrequenter Wellen entlang des Erdbodens wird auch von der Rec. ITU-R P.368 der International Telecommunications Union (ITU) bestätigt.

Frequenz [MHz]	NEC 50m - > 900m	NEC 900m -> 1500m	NEC 900m -> 2000m
2	26.7	5.3	8.4
3	28.6	6	9.7
5	31.9	7.2	11.6
7.5	34.7	7.9	12.7
10	36.7	8.4	13.3
15	39.5	8.6	13.6
20	41	8.7	13.7
30	38	8.6	13.5

Tab. 1: Berechnete Ausbreitungsdämpfung von der Messentfernung zum minimalen Abstand Bahnstrecke – Empfangsantenne, minimaler Abstand – maximaler Abstand zur Empfangsantenne, minimaler Abstand – Grenze des Schutzbereichs

Die Maxima der Abstrahlung traten in 50 m Entfernung bei 2-3 MHz und 4-6 MHz auf. Zu höheren Frequenzen hin nehmen die Pegel ab. Ein Bauwerk muss also insbesondere bei niedrigen Frequenzen eine gute Dämpfung bewirken.

Die folgenden Messungen beschreiben die Schirmwirkung der bestehenden Bauwerke in 50 m Messentfernung. Es werden als Referenz Messungen an einer freien Stelle ohne Hindernisse zwischen Messantenne und Zug durchgeführt. Dann werden mehrere Messungen hinter der Lärmschutzwand und Erdwall durchgeführt. Die mittlere Differenz zwischen freier Messung und Messung hinter Bauwerk wird als die (Einfüge-)Dämpfung des Bauwerks angenommen und im Anschluss durch theoretische Betrachtungen beurteilt. Die Schirmwirkung des Galeriebauwerks musste in Simulationsrechnungen und Messungen an Modellen bestimmt werden, da bisher kein solches Bauwerk in Deutschland existiert.

Es werden im Folgenden die Ergebnisse zweier Messkampagnen noch einmal vorgestellt, damit dieser Bericht stringent gestaltet ist.

Zunächst sollte die Schirmwirkung von metallenen und gut geerdeten Lärmschutzwänden getestet werden. Diese Kampagne fand im Zeitraum 7.-9. August 2018 bei Lüneburg an der Strecke Hamburg-Hannover statt. Im Rahmen dieser Messkampagne wurde die gute Schutzwirkung eines bewaldeten und damit hohen Erddamms nachgewiesen. Daraufhin wurde eine zweite Messkampagne im Zeitraum 13.-15.11.2018 bei Buschow an der Schnellstrecke Berlin – Hannover durchgeführt. Diese Messungen werden noch einmal komplett dargestellt, damit die Analyse in diesem Bericht vollständig ist und man auch einen Eindruck über die Art und den Frequenzverlauf der Störungen bekommt, was für die Bewertung der Schirmwirkung nicht unerheblich ist.

2.1 Messkampagne bei Lüneburg

Zur Bestimmung der Dämpfung einer Lärmschutzwand sind zunächst Referenzmessungen ohne Hindernis nötig. Die gemessenen Pegel der vorbeifahrenden Züge können dann mit den Pegeln hinter der Lärmschutzwand verglichen werden. Man erkennt auch die bereits vorhandenen Signale, die größtenteils von ionosphärisch übertragenen Radiosendern und Funkdiensten stammen. Die hier dargestellten Messungen wurden an der Schnellstrecke Hamburg-Hannover gemessen, an der im Bereich nördlich Lüneburg und Radbruch 6 m hohe Lärmschutzwände stehen. Es wurde erwartet, dass die Oberleitung von der Wand überragt wird und so eine Schirmwirkung zu Stande kommt. Es zeigte sich allerdings vor Ort, dass Teile des Kettenwerks im Bereich der Masten die Lärmschutzwand überragten.

2.1.1 Freifeldmessung

Typische Maximalwerte bei freier Sicht und einer Messentfernung von 50 m waren bei Güterzügen 32-33-dB μ V/m. Andere Zugarten wie ICEs wiesen andere Pegel auf. Die Maxima treten üblicherweise im Bereich 2-3 MHz oder 4-6 MHz auf. Die Variationen sind auf unterschiedliche Betriebszustände des Frequenzumrichters zurückzuführen. In Abben. 1 und 2 sind repräsentative Beispiele dargestellt. Als Bildunterschrift ist jeweils der originale Dateiname vermerkt.

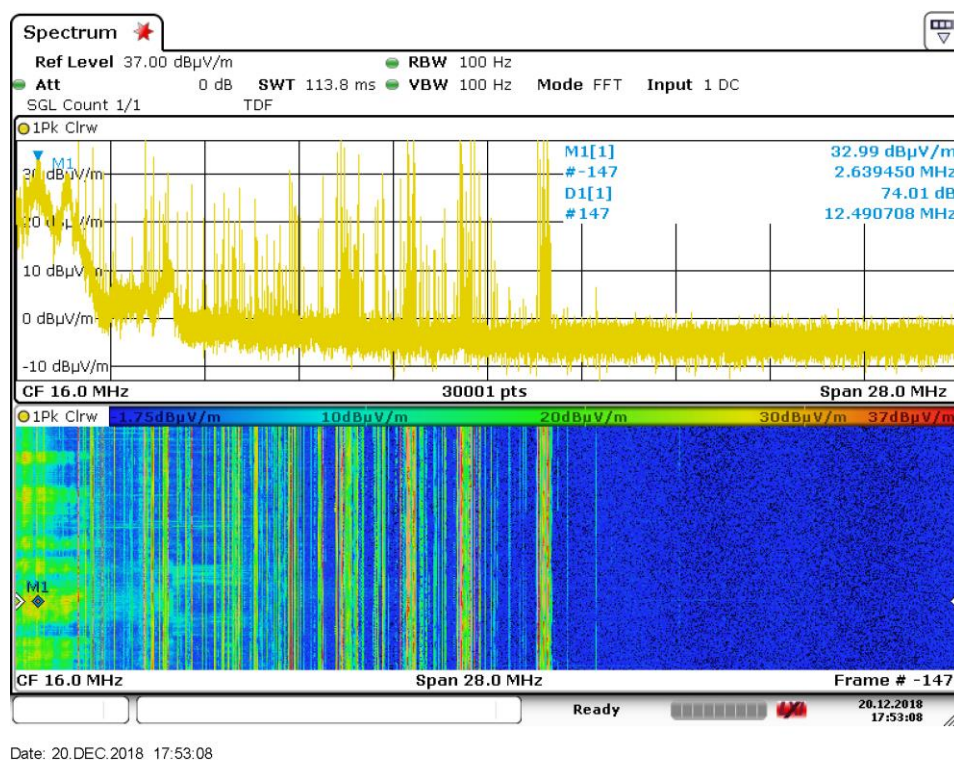


Abb. 1: Doppelgüterzug_GI3_AmBornbach_50m_freifeld_EFS9218Gr_017_Marker

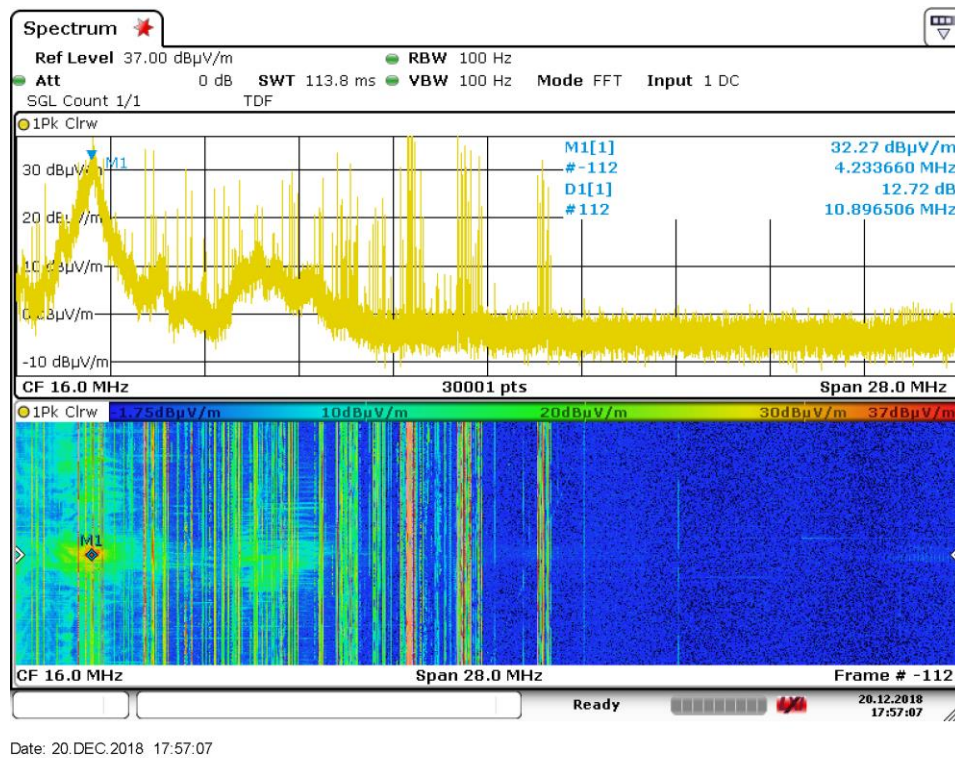


Abb. 2: Gueterzug_Gl1_AmBornbach_50m_freifeld_EFS9218Gr_020_Marker

2.1.2 Lärmschutzwand

Die Lärmschutzwand deckte nicht alle leitenden Teile der Oberleitung ab. Daher war in den Messungen keine messbare Schirmwirkung gegeben. Es wurden Pegel um 32 dBμV/m gemessen.

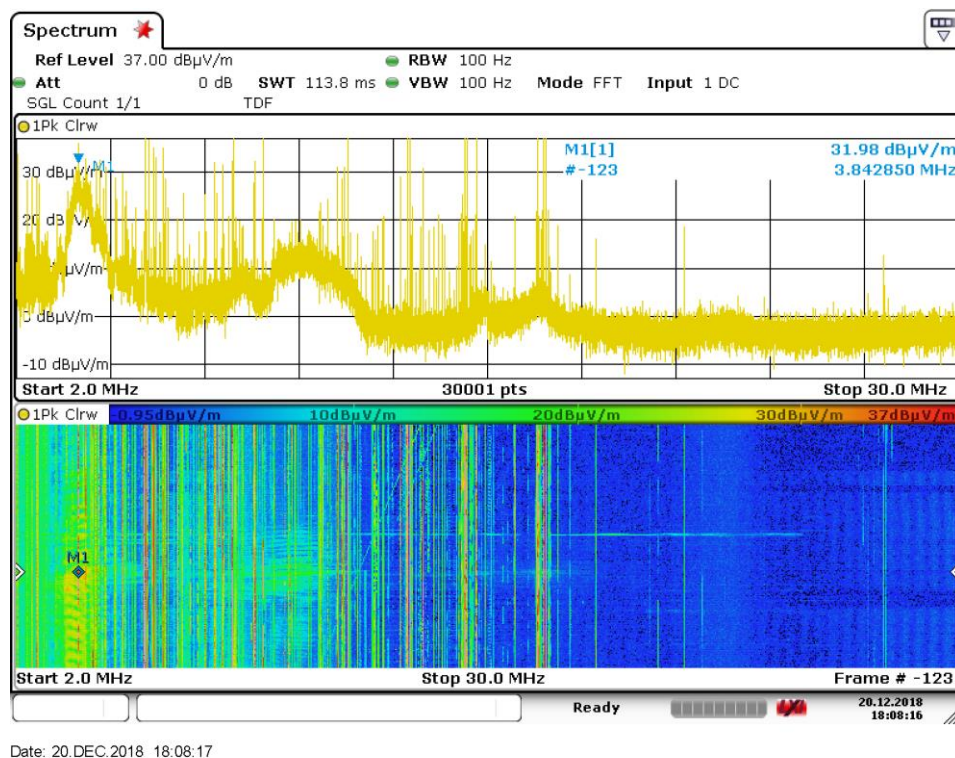


Abb. 3: Gueterzug_Gl2_Sternkamp_27m_EFS9218Gr_001_Marker

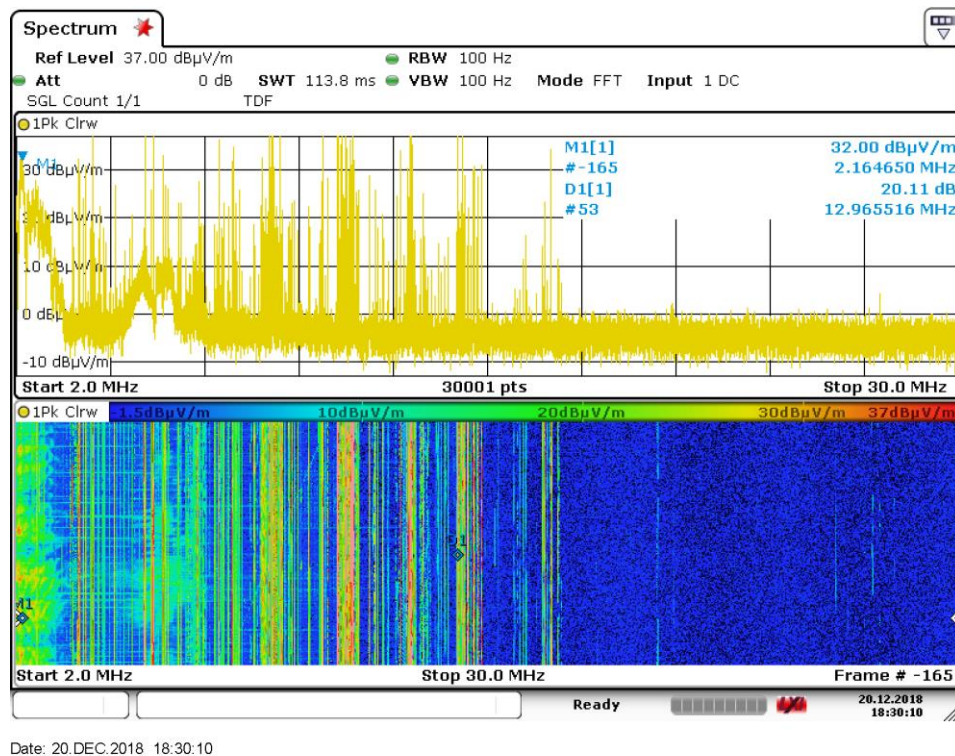
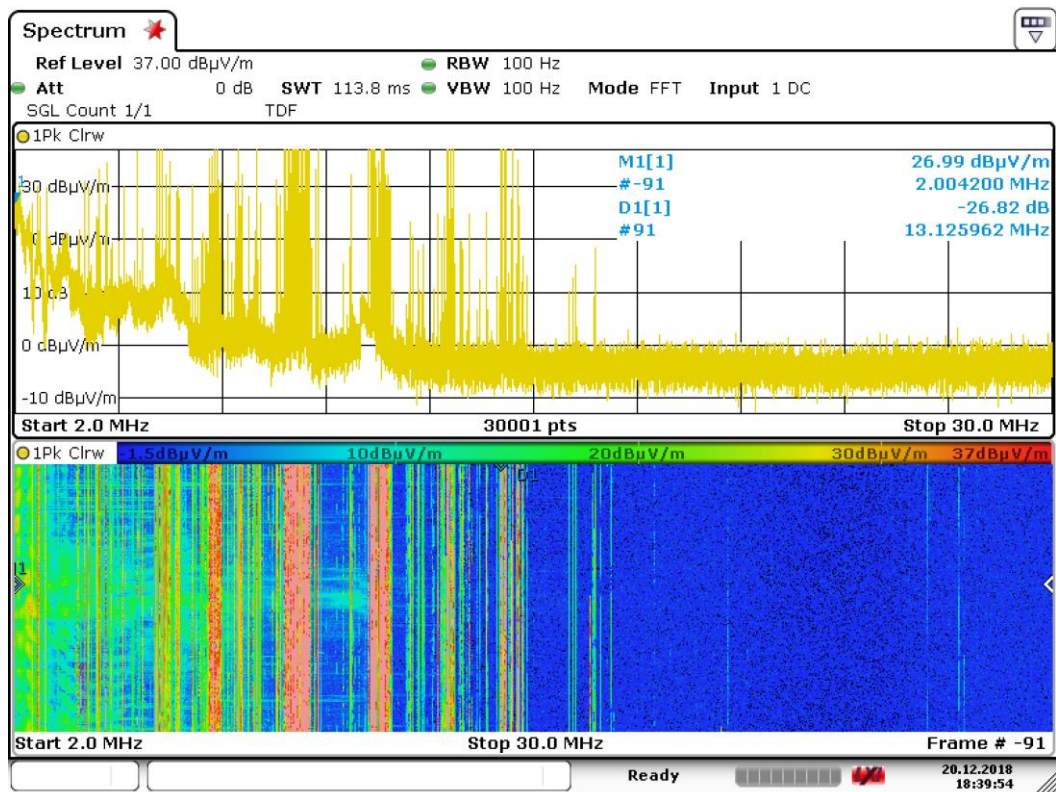


