

Endbericht

Messungen der HF-Abstrahlung bis 30 MHz von elektrischen Güterzügen

Dr. Stefan Hawlitschka

Version: 1.0

11. Juni 2018

Inhaltsangabe

1	Einleitung	4
2	Messungen.....	5
2.1	Messergebnisse der Spektralmessungen.....	8
2.1.1	Messungen 10.4.2018.....	8
2.1.2	Messungen 11.4.2018	11

Erstellt von:

Fraunhofer FKIE
Abteilung: KOM
Fraunhoferstr. 20
53343 Wachtberg

1 Einleitung

In diesem Bericht wird über Messungen berichtet, die der Abschätzung des Störpotentials von elektrischen Güterzügen auf hochfrequente Kommunikation dienen. Der betrachtete Messbereich beträgt 2 -30 MHz.

Es wurden an einer Strecke bei Hude Züge in Vorbeifahrt in verschiedenen Lastzuständen und im Stehen an einer Signalanlage Spektrogramme aufgezeichnet. Die Pegel steigen bei Annäherung eines Zuges an und werden nach Vorbeifahrt wieder kleiner. So kann die Signatur eines Zuges gut von den Hintergrundsignalen unterschieden werden.

2 Messungen

Für die Messungen wurden der Spektrumanalysator Rohde&Schwarz ESR-7 und die magnetische Rahmenantenne R&S HFH2-Z2 verwendet. In Voruntersuchungen hatte sich das als geeignete Kombination herausgestellt. Es sollte noch eine empfindlichere Antenne Schwarzbeck EFS g219 besorgt werden, diese ist jedoch nicht mehr lieferbar. Die stattdessen angeschaffte EFSg218 wies keinen Vorteil in der Empfindlichkeit auf.

Da die Züge jeweils in Vorbeifahrt gemessen wurden, wurden nicht Einzelspektren, sondern Spektrogramme aufgezeichnet. Der ESR zeichnet im FFT-Modus lückenlos Spektren auf, so dass keine Störungen verloren gehen. 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. Die Dämpfung des Spektrumanalysators wird kleinstmöglich eingestellt, um den Rauschlevel 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 wurden. Bei der Interpretation der Spektrogramme muss berücksichtigt werden, dass der eingespielte Kalibrationsfile 10 dBµV/m zu wenig anzeigen lässt. Dies geschah, weil der ESR-7 bei den Messungen zwar einwandfrei aufgezeichnet hat, aber im Betriebssystem ein Fehler aufgetreten ist, der die Bedienung teilweise unmöglich machte. So gelang es die Messdaten im proprietären .dfl – Format abzuspeichern. Zusätzliche Screenshots konnten allerdings nicht mehr gemacht werden. Trotzdem ist kein Datenverlust aufgetreten. Die in den Diagrammen im Vergleich zum errechneten Grenzwert gezeigten Pegel sind hingegen mit dem korrekten aktuellen Kalibrationswerten erstellt worden.

Es werden Spektrogramme mit dem MaxPeak-Detektor gemessen, da die jeweils höchsten Pegel die Störung bestimmen. QuasiPeak braucht zudem eine gewisse Messzeit.

Die Messentfernung betrug jeweils 50 m. Erfahrungsgemäß ist man damit aus dem physikalischen Nahfeld heraus.

Es wurde an zwei Tagen, am 10.4. und 11.4.2018 gemessen. Die äußeren Bedingungen waren gut. Allerdings kam nur am zweiten Tag eine größere Zahl an Güterzügen vorbei. Evtl. hing das mit den Tarifverhandlungen im Öffentlichen Dienst zusammen. Vorteilhaft war, dass die Züge an unterschiedlichen Stellen in unterschiedlichem Lastzustand und Geschwindigkeit fahren. So konnte Langsamfahrt, Bremsen, Beschleunigung, Stillstand und normale Fahrt aufgezeichnet werden.