Abb. 4: Gueterzug_GL3_Ochtfeld_50m_Schallschutzwand_EFS9218Gr_022_Marker

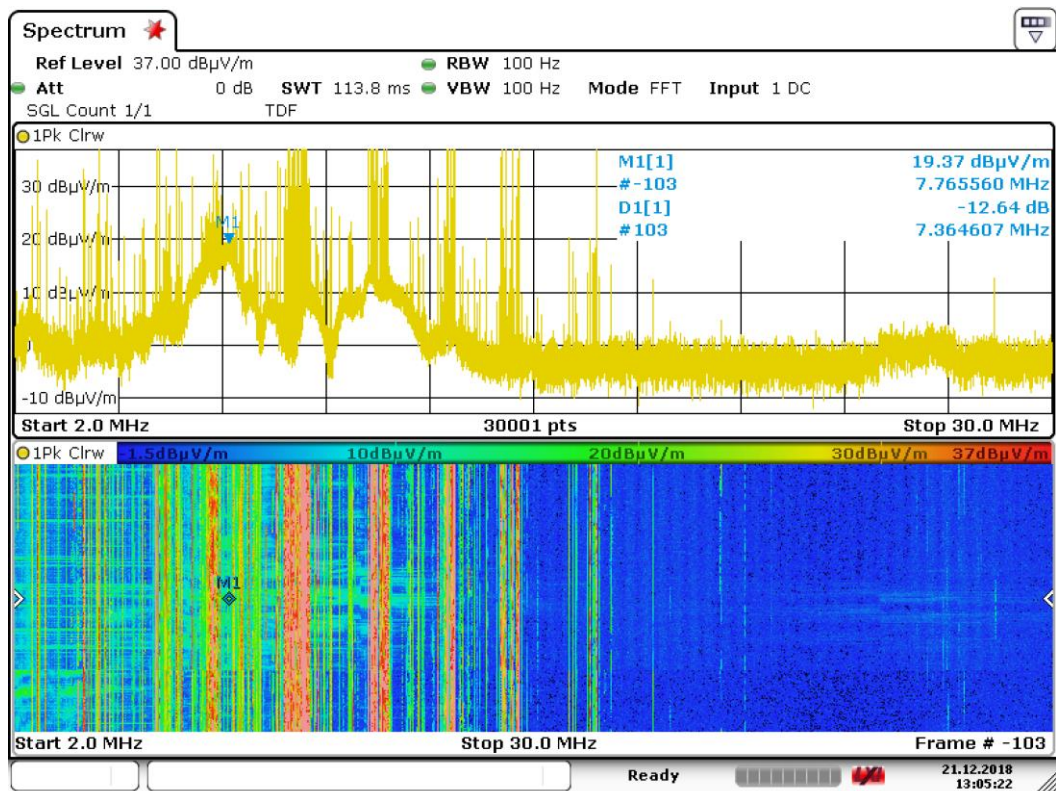
2.1.3 Erdwall

Während der Suche nach ausreichend hohen Lärmschutzwänden wurden Lärmschutzwälle entdeckt, deren Krone zusätzlich bewachsen waren. Aufgrund des dichten Baumbewuchses wurde die Gesamthöhe auf etwa 10 m geschätzt. Die gemessenen Pegel lagen hier typischerweise um 20 dBμV/m, in einem Fall wurde 27 dBμV/m bei 2 MHz (Abb. 5) ermittelt. Die Dämpfungsproblematik ist bei 2 MHz aufgrund der großen Wellenlänge am schwierigsten zu beherrschen. In Abb. 5-8 werden maximale Pegel um 20 dBμV/m ermittelt, was einer Dämpfung von mehr als 10 dB entspricht.



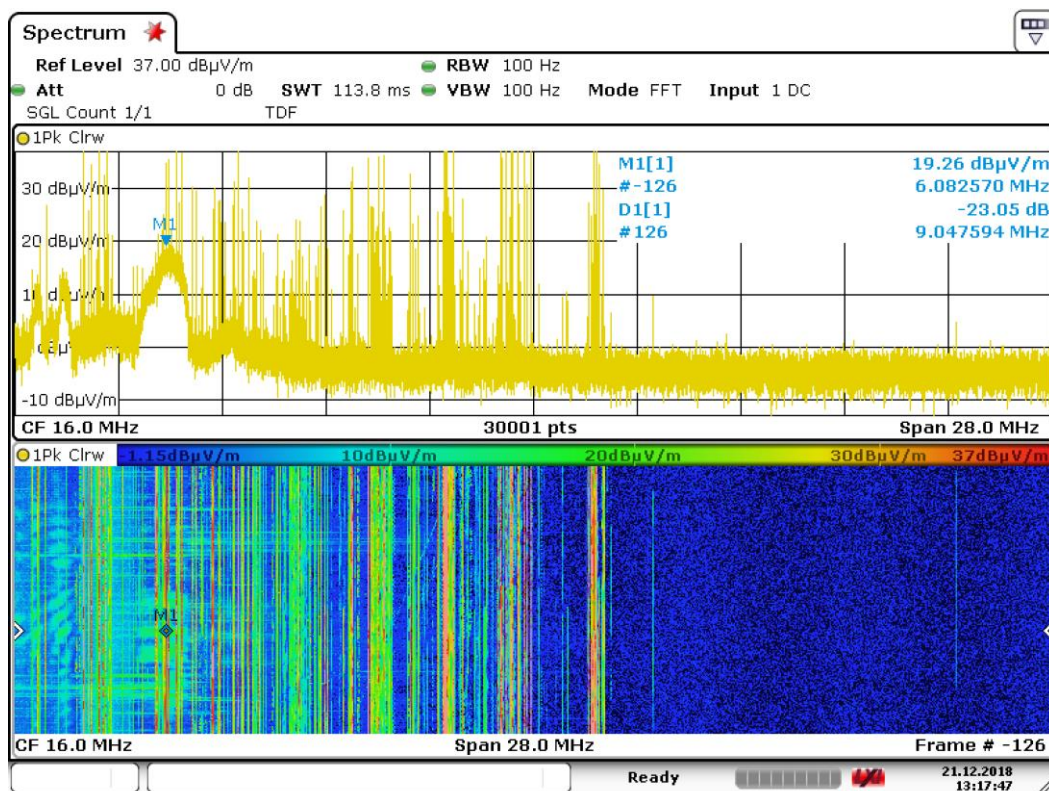
Date: 20.DEC.2018 18:39:54

Abb. 5: Gueterzug_gl1_Bardewick_50m_Erdwall_EFS9218Gr_008_Marker



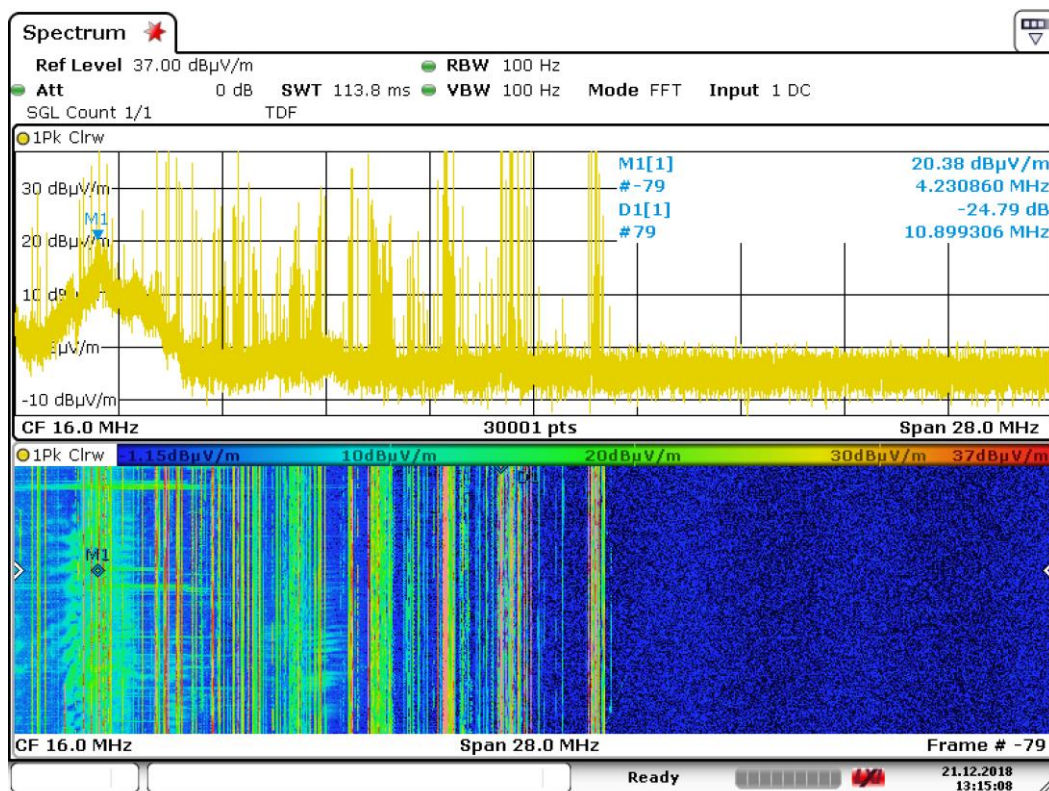
Date: 21.DEC.2018 13:05:22

Abb. 6: Gueterzug_gl1_Bardewick_50m_Erdwall_EFS9218Gr_007_Marker



Date: 21.DEC.2018 13:17:48

Abb. 7: Gueterzug_Gl2_BardewickII_50m_Erdwall_EFS9218Gr_006_Marker



Date: 21.DEC.2018 13:15:09

Abb. 8: Gueterzug_Gl2_BardewickII_50m_Erdwall_EFS9218Gr_005_Marker

2.2 Messkampagne Buschow

Um die Ergebnisse hinter dem Erdwall zu verifizieren, wurden Messungen an der Schnellstrecke Hannover Berlin durchgeführt. Hier verläuft die Strecke auf gründen des Vogelschutzes in so genannter Troglage, d. h. es sind Erdwälle auf beiden Seiten der Strecke vorhanden, die die Oberleitung und Kettenwerk abdecken. Einzig eine Einspeisestelle ragte über den Erdwall. Die Messungen wurden in einiger Entfernung zur Einspeisestelle durchgeführt. Auf dieser Strecke konnten weniger Güterzüge gemessen werden, da es sich um eine Schnellstrecke handelt. Daher wurden hier Personenzüge als Testobjekte verwendet. Diese wurden wiederum als Referenz zuerst ohne Erdwall in freier Sicht vermessen und dann hinter dem Erdwall. Da die Messungen im Winter stattgefunden haben, ist der Bewuchs trocken und dämpft nicht zusätzlich. Daher ist die Dammkrone hier nicht als erhöht anzusehen und wird mit 6 m angenommen. Da die Oberleitung hier niedriger verbaut wurde, ist von einer Abdeckung auszugehen, aber nicht, dass der Damm höher ist als das Kettenwerk.

2.2.1 Freifeld

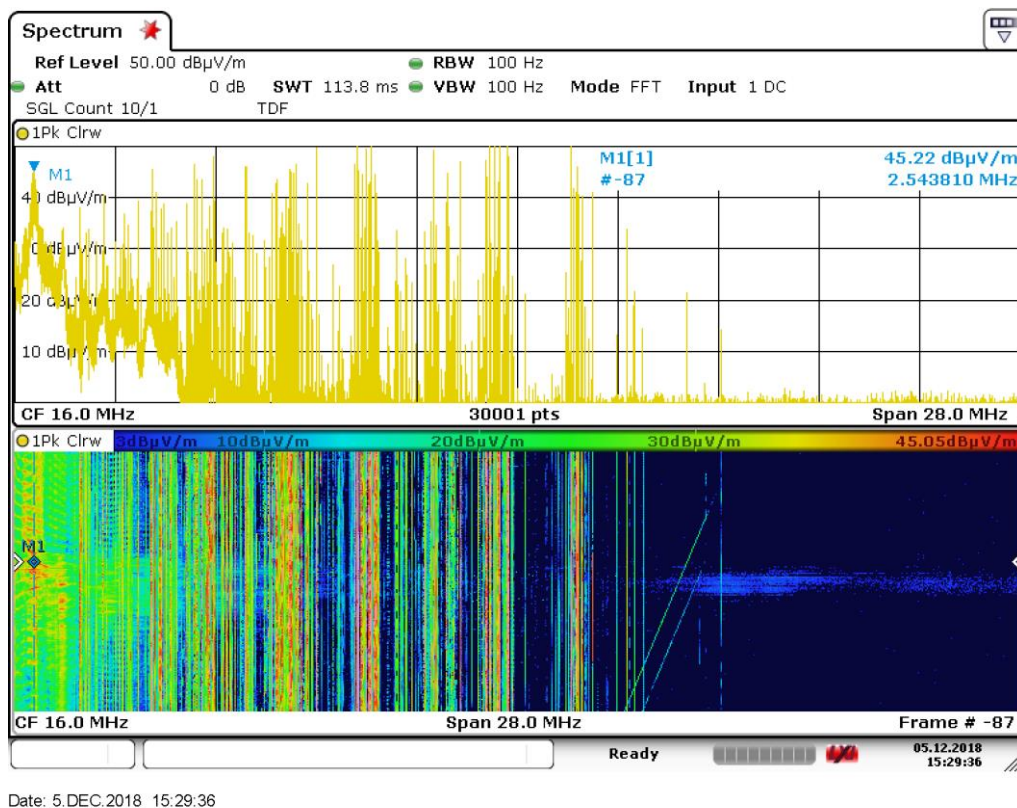
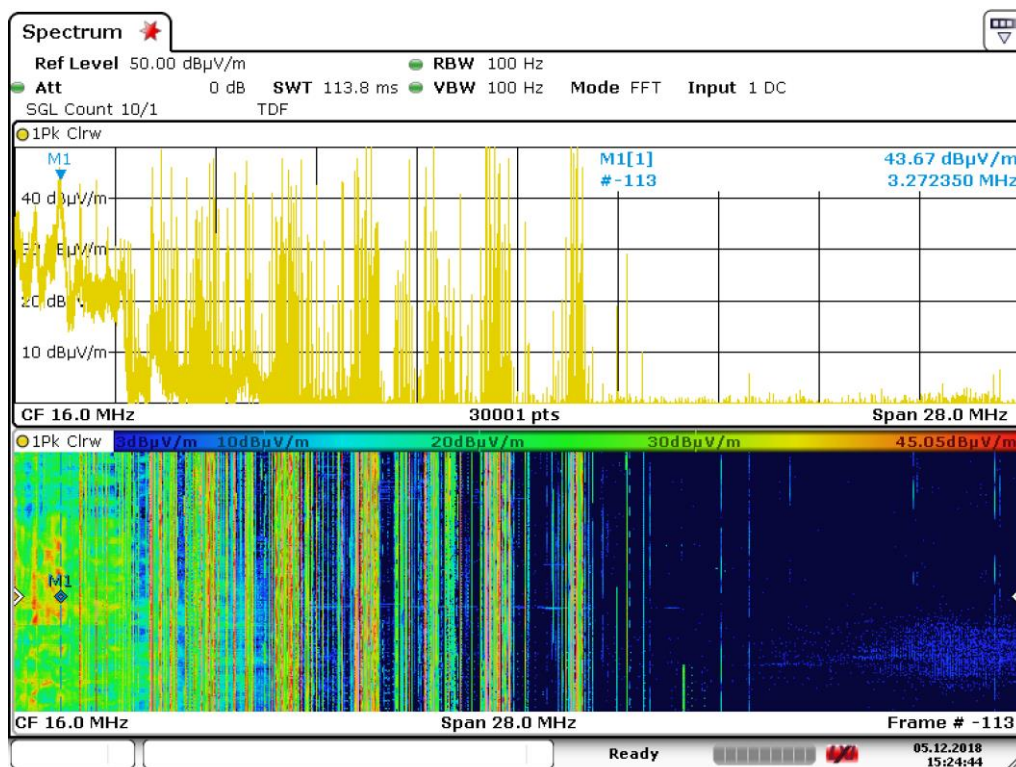
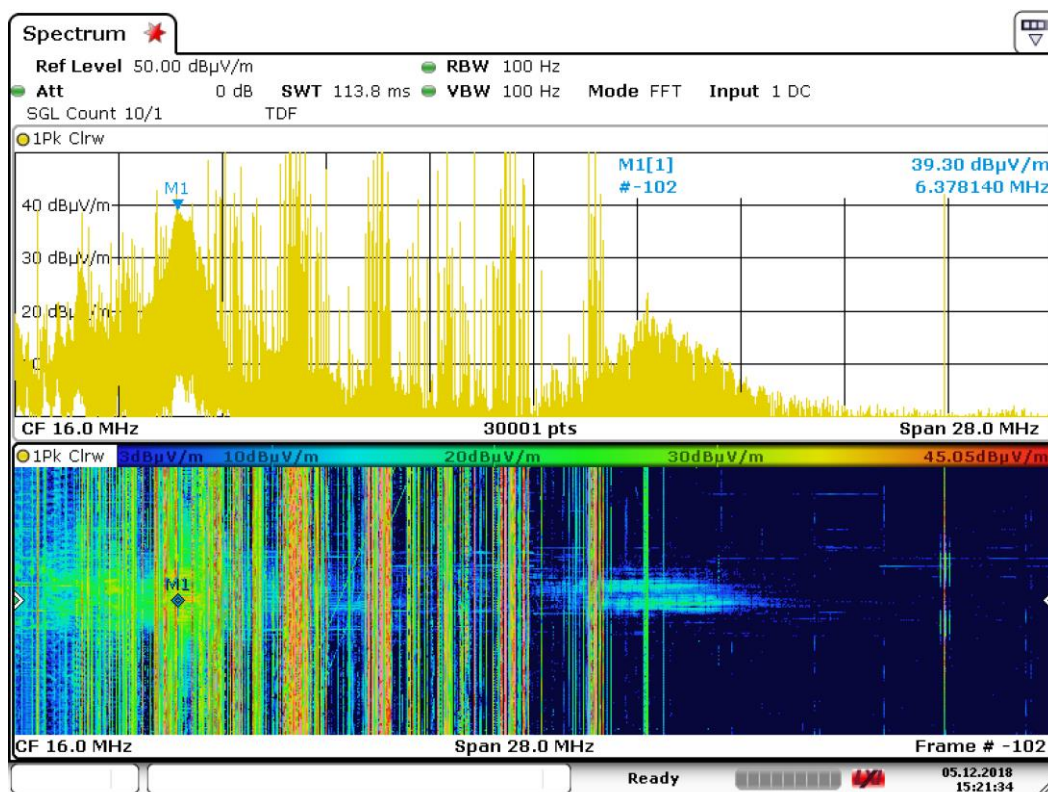


Abb. 9: Triebwagen_GI1_Buschow_50m_EFS9218Gr_007_Marker



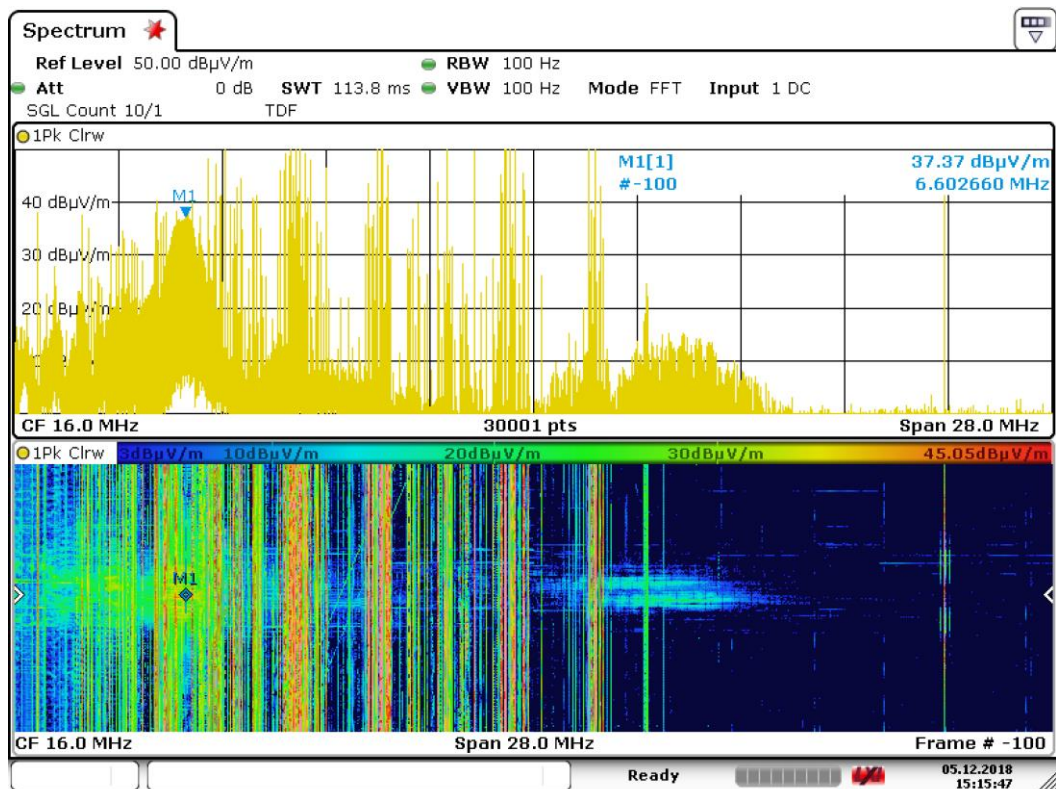
Date: 5.DEC.2018 15:24:44

Abb. 10: Triebwagen_Bremsend_GI2_Buschow_50m_EFS9218Gr_003_Marker



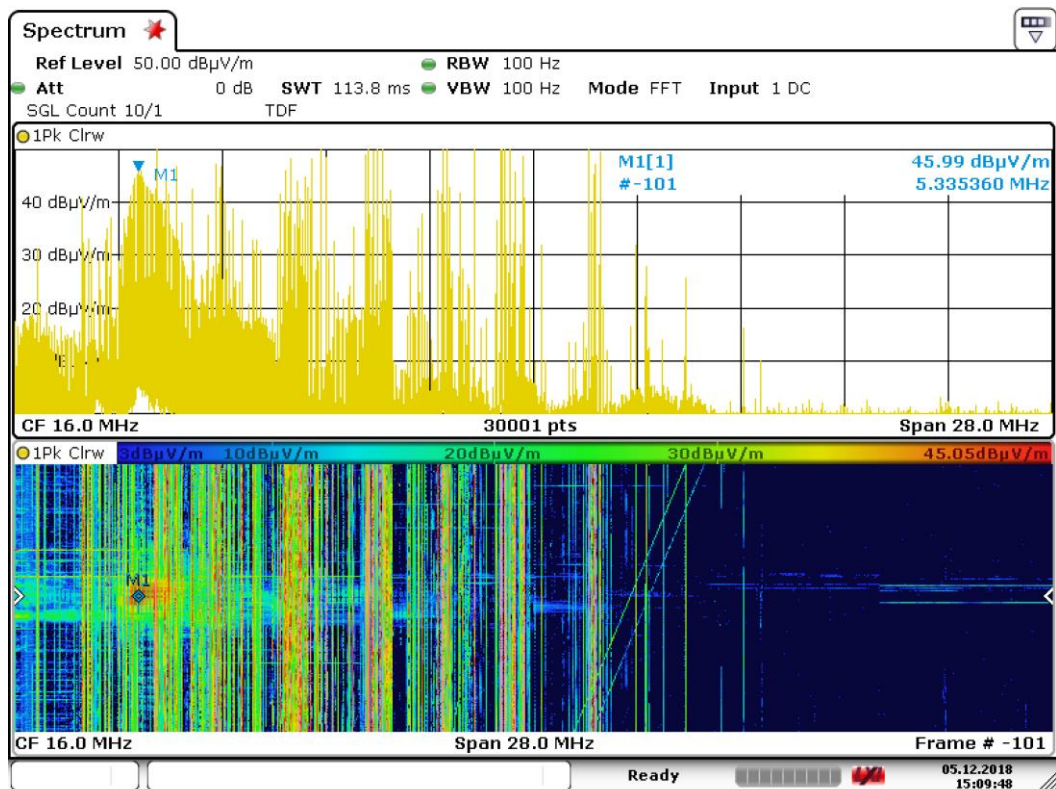
Date: 5.DEC.2018 15:21:34

Abb. 11: ICE_GI2_Buschow_50m_EFS9218Gr_008_Marker



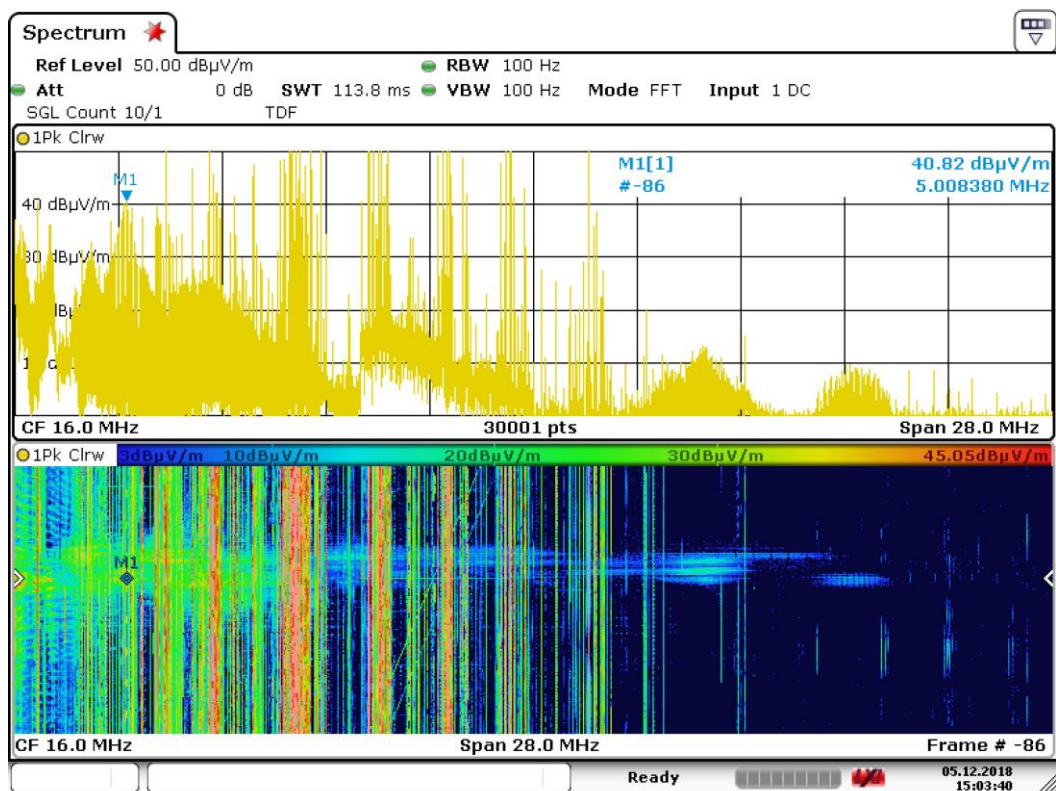
Date: 5.DEC.2018 15:15:47

Abb. 12: ICE_GI2_Buschow_50m_EFS9218Gr_002_Marker



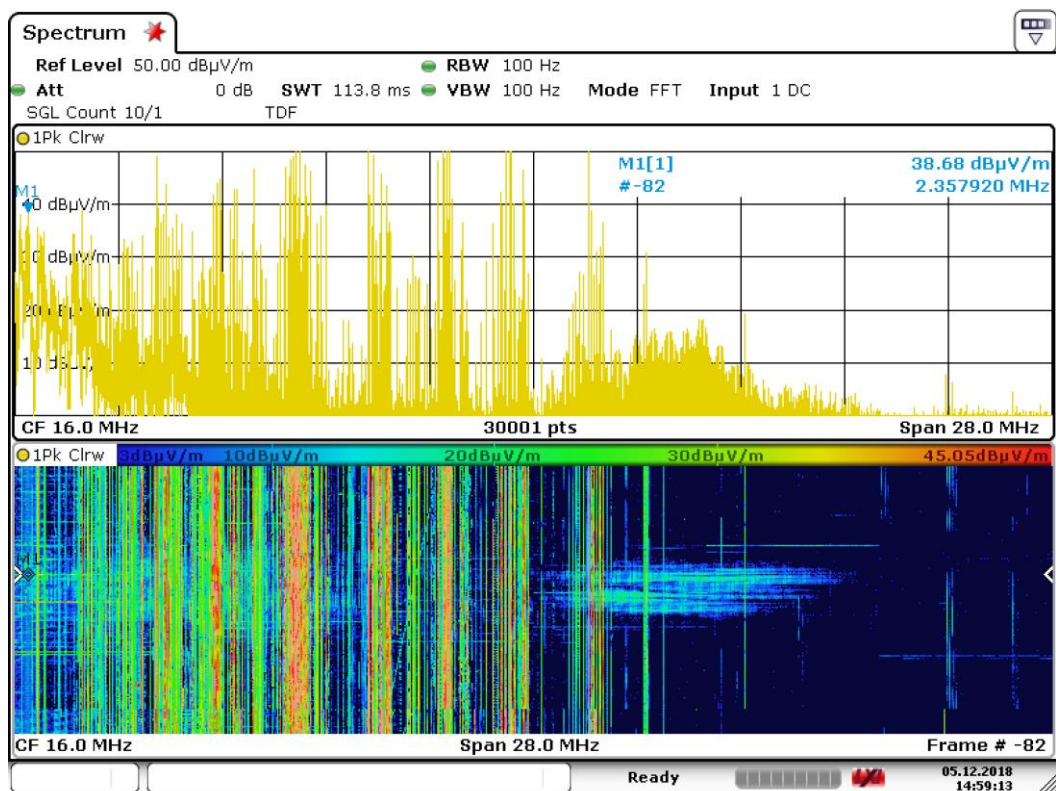
Date: 5.DEC.2018 15:09:49

Abb. 13: IC_GI2_Buschow_50m_EFS9218Gr_005_Marker2



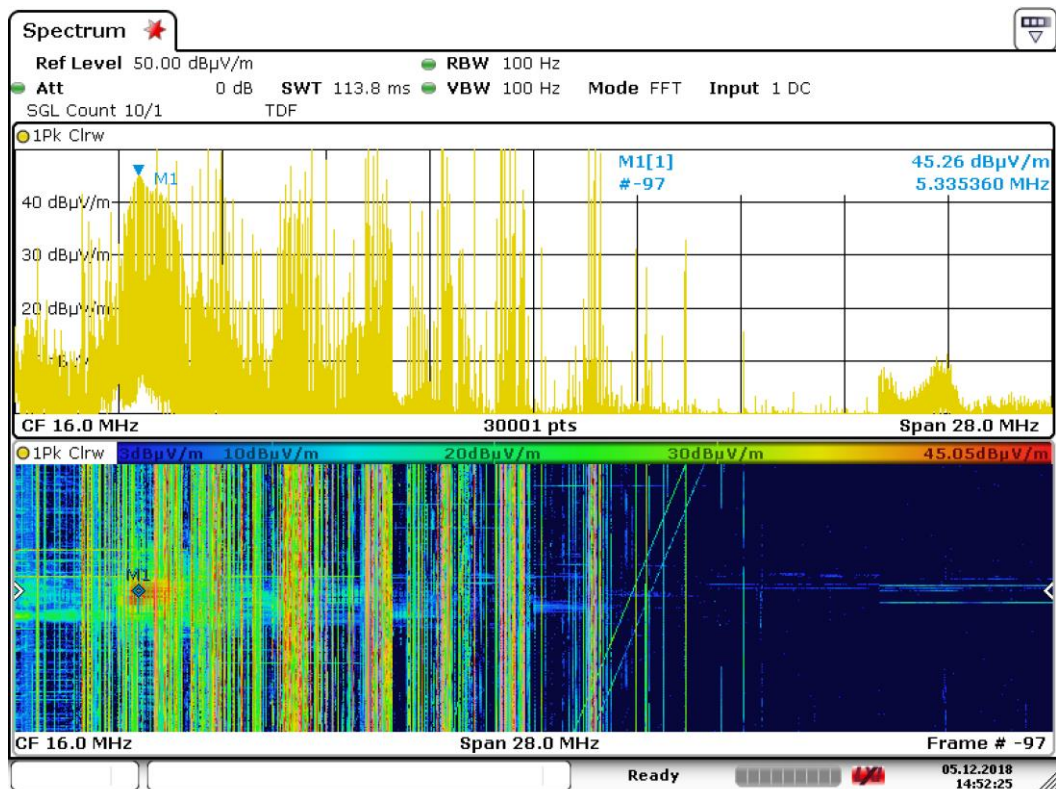
Date: 5.DEC.2018 15:03:40

Abb. 14: IC_Gl1_Buschow_50m_EFS9218Gr_Marker2



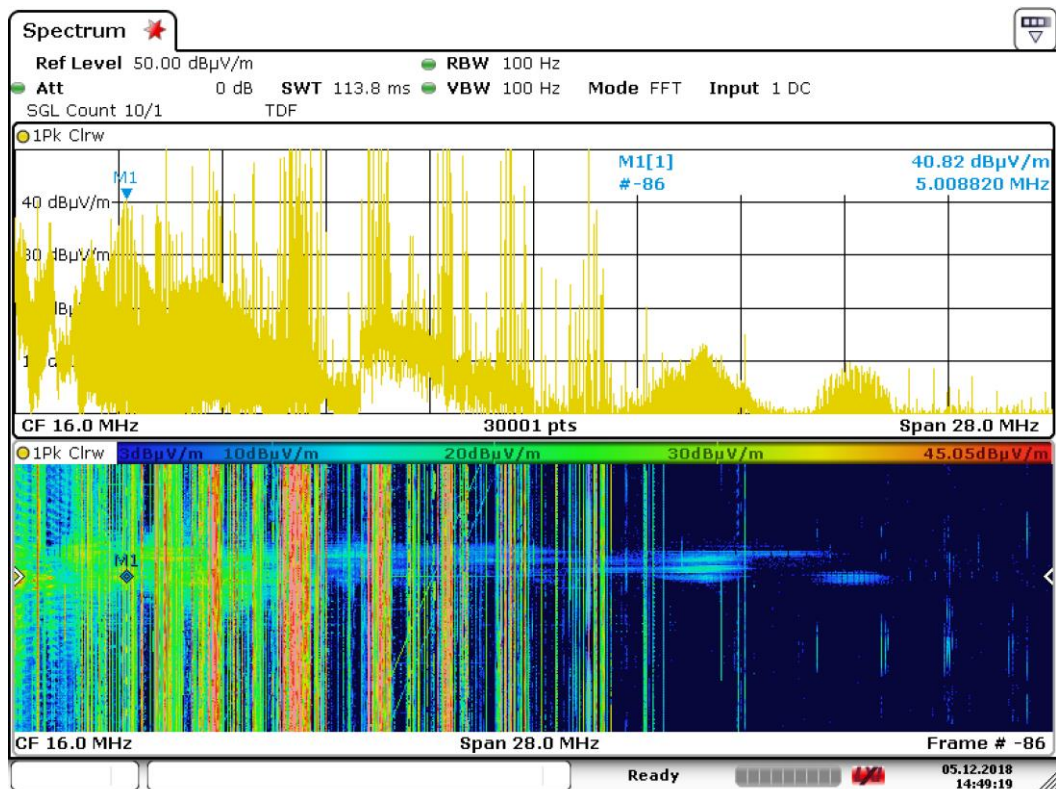
Date: 5.DEC.2018 14:59:14

Abb. 15: ICE_Gl1_Buschow_50m_EFS9218Gr_009_Marker



Date: 5.DEC.2018 14:52:25

Abb. 16: IC_GI2_Buschow_50m_EFS9218Gr_005_Marker



Date: 5.DEC.2018 14:49:20

Abb. 17: ICE_GI1_Buschow_50m_EFS9218Gr_Marker

2.2.2 Erdwall

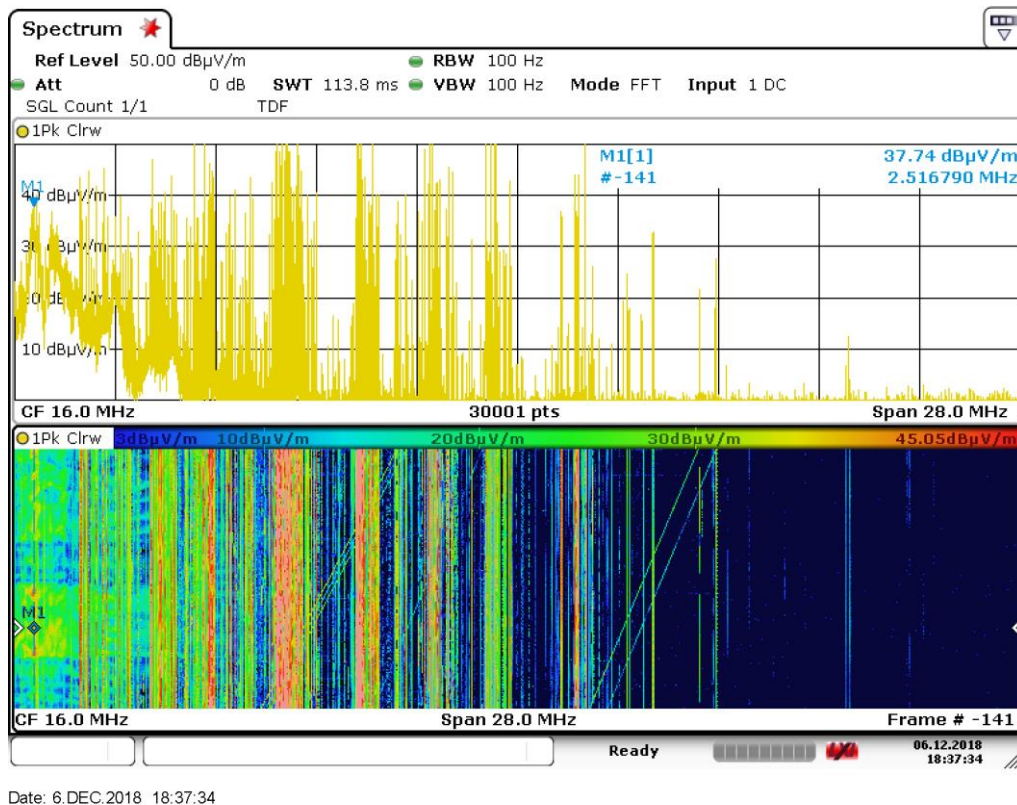


Abb. 18: Tribwagen_bremsend_GL1_Buschow_50mDamm_EFS9218Gr_006_Marker.dfl

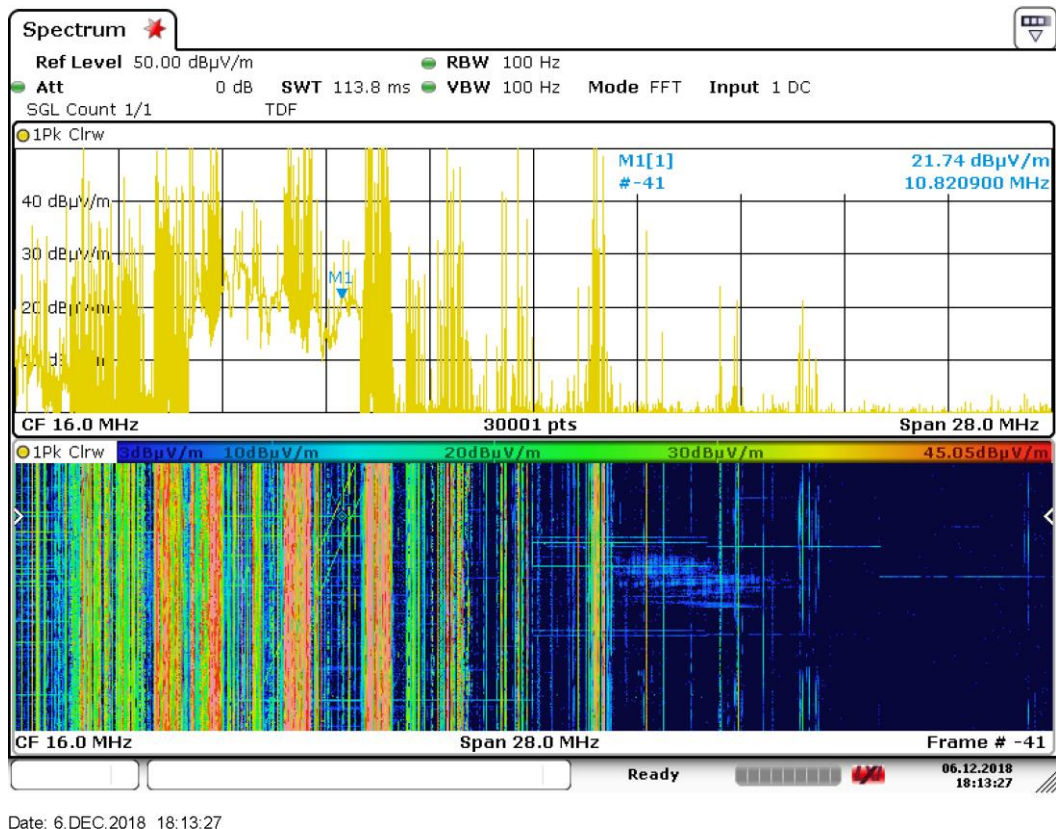


Abb. 19: ICE_GL1_Buschow_50mDamm_EFS9218Gr_015_Marker

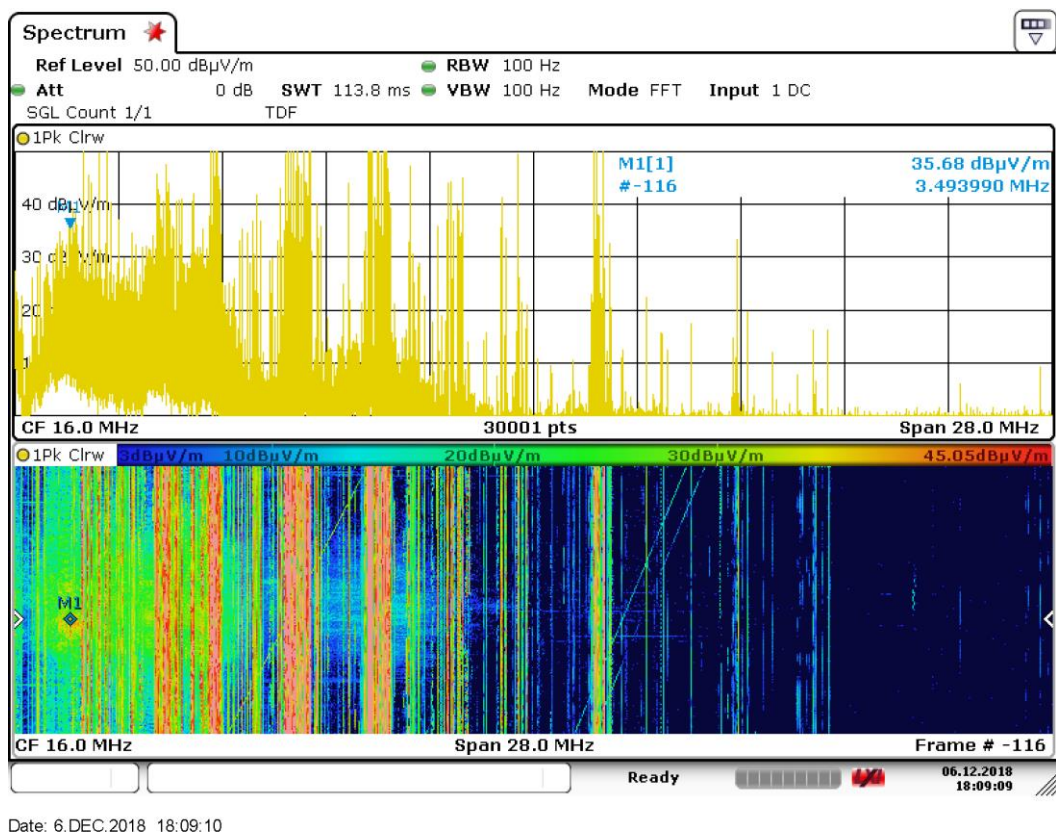


Abb. 20: ICE_GI1_Buschow_50mDamm_EFS9218Gr_014_Marker

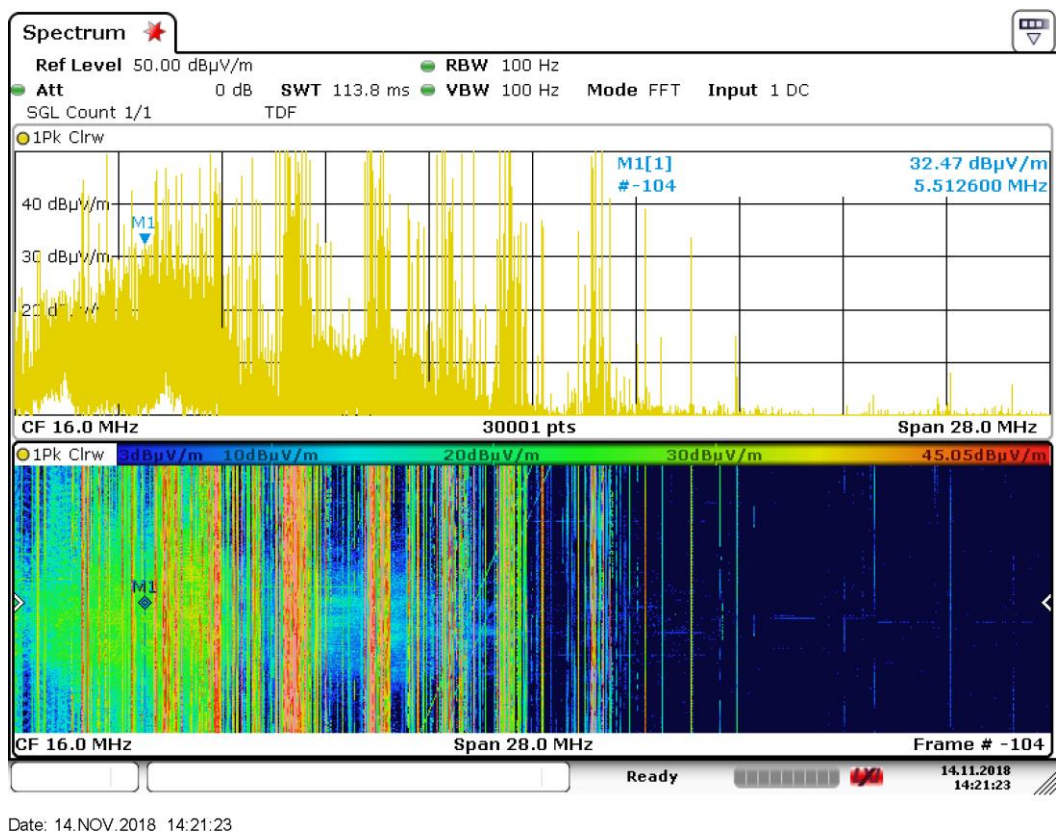


Abb. 21: ICE_GI1_Buschow_50mDamm_EFS9218Gr_004.dfl

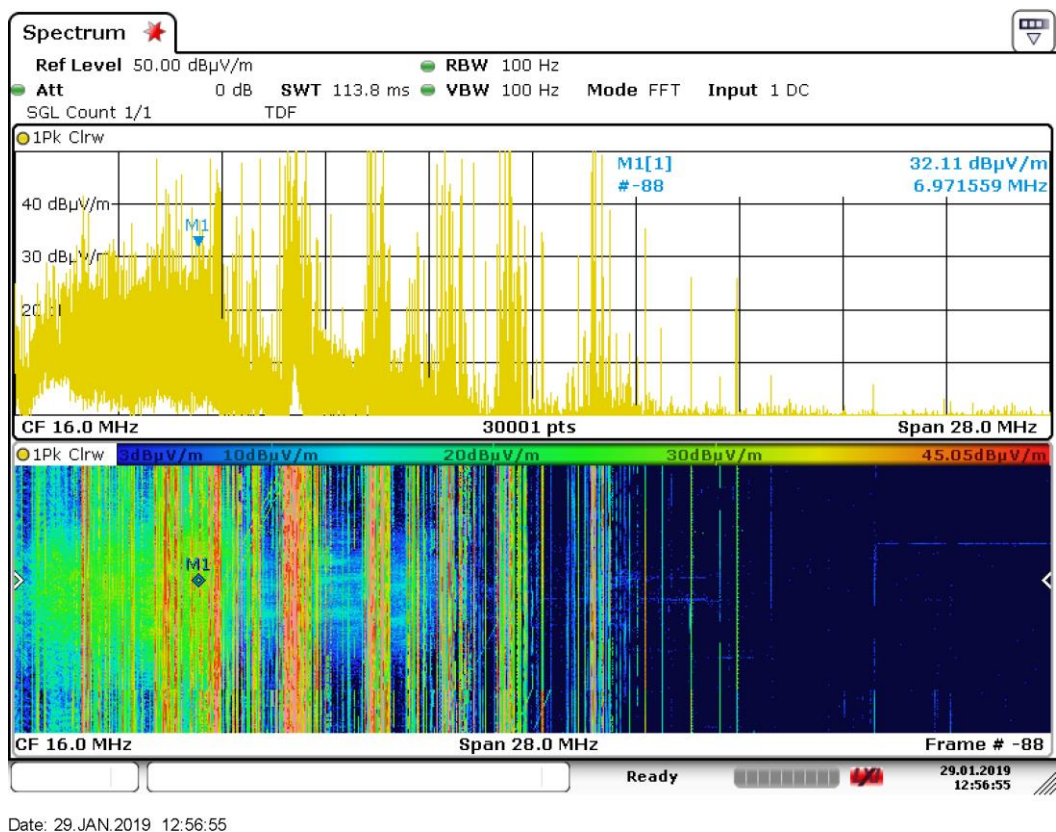


Abb. 22: ICE_GI2_Buschow_50mDamm_EFS9218Gr_005_marker

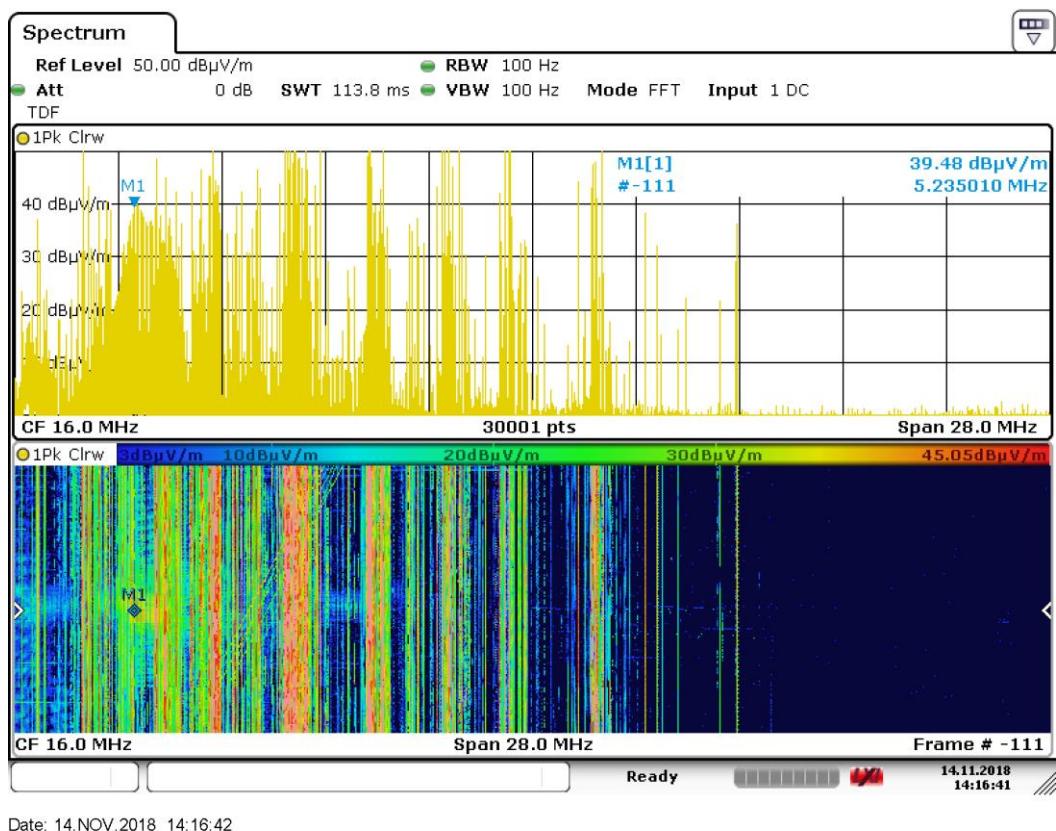


Abb. 23: Personenzug_GI2_50mDamm_EFS9218Gr_008

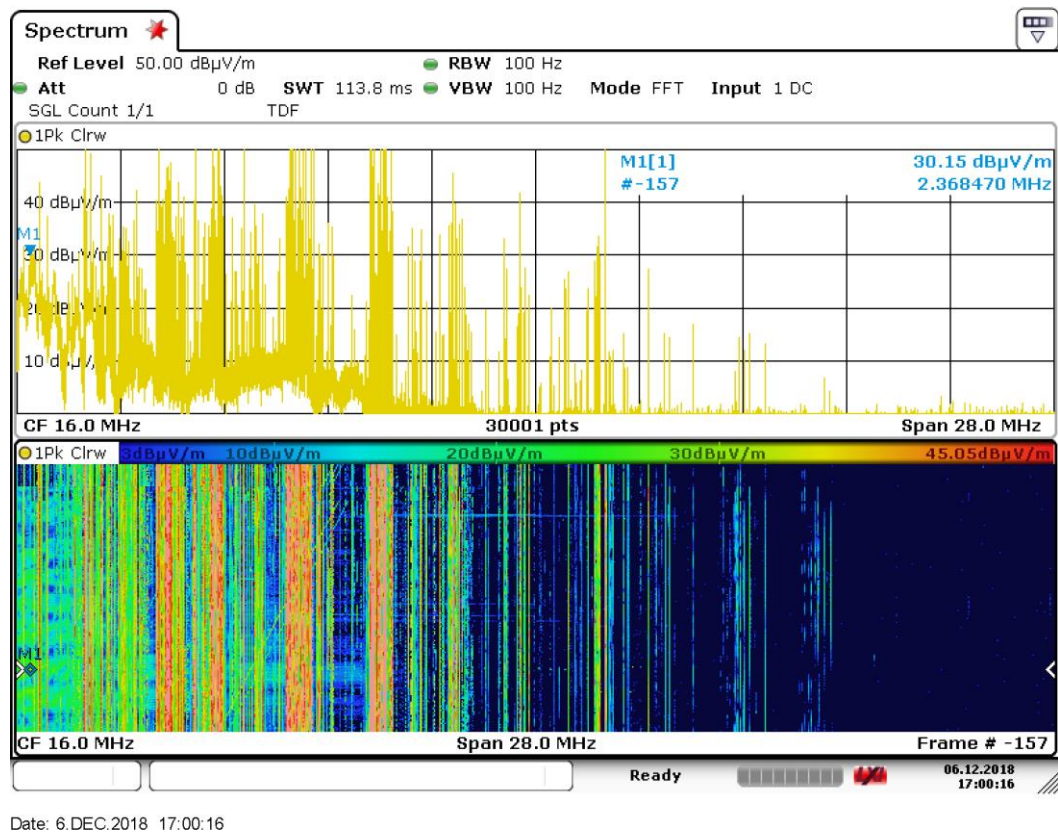