2.1 Einfluss des Abstands

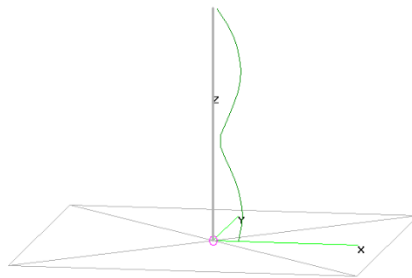
In der Nähe des Strahlers und insbesondere bei niedrigen Frequenzen bildet sich noch keine nennenswerte Welle im Erdboden aus. Die zusätzliche Dämpfung im Erdboden ist daher klein. Außerhalb des strahlenden Nahfeldes ($d > \lambda/3$) fällt die Feldstärke im Freiraum (kein Erdboden) mit $1/r$ ab. Dies entspricht 25 dB von 50 m auf 900 m. Die zugehörige Formel für dB lautet:

$$D = 20 * \log_{10} \left(\frac{900}{50} \right) \text{dB} = 25 \text{dB}$$

Um ein differenzierteres Bild zu erhalten, wurden Simulationen mit dem Antennenberechnungsprogramm NEC-2 durchgeführt. Es wurde eine 8 m hohe Monopolanterenne als Strahler verwendet. Dadurch entspricht die mittlere Höhe des Strahlers der Höhe der Oberleitung. Für den Erdboden wurden die Parameter $\sigma=9 \text{ mS}$ und $\epsilon=30$ angenommen. Dann wurde in 1.5 m Höhe (=Höhe der Messantenne) die elektrischen Feldstärke in den Abständen 50 m, 900 m, 1.500 m und 2.000 m berechnet. Aus dem Verhältnis der Feldstärken wurde die Ausbreitungsdämpfung in dB berechnet.

MONO.out

30 MHz



Theta : 80

Axis : 5 mtr

Phi : 280

Abb 1: Strahler in NEC-2

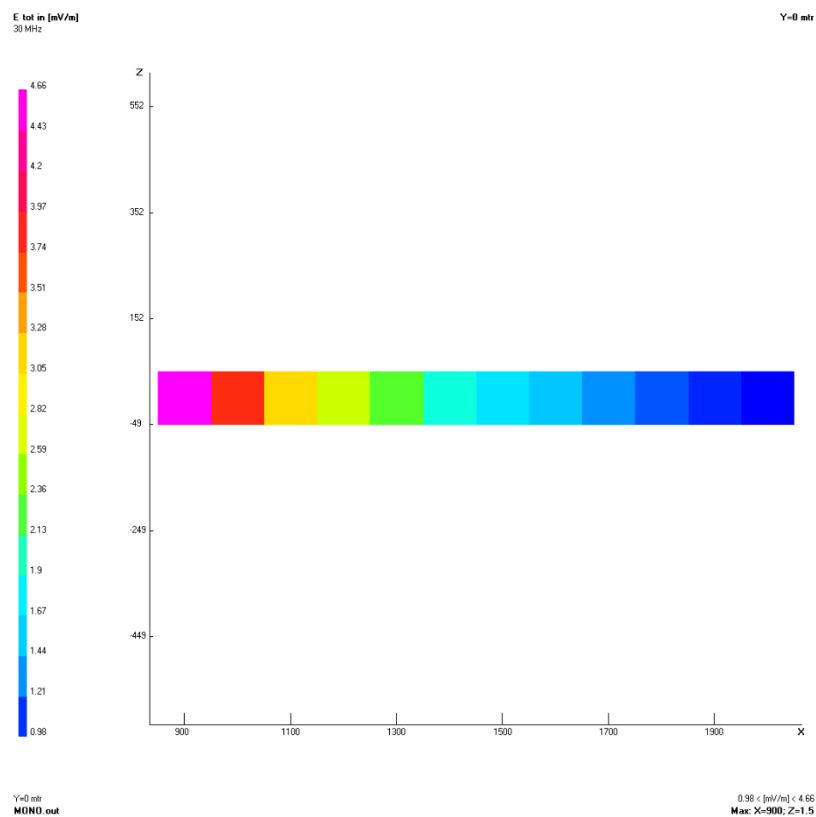


Abb 2: Beispielhaftes Ergebnis für die Feldstärken in einem Raster von 100 m Weite. Durch Anklicken können die konkreten Zahlenergebnisse ausgelesen werden.