Abb. 24: Gueterzug_Gl1_Buschow_50mDamm_EFS9218Gr_021_Marker

Zur Auswertung der Dämpfungswirkung habe ich die Messwerte in eine Tabelle geschrieben. Teilweise kommen sich die Werte nahe. Wenn man von der Form gleichartige Spektrogramme (ähnlicher Arbeitspunkt des Frequenzumrichters) miteinander vergleicht, kommt man auf 5-7 dB Dämpfung. Außergewöhnlich niedrige Werte wurden in dieser Studie niemals berücksichtigt.

ICE E[dBμV/m]	IC E[dBμV/m]	Triebwagen E[dBμV/m]
Freifeld		
39	46	45
37	41	44
39	45	
41		
Hinter Damm		
28	39	38
36	40	40
32		36
32		

Tab. 1: Messwerte in 50 m Entfernung mit ohne Erddamm

2.3 Theoretische Betrachtungen

2.3.1 Erdwall

Zur Validierung der Dämpfungswirkung eines Erdwalls wurden die folgenden allgemeinen Beziehungen zur Radioabschattung verwendet. In Abb. 25 ist die erste Fresnelzone aufgezeichnet. In ihr wird der Hauptteil der Energie übertragen. Wird diese zur Hälfte abgedeckt, beträgt die Dämpfung 6 dB, unabhängig von der Frequenz. Das deckt sich mit den Messungen am winterlichen Erdwall.

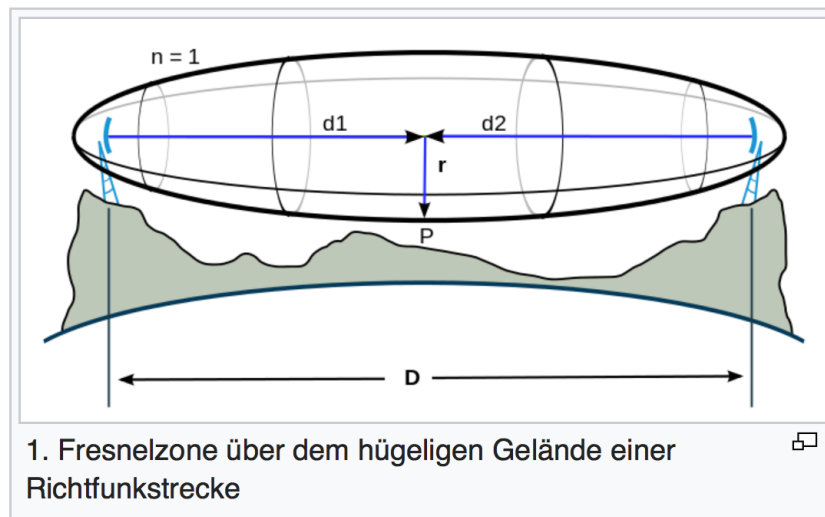


Abb. 25: Ausbreitung der Felder einer Funkstrecke

Zur Berechnung der in die Zone hinter einem Hindernis gebeugten Leistung, gibt es einen Zusammenhang, mit dem erst einmal der Diffraktionsfaktor v berechnet wird. Der Code für ein entsprechendes Matlabprogramm sieht folgendermaßen aus:

```
clear all

%
%
% Berechnung des Beugungsverlustes
% Diffraktionsfaktor v
%

h = 7
lambda = 300/2
r1 = 3
r2 = 900

v = -h*sqrt(2/lambda*(1/r1+1/r2))
```

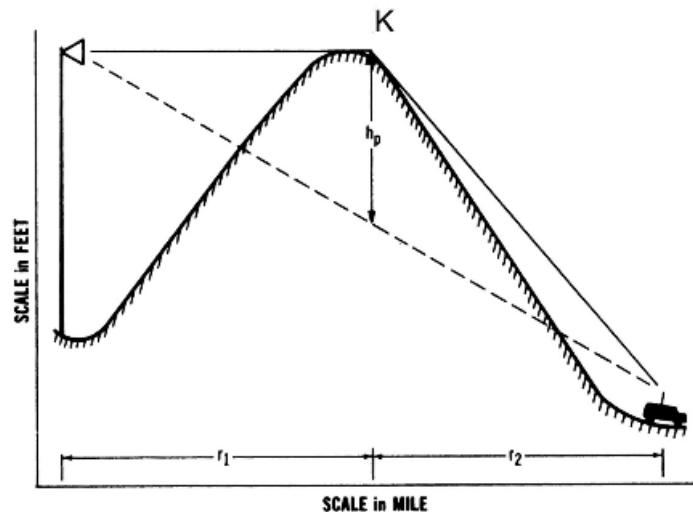


Abb. 25: Geometrie bei der Funkabschattung in hügeligem Gelände.