Die Simulationen in NEC ergeben folgende Werte für die Ausbreitungsdämpfung über realem Erdboden:

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: Ausbreitungsdämpfung nach Berechnung mit NEC-2 unter Berücksichtigung realen Bodens

Die errechneten Werte sind bei 2 MHz und 3 MHz nur geringfügig größer als die reine Freiraumdämpfung, was auf eine nur kleine zusätzliche Dämpfung im Erdboden hinweist. Diese Werte sind also plausibel. Bei höheren Frequenzen und den größeren Abständen nähert sich die Ausbreitungsdämpfung dem Wert, den man mit der Formel:

$$D = 40 * \log_{10} \left(\frac{900}{50} \right) dB = 25dB$$

Beide Fälle sind in Übereinstimmung mit den Diagrammen in ITU rec. P.368 (siehe Appendix).

2.2 Ermittlung des Außenrauschens

Im HF-Bereich bestimmt das Außenrauschen und nicht das Empfängerrauschen die Empfindlichkeit einer Empfangsanlage. Als Informationsquellen stehen Angaben in ITU-rec. P.372 zur Verfügung. Es werden Kurven für die allgemeine Klassen quiet rural, rural, residential und city angegeben. Galactic noise wird ab 10 MHz ebenfalls spezifiziert. Rural, also ländlich, ist hier die offensichtliche Wahl, da die Antenne der Marine nicht vollkommen abgelegen, aber nicht in besiedeltem Gebiet liegt und von einem Schutzbereich umgeben ist.

Weiterhin steht aufgrund der Mitarbeit in der Koordinierungsgruppe "Messtechnische Untersuchungen zum Schutz von Sende- und Empfangsfunkanlagen" (KG MUSE) der Bundesnetzagentur (BNetzA) stehen Messergebnisse des Außenrauschens auf drei Frequenzen im betrachteten Frequenzbereich über jeweils 24 Stunden in den Jahren 2011-2013 zur Verfügung. Dessen Ergebnisse können mit den Kurven rural und quiet rural verglichen werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass zur Ermittlung der ITU-Kurven in den 1970er Jahren eine große Anzahl an Messungen ausgewertet wurden. Diese Kurven werden noch heute als Bezug für die Rauschsituation als anerkannter Standard herangezogen. Die Werte werden als Median der Rauschzahl F_{am} angegeben, aufgrund der hohen Variabilität der Aktivität der Sonne und damit der Ionosphäre kann die Rauschsituation von Tag zu Tag sehr stark variieren. Hinzu kommen ein Tagesgang und eine Variation mit dem 11-jährigen Sonnenzyklus. Die Rauschzahl F_{am} kann als Rauschen über dem thermischen Rauschen angesehen werden. Mit Gleichung (7) im Dokument ITU-R P.372 kann die Rauschzahl in eine Feldstärke eines kurzen verlustlosen Monopols bei einer bestimmten Auflösungsbandbreite umgerechnet werden:

$$E_n = F_a + 20 \log(f_{\text{MHz}}) + B - 95.5 \quad \left[\text{dB} \frac{\mu\text{V}}{\text{m}} \right]$$

Die Messungen der Bundesnetzagentur basierten auf Messkampagnen die zum Schutz von Sicherheits-empfindlichen Empfangsanlagen über 8 Jahre durchgeführt wurden, wie z.B. Funkdiensten der Bundeswehr oder Deutschen Flugsicherung (DFS). Die Marinefunkstelle in Sengwarden war während drei Jahren Teil des Programms. Es zeigte sich der allgemeine Trend in den Messdaten, dass die Rauschpegel bei 5 MHz höher lagen und bei 12 MHz und 20 MHz niedriger als in den entsprechenden ITU-Kurven. Ein Trend einer Zunahme der Rauschpegel durch die zunehmende Digitalisierung konnte über die 8 Jahre nicht gefunden werden.