H ist dabei die Höhe, die das Hindernis den Sender überragt. Bei einem Erdwall, der gleiche Höhe hat, wie die Oberleitung, ist $h=0$. Im Beispiel im Matlabprogramm ist $v = -0,47$. Um aus dem Diffraktionsfaktor die tatsächliche Dämpfung zu berechnen, ist das Lösen aufwendiger Integrale notwendig. Daher ist der Zusammenhang in Abb. 26 dargestellt. Ist $v=0$, kommt 6 dB Dämpfung heraus, das deckt sich also mit unseren bisherigen Erkenntnissen. Mit $v = 0,47$ ergibt sich eine Dämpfung von ca. 10 dB, also müsste ein reiner absorbierender Damm das Kettenwerk um 7 m überragen, um eine Dämpfung von 10 dB zu erreichen. 6 dB sind mit gleicher Höhe frequenzunabhängig erreichbar.

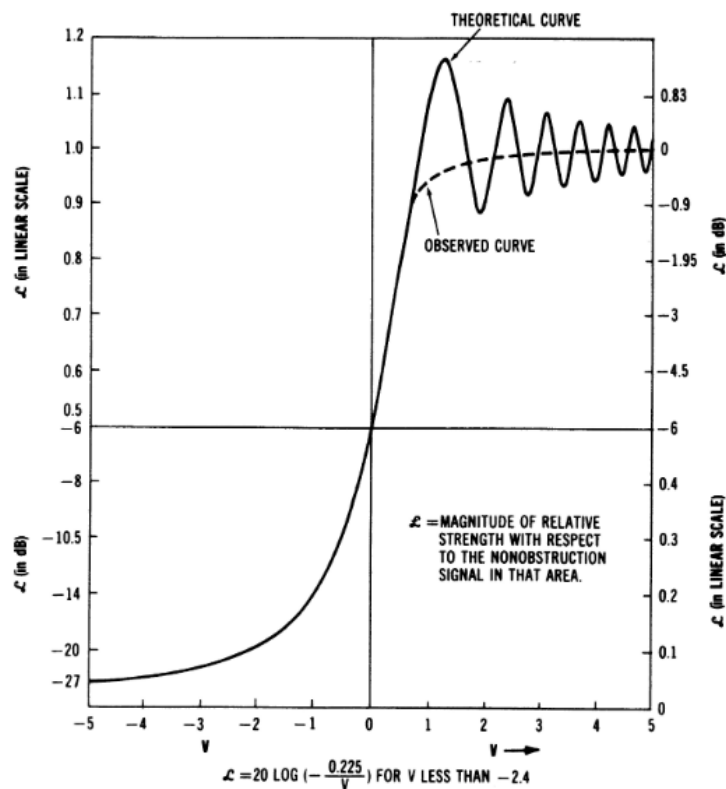


Abb. 26: Zusammenhang zwischen Diffraktionsfaktor v und der Dämpfung.

2.3.2 Metallischer Schirm

Zur Berechnung der Schirmwirkung eines metallischen Schirms wurde das Antennenberechnungsprogramm NEC verwendet. Hierbei wurde der Schirm entsprechend der Polarisierung der Welle als senkrechte Stäbe modelliert. Es zeigte sich, dass eine zur Quelle geneigte Anordnung vorteilhaft ist. Als nachteilig erweist sich, dass die Dämpfung frequenzabhängig ist. Bei 2 MHz ist eine deutlich massivere Ausführung nötig als bei etwa 5 MHz. Schon bei 2,5 MHz zeigten sich deutlich verbesserte Dämpfungswerte. Gute Werte konnten auch mit einer teilweisen Einhausung wie in Abb. 27 erreicht werden. Wegen der Einfachheit des Modells werden jedoch nicht die Absolutwerte der Berechnungen herangezogen. Das Modell wurde zum Verständnis der Zusammenhänge verwendet. Auf die Schirmwirkung der Einhausung wird in Kap. 4 ausführlich eingegangen.

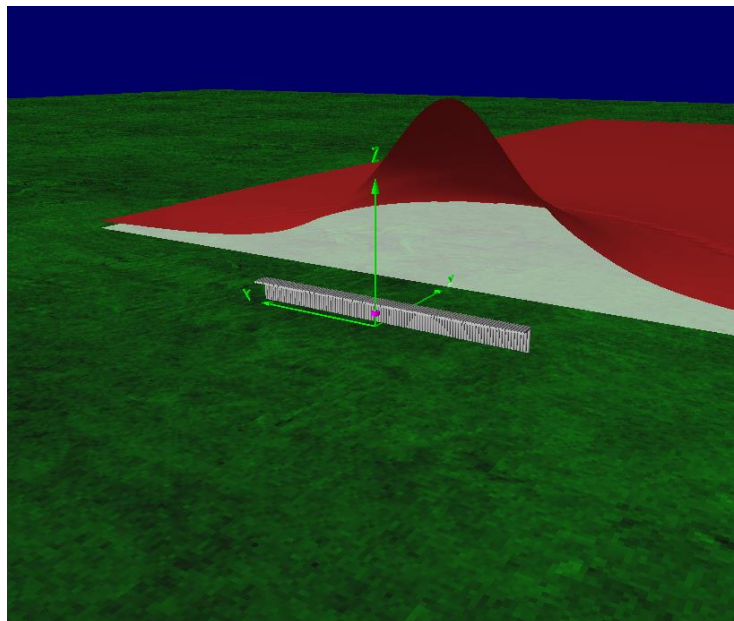


Abb. 26: Einfaches Modell einer überlappenden Schirmung

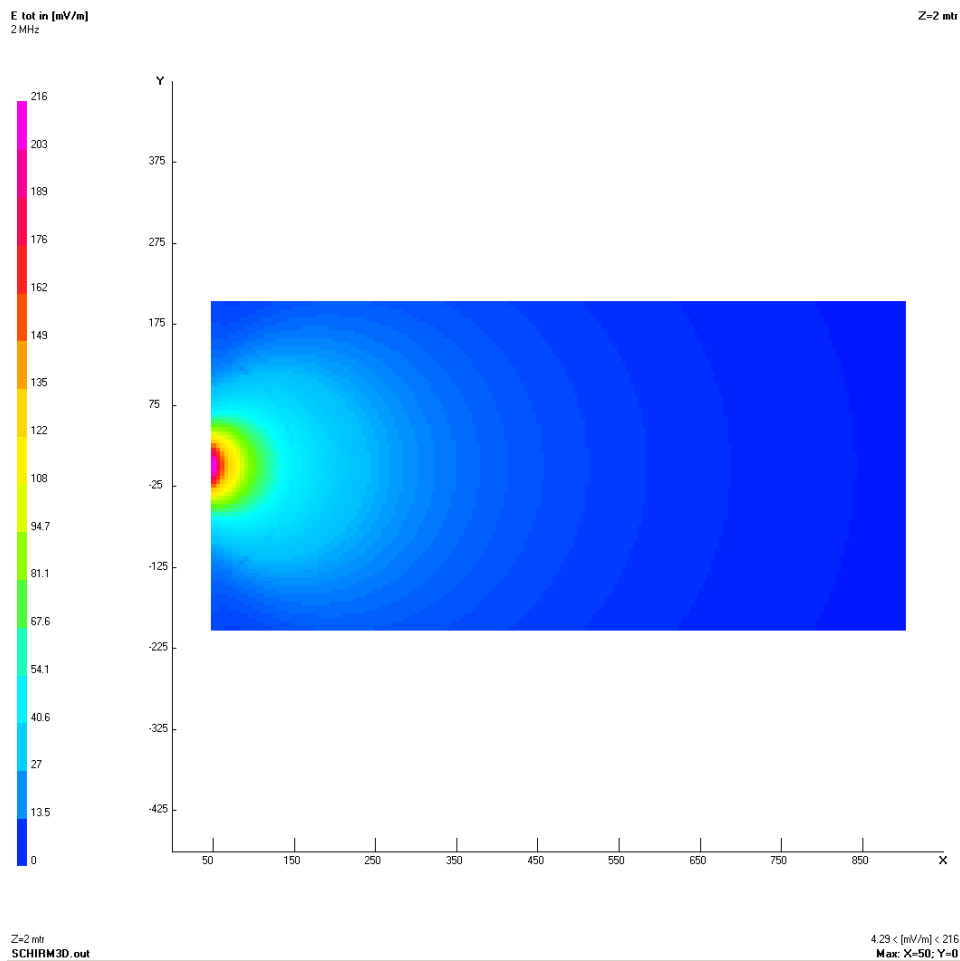


Abb. 27: Berechnung mit dem Nahfeldtool zur Abschätzung der Schirmwirkung von 50 m bis 900 m Abstand gerechnet.

2.4 Fazit der einfachen Schirme

Mit Hilfe eines bis zum Kettenwerk der Oberleitung abdeckenden Erdwalls (ca. 6 m) können frequenzunabhängig 6 dB Dämpfung erreicht werden. Für eine weitere Verbesserung wäre eine überproportionale Erhöhung eines reinen Erdwalls bis 14 m Höhe nötig. Daher wurde als Möglichkeit auch die Kombination mit einer kleinen metallischen Wand (Lärmschutzwand) angedacht. Metallische Schirme müssen keine geschlossenen Oberflächen haben. Lochschirme oder Waben sind in der EMV-Schirmung üblich, etwas an Lüftern. Ein Maschendrahtzaun wird wegen der schlechten Kontaktierung nicht empfohlen. Auf eine sehr gute Erdung ist zu achten. Eine metallische Schirmwand kann am unteren Rand des Frequenzbandes (2 MHz) eine schlechtere Wirkung haben, als schon bei 2,5 MHz oder 3 MHz. Allerdings ist die Beugungsproblematik vergleichbar mit der des reinen Erdwalls und daher müsste die kombinierte Höhe ebenfalls 14 m betragen.

Neben der Kombination aus Erdwall und Schirmwand wird die Schirmwirkung einer teilweisen Einhausung durch ein Galeriebauwerk untersucht. Aufgrund des erheblichen Aufwands dieser Betrachtungen, wird ihnen ein eigenes Kapitel (Kap. 3) gewidmet.

3 Galeriebauwerk

Ein Galeriebauwerk existiert bei der Deutschen Bahn bisher noch nicht. Es ist in Planungen an der Schnellstrecke Karlsruhe – Basel enthalten. Für eine Abschätzung der Schirmwirkung sind daher keine direkten Messungen möglich und ist man auf Messungen an einem einfachen Modell und auf theoretische Betrachtungen angewiesen.

Die schirmende Struktur befindet sich im Nahfeld des Strahlers auf dem Triebfahrzeug bzw. der Oberleitung. Daher sind a priori die Auswirkungen von magnetischen Quellen und elektrischen Quellen getrennt zu betrachten. Erst im Fernfeld bilden diese ein kombiniertes elektromagnetisches Feld, bei dem sich die Amplitude (bzw. der Pegel) der einen Feldkomponente aus der anderen berechnen lässt und umgekehrt. Die beim Galeriebauwerk verwendeten Materialien Aluminium und Stahl sind für die Schirmung sowohl hochfrequenter elektrischer als auch hochfrequenter magnetischer Felder geeignet. Dies gilt, obwohl sie nicht perfekt leitend sind, was in numerischen Berechnungen üblicherweise angenommen wird. Die Materialdicken sind wesentlich dicker als die resultierende Eindringtiefe der HF-Wellen in das Material. Beeinträchtigungen der Schirmwirkung können bei ungenügender Qualität der Erdung und durch Beugung um die hintere Kante der Einhausung sowie durch Schlitze bei schlechten Kontaktierungen der einzelnen Bauteile auftreten.

Eine gute und durchgängige Erdung ist wesentlich für die Wirksamkeit des Schirms, denn an jeder Impedanz bildet sich eine Antenne statt eines Schirms. Es ist daher wichtig, den Erdwiderstand und die Übergangswiderstände an den Kontaktierungen der Bauteile klein zu halten. Üblicherweise wird dies schon aus Blitzschutzgründen durch großflächige Verbinder mit Geflechtbändern sichergestellt. So kann der Schirm auf Erdpotential gehalten werden. Die Schirmwirkung entsteht durch Felder umgekehrter Orientierung, die auf die Innenseite der leitenden Flächen durch die Ströme, die die einfallenden Felder verursachen, erzeugt werden.

Bei den Messungen erzeugten die Aussendungen der Triebfahrzeuge Muster in den Spektrogrammen, die mit den Signaturen der Störungen von Frequenzumrichtern bei Windenergieanlagen (WEAs) oder bei Stromerzeugern vergleichbar sind. Die Schirmung des Frequenzumrichters selbst ist vergleichsweise effektiv durchzuführen, es breiten sich jedoch an beiden Anschlüssen der Leistungskabel leitungsgebundene Störungen aus und strahlen über diese ab. Dieser Strahlungsmechanismus ist bei WEAs allgemein anerkannt. Zudem konnten bei den Messungen an Zügen in Vorbeifahrt konnten insbesondere in den unteren Frequenzbereichen erhöhte Pegel bereits vor Eintreffen des Zuges gemessen werden, was für eine Abstrahlung auch über die Oberleitung spricht. Im Triebfahrzeug selbst wird von einer Orientierung des Stromlaufs von der Oberleitung nach unten über den Frequenzumrichter und den Motor zur Erde ausgegangen. Im Motor werden die hochfrequenten Störungen durch die großen Induktivitäten gefiltert. Die Hauptrichtung des Stroms im Triebfahrzeug dürfte einer vertikalen elektrischen Antenne entsprechen. Schleifen, die als magnetische Antenne wirken würden, werden hingegen kaum vorhanden sein.

3.1 Simulationen und Messungen am Modell 1:10

Es ist durch die Modellgesetze bekannt, dass Messungen an einem Modell in einem bestimmten Maßstab zuverlässige Ergebnisse liefern. Die Wellenlänge ist im gleichen Maßstab anzupassen, wie die Dimensionen der Strukturen modifiziert werden. In unseren Untersuchungen wurde ein Maßstab von 1:10 gewählt, daher wurden die Ausdehnungen der Schirmwand 1:10 verkleinert, der Messabstand auf 5 m verkleinert und vergleichsweise kleine Antennen verwendet (Abb. 28). Die Empfangsantenne wurde in einer Höhe von 50 cm angeordnet, niedriger war aus praktischen Gründen kaum möglich. Bei den gewählten Dimensionen der Messanordnung konnte ein Netzwerkanalysator zur Messung der Schirmwirkung verwendet werden. Der Frequenzbereich skalierte ebenfalls mit dem Faktor 10 zu 20 MHz – 300 MHz.



Abb. 28: Messungen am Modell 1:10

Verglichen wurden die Ergebnisse der Messung mit einem Modell mit dem numerischen Berechnungsprogramm NEC. Da NEC einen Schirm nicht direkt berechnen kann, wurde auf eine Modellierung der schirmenden Wand durch doppelte Strukturen zurückgegriffen. In der Praxis wird in eine Schirmwand ein elektrischer Strom erzeugt, der ein transversales elektrisches Feld erzeugt, das dem einfallenden entgegengesetzt ist und bei perfekter Leitfähigkeit die transversale Komponente des einfallenden Feldes aufhebt. Dies geschieht auf der Innenseite des Schirms, auf der Außenseite fließt idealerweise hingegen kein Strom, vorausgesetzt, dass die leitende Struktur sehr gut geerdet ist. In der Realität wird es zu Beugungsphänomenen um die hintere Begrenzung des Galeriebauwerks kommen, diese sollten jedoch aufgrund der Überdeckung der Quelle verglichen mit einer einfachen vertikalen Schirmwand wie der Lärmschutzwand deutlich verringert sein.

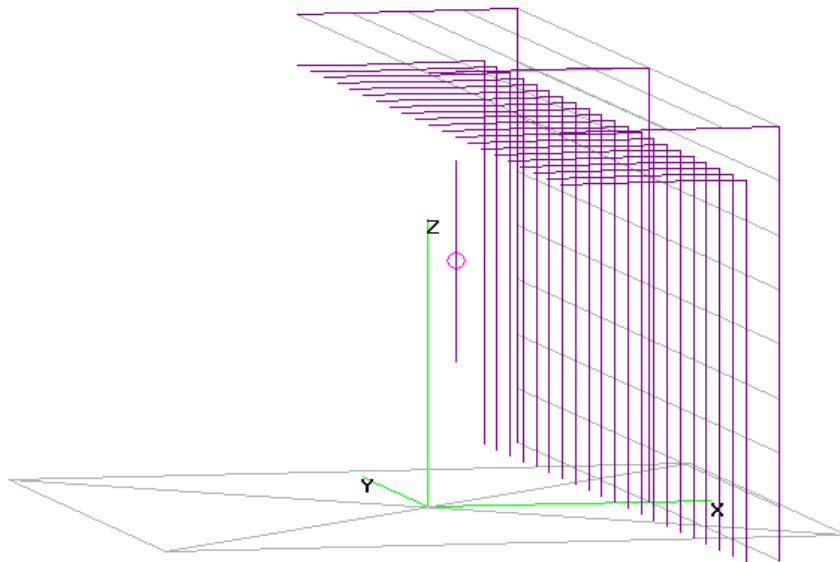
Der übliche Weg in der numerischen Simulation ist, Flächen mit Drähten zu modellieren. Bei Drähten wird der Strom auf dem Draht als Linienstrom in der Achse des Drahtes berechnet. Ein einfallendes elektrisches Feld erzeugt einen Strom, der seinerseits ein elektrisches Feld abstrahlt. Dieses wird nach dem Huygensschen Prinzip in alle Richtungen abgestrahlt. Es resultiert in der ursprünglichen Ausbreitungsrichtung des Feldes ein schwächeres Feld. Dies entspricht nicht genau einer Modellierung der Schirmwirkung einer Fläche. Insbesondere werden Feldkomponenten zu benachbarten Strukturen abgestrahlt, so dass es zu Überlagerungseffekten kommen kann, die gegenüber der Realität übertrieben sind. Dies geschieht bei Abständen, die ganzzahligen Verhältnissen der Wellenlänge oder ganzzahligen Bruchteilen der Wellenlänge ($1/4$, $1/2$, $3/4$, 1 , $1,5$, 2 ...) entsprechen, gegenüber der Realität verstärkte Resonanzeffekte berechnet werden, die in der Realität in dieser Intensität nicht auftreten würden. Bei bestimmten Wellenlängen trat der Effekt auf, dass benachbarte Strukturen abwechselnd maximalen Strom und minimalen Strom aufwiesen. Dies wird auf die extrem idealisierte Modellierung mit perfekt ausgerichteten, perfekt leitenden Strukturen zurückgeführt, in denen ein perfekt lokalisierter und ausgerichteter Linienstrom fließt. In der Realität sind z.B. die Streben der Einhausung aus Stahl nicht perfekt sondern „nur“ sehr gut leitend und haben eine nicht zu vernachlässigende Dicke so dass die Struktur insgesamt breitbandiger und damit deutlich weniger resonant ist.

In NEC kann man ebenfalls Flächen (patches) zur Modellierung von Flächen nutzen. Diese müssen wie auch die Drähte segmentiert werden, damit auf diesen Teilstücken die Ströme berechnet werden können. Die Felder werden durch die Einbringung von patches auf der Außenseite abgeschwächt, werden jedoch nicht zu 0. Die Erdung des Modells wird durch Drähte, die bis auf den Erdboden reichen, verbessert. Es ist jedoch eine bekannte Schwäche von NEC, dass die Erdung nicht hinreichend genau berechnet wird, so dass eine Unterschätzung der Schirmwirkung erwartet

wird. Es wurde beobachtet, dass die berechnete Schirmwirkung bei Erreichen der Grenze der gegenüber der jeweiligen Wellenlänge minimalen Segmentierung abnimmt, kurz bevor bei weiterer Erhöhung der Frequenz (kürzere Wellenlänge) ein Segmentation Error wegen zu großer Segmente (auf die Wellenlänge bezogen) ausgegeben wird.

Da NEC den Strom auf einem Draht als Linienstrom darstellt, und damit die Kompensation des einfallendes transversalen Feldes durch den „Gegenstrom“ (so dass der Strom auf der Außenseite der Struktur 0 ist) nicht direkt berechnen kann, wurde eine Doppelstruktur entwickelt, die Innen- und Außenseite darstellen soll. Bei der Modellierung komplexer Strukturen ist es allgemeiner Konsens, die Gültigkeit des Modells an einem Ersatzproblem, welches messtechnisch beherrscht werden kann, zu testen. Die Schirmwirkung des Modells wurde mit den maßstäblichen Messungen im Maßstab 1:10 verglichen. Bei den Messungen wurde eine Dipolantenne unter ein gekantetes Aluminiumblech positioniert und in 5 m Entfernung und 50 cm Höhe eine Dipolempfangsantenne aufgestellt. Es wurde nun über den Frequenzbereich 20-300 MHz mit einem Netzwerkanalysator die Schirmwirkung als Verhältnis der Empfangsfeldstärke mit Blech und ohne Blech in dB bestimmt.