Die Vorgehensweise kann hier nur kurz angerissen werden: Es wurde ein Dipol mit einer Resonanzfrequenz von etwa 14 MHz auf dem Messfahrzeug über den Kurzwellenbereich kalibriert. Dann wurde in der Nähe dreier Frequenzen (5.3 MHz, 12 MHz und 20 MHz) jeweils ein freier Bereich ohne Sender identifiziert. Auf diesem wurde jährlich ein Zeitraum von 24 h mit dem RMS-Detektor (1s Mittelung) aufgezeichnet. Die Daten wurden weiter gefiltert, um nur Rauschdaten aufzunehmen. Aus diesen Daten habe ich den Median berechnet. Diese Pegel sind als Vergleichswerte in den folgenden Diagrammen eingezeichnet.

2.3 Messergebnisse der Spektralmessungen

Es werden Muster im Spektrogramm sichtbar, die sich unter anderem aus der Regeltätigkeit des Frequenzumrichters ergeben. Dies ist bereits aus Messungen von Windenergieanlagen bekannt. Allgemein wachsen die Pegel während der Näherung der Lokomotive an und sind im Moment des geringsten Abstands Zug-Messantenne am höchsten. Einige Messungen wurden angehalten während der Zug sich näherte und dann wieder intervallmäßig wieder gestartet, so dass die Situationen der Lokomotive in Vorbeifahrt, der Lokomotive in einiger Entfernung und die Ruhespektren (bei großer Entfernung der Lokomotive) in einem einzigen Diagramm dargestellt werden konnten. Dadurch dass die Messungen angehalten und jeweils wieder gestartet werden, ist für jeden Zustand jeweils etwa ein Drittel der Anzeige reserviert. Da Signale bereits bei mittlerer Entfernung empfangen werden und ein echtes Ruhespektrum schwer zu messen war, wird angenommen, dass eine Ausbreitung der Signale über die Oberleitung stattfindet. Dafür spricht auch die Auswertung der Messungen im Nahfeld mit den beiden Ausrichtungen der magnetischen Antenne parallel zum Fahrdraht und quer zu ihm.

2.3.1 Messungen 10.4.2018

Es wurde eine gut erreichbare Position mit nahezu freier Sicht auf die Strecke gewählt. Die Messentfernung betrug wie auch in den weiteren Messungen 50 m. Die Position der Antenne ist in der Nähe eines Bahnübergangs, das Aufleuchten des Warnsignals für die Autofahrer der kleinen Straße, die hier die Bahnlinie kreuzt, konnte zur Vorbereitung auf die Messung genutzt werden. Dies war sehr hilfreich, weil sich die Bedienung des Spektrumanalysers aufgrund eines Fehlers im Betriebssystem als schwierig gestaltete. An der hier einspurigen Strecke

Zunächst wird hier ein Ruhespektrum gezeigt. Man erkennt eine Vielzahl an Radiosendern und Funkdiensten, die schmalbandig wie Nadelspitzen im obigen Einzelspektrum erscheinen. Dies erschwert eine Auswertung, die Maxima der Störungen des Zuges müssen manuell mit Cursor ausgelesen werden. Um die Signaturen des Zuges bei Vorbeifahrt zu erkennen und zu beurteilen, wurde nicht einfach nur das Spektrum wie oben im Diagramm mit MaxHold über eine bestimmte Zeit gemessen, sondern die aufeinanderfolgenden Spektren im zweidimensionalen Spektrogramm dargestellt. Es wird noch einmal darauf hingewiesen, dass auf die angezeigten Werte 10 dB zu

addieren sind. Die obere Grenze des Rauschlevels, dort wo keine Signale empfangen werden, liegt normalerweise bei 8 dBmV/m. Hier bei -2 dBµV/m.