Im Rechenmodell wurden innen vertikale Stäbe erzeugt. Zur Beschreibung der Außenseite des Blechs wurden die Flächen und Stäbe verwendet. Diese wurden mit drei Drähten „geerdet“. Um keine zu starke elektromagnetische Kopplung der beiden parallelen Strukturen zu erzeugen, wurde ein Abstand von 6 mm zwischen beiden Strukturen gelassen. Es wurden zwei verschiedene Messanordnungen untersucht: in der ersten Anordnung befand sich die Sendeantenne bündig unter der oberen Begrenzung des Blechs und in der zweiten wurde sie 5 cm hineingeschoben, so dass es eine Überlappung gab. Es wurde die Feldstärke in 5 m Entfernung und 0.5 m Höhe berechnet. Mit diesem Modell konnte der Frequenzbereich 20-190 MHz abgedeckt werden, darüber mussten die patches weiter segmentiert werden. Die höhere Segmentierung führte zu einem sprunghaften Anstieg der Feldstärke in 5 m Entfernung. Deswegen wurde der Frequenzbereich oberhalb 190 MHz vernachlässigt. Die vorangegangenen Messungen an den Bahnstrecken haben ergeben, dass oberhalb 19 MHz keine signifikanten Störungen der elektrischen Lokomotive zu erwarten sind. Rechnung und Messung des 1.10-Modells können nun miteinander verglichen werden. Sie bilden prinzipiell den gleichen charakteristischen Verlauf der Dämpfung über die Frequenz mit Ausnahme des Bereichs um die 70 MHz. Dort werden hohe Ströme auf der Innenseite des Schirms angeregt, die nach außen koppeln und so erhöhte Strahlungswerte des Schirms und somit verringerte Schirmdämpfung auf Werte um 8-9 dB aufweisen. Die kombinierte Länge des vertikalen und des horizontalen Drahtes beträgt etwa $\lambda/4$, so dass eine Resonanz auftritt, die sich in der realen Messung in dieser Ausprägung nicht zeigt. Dort ist eine geringere breiter ausge dehnte Abnahme der Schirmwirkung vorhanden. Gleiches gilt für die Konfiguration mit der geringfügigen Überlappung, bei der die Antenne um 5 cm abgedeckt wird. Die errechnete Dämpfung liegt in vielen Fällen unter der gemessenen, so dass die untere Grenze der Schirmdämpfung von NEC unterschätzt wird.



Theta : 84

Axis : 0.5 mtr

Phi : 257

Abb. 29: Simulationsmodell der des metallischen Schirms der Messungen

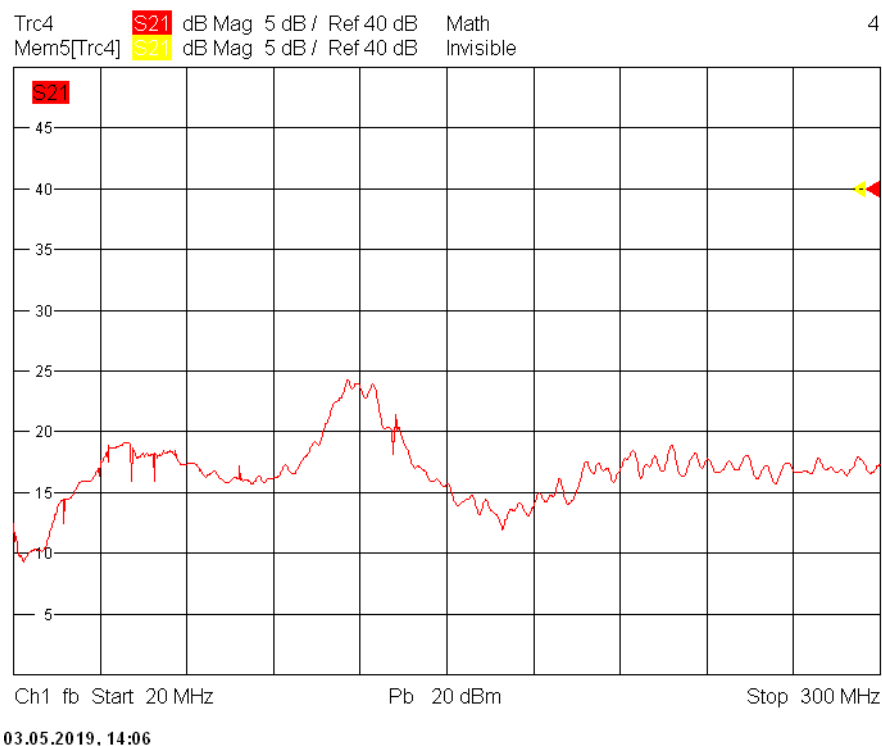


Abb. 30: Schirmdämpfung bei bündiger Sendeantenne

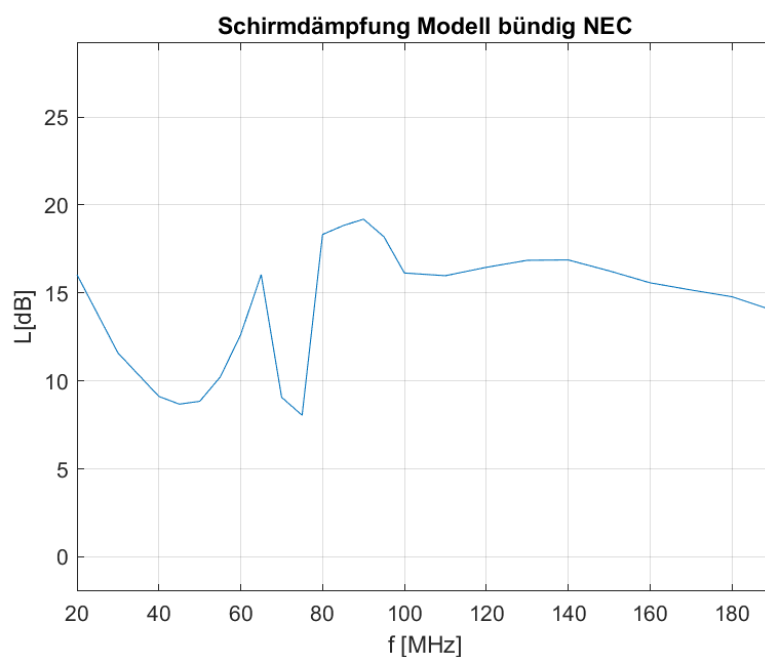
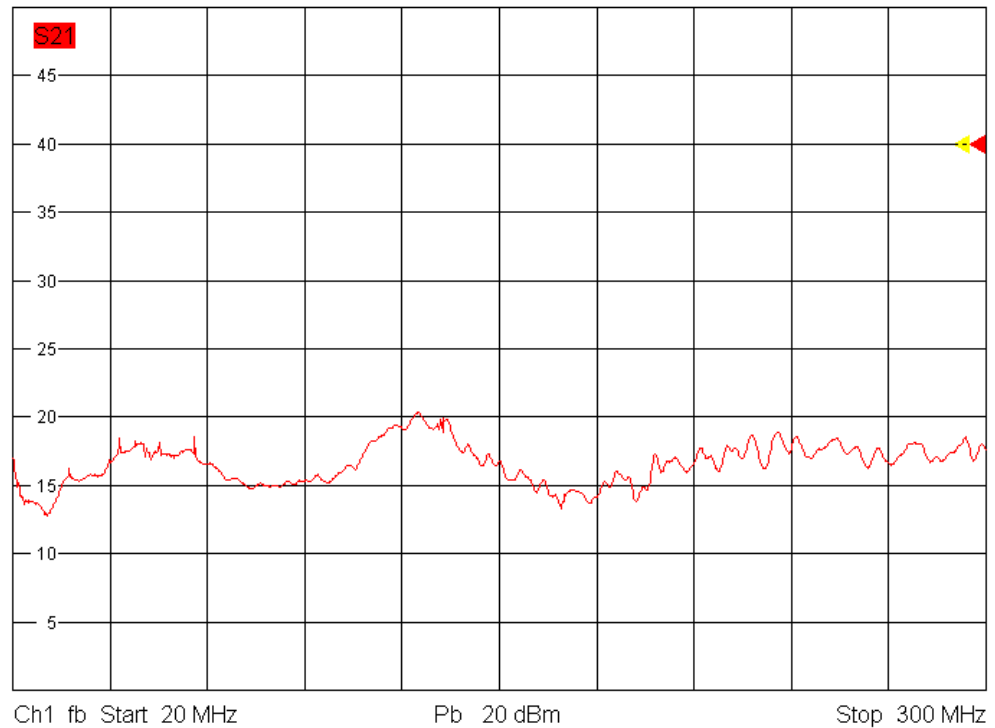


Abb. 31: Berechnete Schirmdämpfung bei bündiger Sendeantenne



Trc4 S21 dB Mag 5 dB / Ref 40 dB Math
Mem5[Trc4] S21 dB Mag 5 dB / Ref 40 dB Invisible

4



03.05.2019, 13:23

Abb. 32: Schirmdämpfung bei überdeckter Sendeantenne (5 cm)

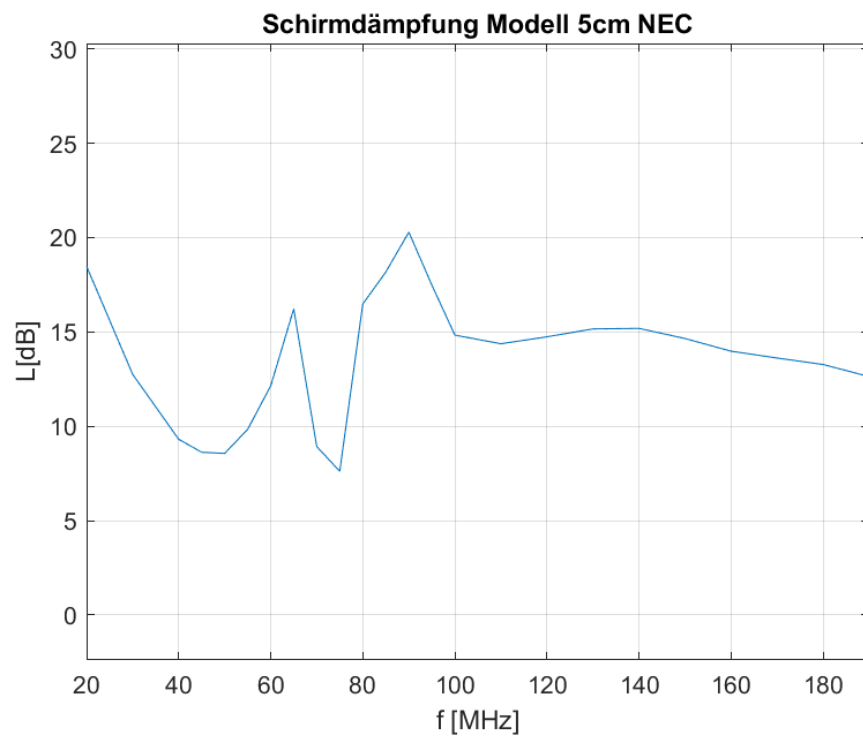


Abb. 32: Berechnete Schirmdämpfung bei überdeckter Sendeantenne (5 cm)

3.2 Simulation des Galeriebauwerks

Diese Strategie wurde auf die Modellierung der Schirmwirkung einer zu realisierenden Einhausung, die an der Rückseite offen, oben und an der relevanten Seite aber mit Blechen geschlossen, umgesetzt. Derartige Bauwerke der Bahn existieren noch nicht und können daher nur in Simulationsrechnungen untersucht werden. NEC kommt wegen der Größe der Struktur von 200 m Länge an die Grenze der zulässigen Anzahl der Segmente. In Abb. 33 ist zu simulierende Struktur zu sehen.

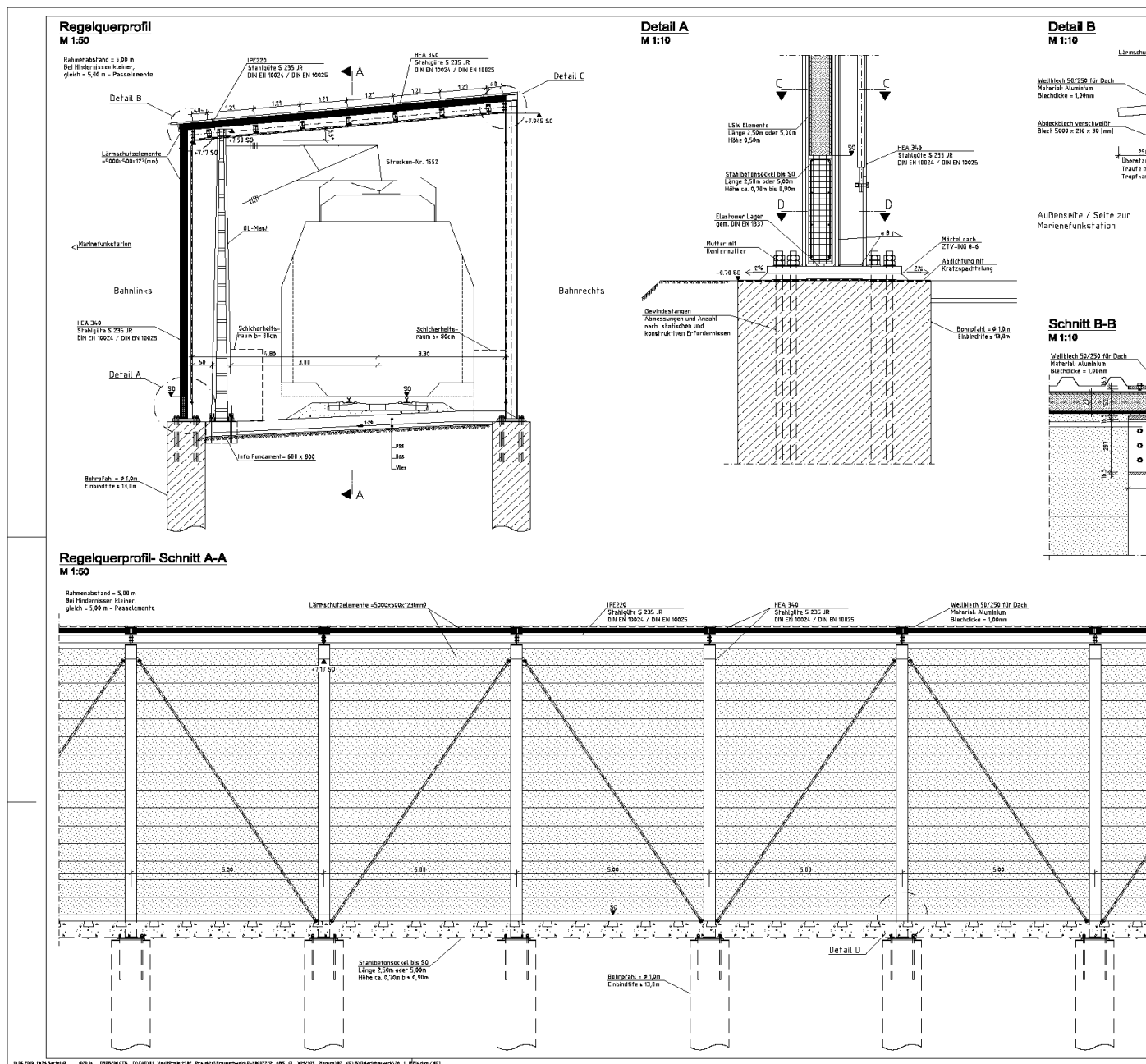


Abb. 33: Technische Zeichnung des Galeriebauwerks

Dieses wurde in NEC als Doppelstruktur (Abb.34) mit vertikalen Stäben als Träger in jeweils 5 m Abstand und Patches als metallische Lärmschutzelemente mit insgesamt 200 m Länge modelliert:

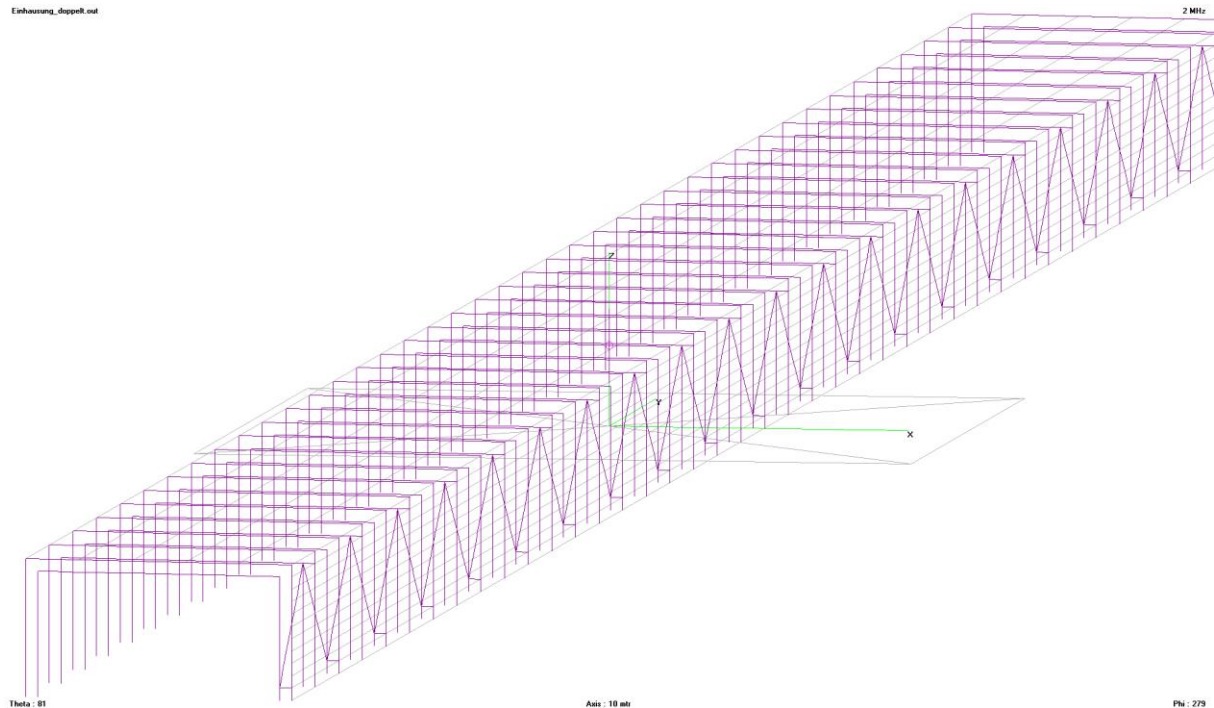


Abb. 34: Draht- und Flächenmodell der Einhausung in NEC. Die Flächen (patches) sind rechts und oben jeweils außen angebracht.

Mit diesem Modell konnte die Schirmdämpfung zwischen 1 MHz und 9 MHz berechnet werden. Der kritische Frequenzbereich für Störungen des Frequenzumrichters ist jedoch abgedeckt.

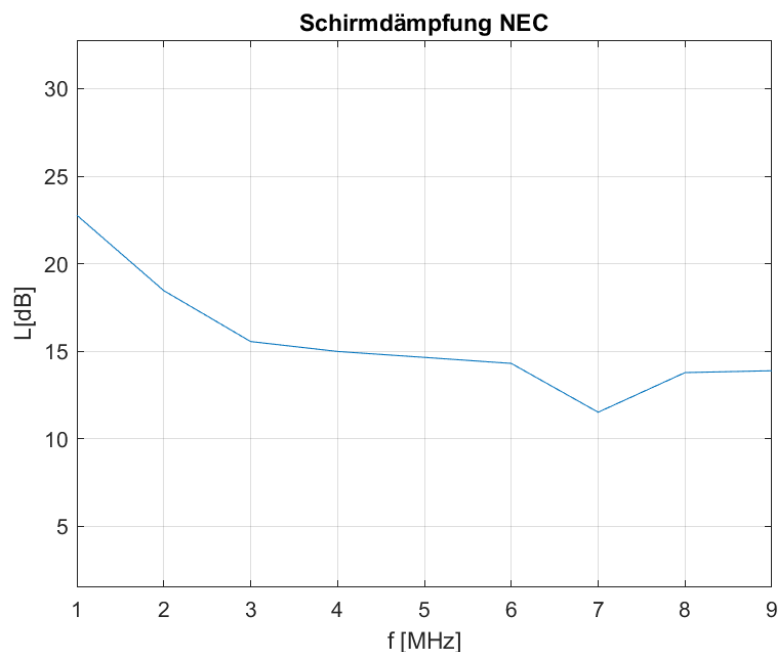


Abb. 35: Schirmdämpfung des Galeriebauwerks bei vertikal polarisierter Quelle

Nach den Berechnungen (Abb. 35) ist im kritischen Frequenzbereich, in dem relevante Ausstrahlungen der elektrischen Triebfahrzeuge nachgewiesen worden sind, eine ausreichende Dämpfung der elektromagnetischen Emissionen vorhanden.

Simulationen mit elektrischen Quellen in den beiden anderen Polarisierungen ergaben signifikant niedrigere Feldstärken in 900 m Entfernung.

Berechnungen mit magnetischen Quellen wurden mit einer rechteckigen Antenne als Leiterschleife in drei Orientierungen durchgeführt. Mit der Ringantennen-förmigen Anregung eines H-Feldes ergaben ebenfalls sich in zwei Orientierungen unkritische Werte für die Feldstärke in 900 m Entfernung. Lediglich bei der Anordnung der Leiterschleife in der XZ-Ebene wurden relevante Störpegel in 900 m Entfernung erreicht da eine bis zu 5 dB niedrigere Dämpfung berechnet wurde (Abb. 35). Aufgrund der linearen Form der Quelle der Störungen (Frequenzumrichter) und der zugehörigen Stromflussrichtung wird eine Störung aus großflächigen Ringströmen in der Realität jedoch nicht erwartet.

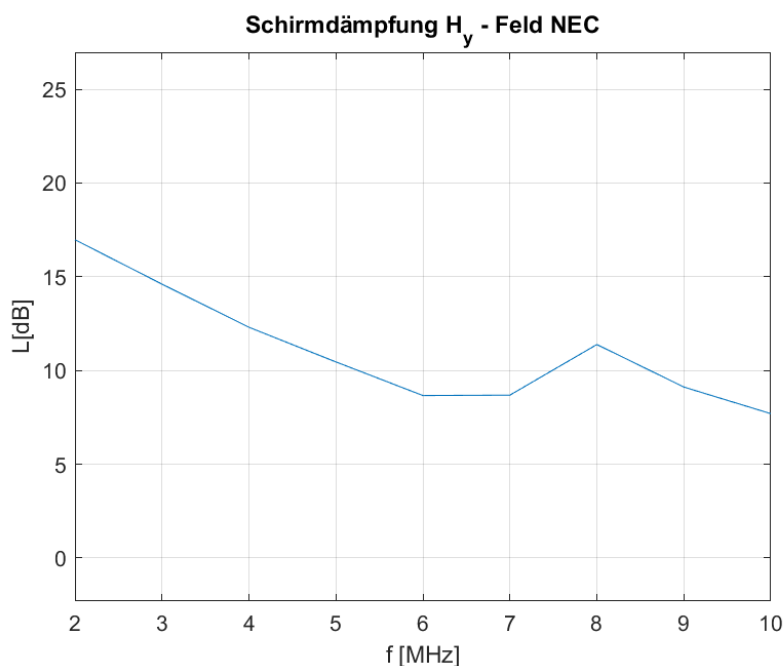
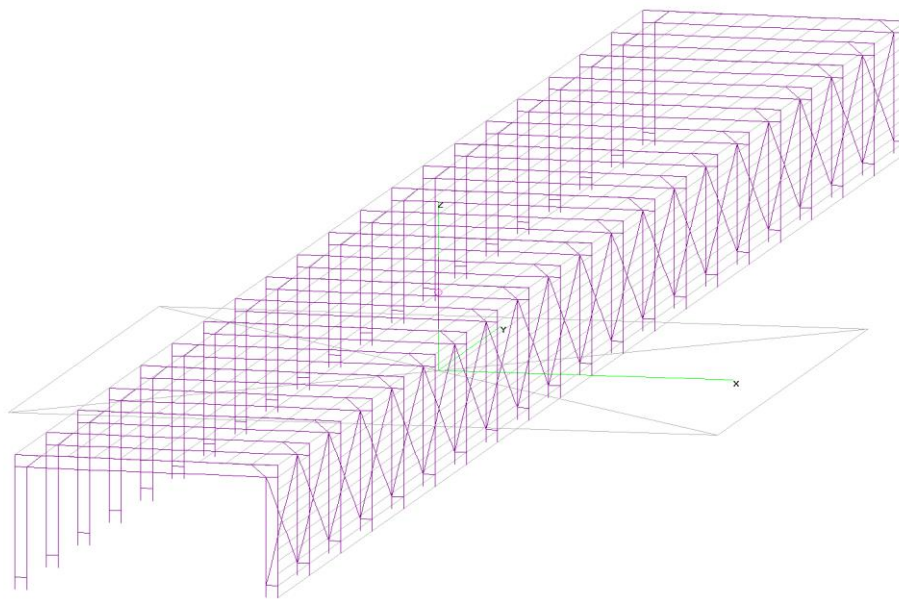


Abb. 36: Schirmdämpfung der magnetischen Quelle mit Orientierung parallel zur den Streben der Galerie

Bei einem weiteren Meeting mit der DB Netz AG ergab sich, dass der Aufbau des Galeriebauwerks eine leichte Modifikation erhalten hatte. Die seitlichen Streben sind nicht nur in jeweils einer Diagonale vorhanden, sondern als Kreuze ausgeführt. Da das Modell in NEC hinsichtlich der Anzahl der Segmente bereits ausgereizt war und auch Simulationen im gesamten Frequenzbereich durchgeführt werden sollten, wurde das Modell des Galeriebauwerks nun auf 100 m verkürzt (Abb. 37). Aus der Abstrahlungscharakteristik und auch weil im unteren Frequenzbereich keine stark erhöhten Pegel bzw. verminderte Schirmwirkung festgestellt wurde, wurde geschlossen, dass Simulationen mit dieser Länge ausreichend sind. Mit dieser Struktur konnte der Frequenzbereich 1-28 MHz abgedeckt werden, so dass Ergebnisse für praktisch den gesamten relevanten Frequenzbereich vorliegen (Abb. 38). Allerdings erwies sich die Schirmwirkung des Bauwerks mit der engeren Begrenzung als frequenzabhängig, dadurch dass eine Modulation auf der berechneten Kurve der Schirmdämpfung liegt. Dies wird auf Resonanzeffekte zurückgeführt, die aufgrund von endlicher Leitfähigkeit, Ausdehnung der einzelnen Komponenten und Irregularitäten des Aufbaus in dieser ausgeprägten Form in der Realität nicht zu erwarten sind. Es wurde versucht, mit unterschiedlicher Anzahl von Verbindungen zwischen Innenstruktur und Außenstruktur, stehende Wellen und Resonanzen auf der Außenstruktur zu minimieren. Bereits bei den Simulationen zu dem 1:10 Modell waren diese Resonanzphänomene festgestellt worden.



Theta : 75

Axis : 10 m/s

Phi : 282

Abb. 37: Modifiziertes Galeriebauwerk in NEC

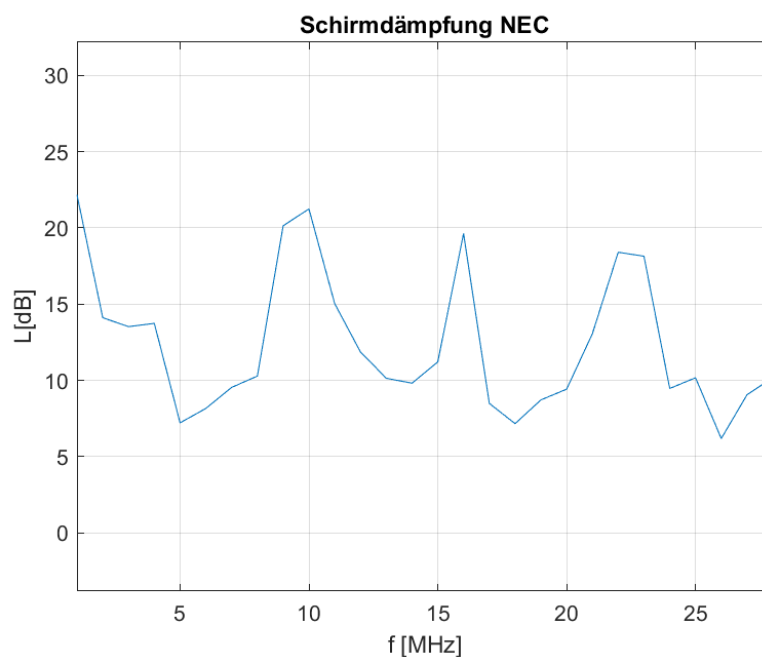


Abb. 38: Frequenzgang der simulierten Schirmdämpfung

Es wird daher in der Realität eine Dämpfungskurve mit geringeren Ausschlägen als in Abb. 38 erwartet, so dass die Schirmwirkung über den gesamten Frequenzbereich über 10 dB liegen dürfte, zumal die Schirmwirkung auch bei dem skalierten Modell gegenüber der Messung unterschätzt wurde.

Eine Oberleitung wurde in den Simulationen nicht eingebracht, da wegen der begrenzten Ausdehnung im Rechenmodell Reflexionen an den Enden und damit stehende Wellen auf dieser auftreten, die in der Praxis auf der ausgedehnten Oberleitung nicht vorhanden sind. Daher wurde

hier auf die Berechnung der Abstrahlung mit einer horizontalen polarisierten Antenne zurückgegriffen. Als Sendeleistung in der Simulation wurde die gleiche wie in allen Simulationen gewählt. Da bekannt ist, dass die Ausbreitung einer horizontal polarisierten hochfrequenten Welle über Erdboden einer starken Dämpfung durch den Erdboden unterliegt, wurde die in 900 m Entfernung ankommende Feldstärke mit der aus der vertikalen Polarisation verglichen. Tatsächlich ist die Feldstärke des elektrischen Feldes in 900 m Entfernung um mindestens 15 dB kleiner als bei vertikal abgestrahlter Welle. Hierbei wurde die gesamte Feldstärke, die aus allen Empfangspolarisationen gebildet wird, berechnet. Die Komponente der vertikal polarisierten Feldstärke am Empfangsort (gleiche Polarisation wie die Empfangsantenne) ist nochmal um etwa einen Faktor 3 kleiner.

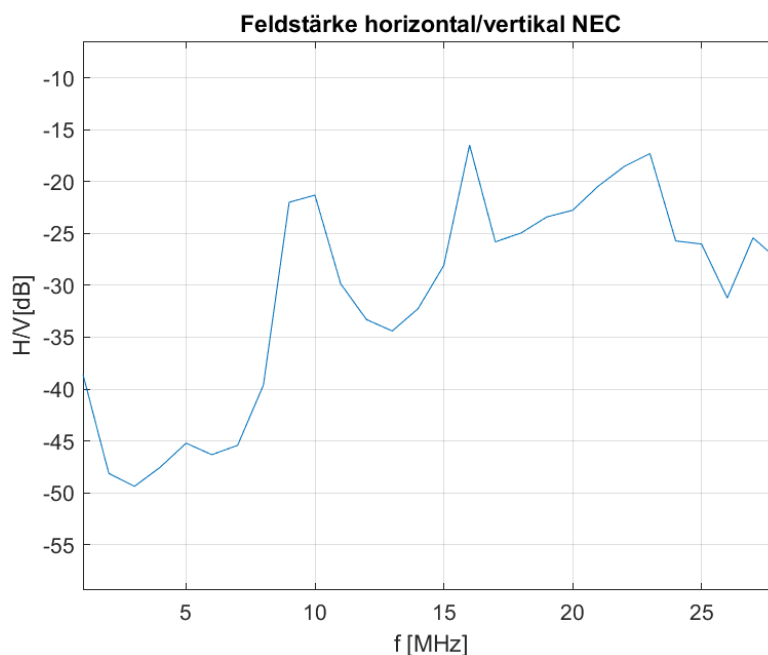


Abb. 39: Feldstärke der horizontalen Polarisation in 900 m Entfernung bezogen auf die der vertikal polarisierten elektrischen Quelle.

Aus der Vielzahl an Untersuchungen wird von einer Ausreichenden Schutzwirkung des Galeriebauwerkes von mindestens 12-13 dB ausgegangen, wenn für ausreichenden Potentialausgleich zwischen den Einzelteilen des Bauwerks gesorgt wird und die Erdung gut ausgeführt wird.

Die theoretischen Untersuchungen und Modellmessungen zur Ermittlung einer ausreichenden Schutzwirkung des Galeriebauwerkes wurden im direkten Kontakt mit der wehrtechnischen Dienststelle für Schiffe und Marinewaffen, Maritime Technologie und Forschung (WTD 71) der Bundeswehr abgestimmt.

4 Zusammenfassung

Es wurden Wege aufgezeigt, wie eine Verringerung der kritischen Störpegel durch die hochfrequente Ausstrahlungen elektrischer Güterzüge realisiert werden kann. Als einzige praktikable Lösung hat sich die Abdeckung der elektrischen Komponenten des vorbeifahrenden Triebfahrzeugs und der Oberleitung sowie der zugehörigen stromführenden Komponenten erwiesen. Eine ausreichend hohe Dämpfung zum Schutz der Arbeitsfähigkeit der HF-Marineempfangsstelle in Sengwarden kann jedoch nur mit einem Galeriebauwerk erreicht werden. Es wurde eine erhebliche Anzahl an Untersuchungen durchgeführt und diese weisen stark darauf hin, dass eine ausreichende Verringerung der Störpegel tatsächlich mit dem geplanten Galeriebauwerk realisiert wird. Bei ungenügendem Ergebnis kann eine weitere Verbesserung mit einer geschlosseneren Bauweise durch das zusätzliche Anbringen leitender Platten oben auf der offenen Seite erreicht werden. Dass dies nötig ist, wird jedoch nicht erwartet.