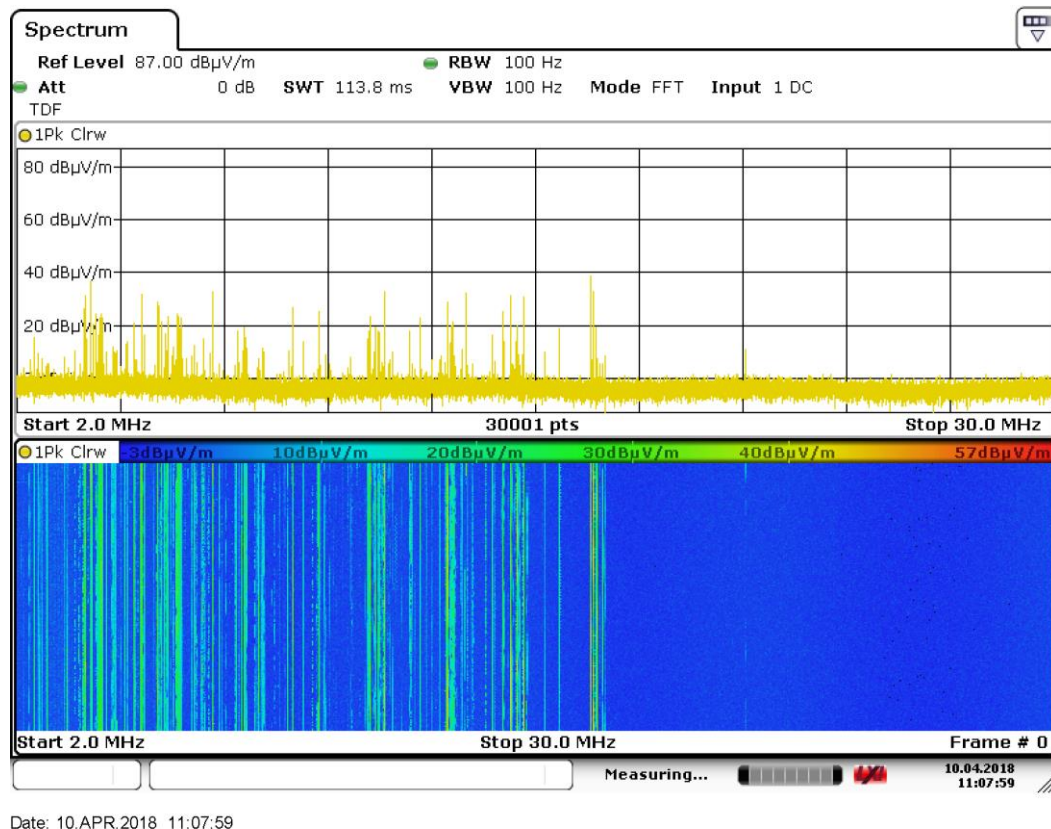


Abb. 3: Ruhespektrum an der ersten Messstelle am Bahnübergang bei Berne.

Am ersten Tag konnte vermutlich aufgrund des Streiks im öffentlichen Dienst nur ein Güterzug gemessen werden. Dieser fuhr in südlicher Richtung und soll auf der Strecke um die Messstelle herum nach der Fahrplanweisung die Geschwindigkeit von 80 km/h auf 50 km/h verringern. Auch in diesem Lastzustand regelt der Frequenzumrichter, so dass Linien von kurzzeitigen breitbandigen Störungen im Spektrogramm sichtbar sind. Diese erscheinen zunächst harmlos und sind oft nur eine Messzeit lang, aber sie haben eine hohe Amplitude. So ist beispielsweise bei der Frequenz 10,6 MHz (am Cursor) eine korrigierte Feldstärke von 29,6 dBµV/m vorhanden. Es wurden die signifikanten Maxima gesucht und in Diagramm eingetragen, dass die ITU-Rauschkurven „rural“, „quiet rural“ und die Median-Rauschlevel über 24 Stunden, die von der Bundesnetzagentur in den Jahren 2011, 2012 und 2013 in unmittelbarer Nähe der Marineantenne auf den Frequenzen 5,3 MHz, 12 MHz, und 20 MHz gemessen wurden.

Das Ruhespektrum in Abb. 3 liegt aufgrund der begrenzten Empfindlichkeit des Messequipments oberhalb des Außenrauschens. Man sieht deutlich die im Spektrum vorhandenen Sender, die natürlich nicht bei der Auswertung betrachtet werden. Auch wenn die Pegel der Ruhemessung in 50 m Entfernung über dem Außenrauschen liegen, so ist die Messapparatur dennoch empfindlich genug, um Pegel zu messen, die nach Abzug der Ausbreitungsdämpfung am Ort der Antenne dem Rauschen entsprechen. Im Rahmen dieser Messgenauigkeit konnte kein Rauschen der Oberleitung an sich festgestellt werden.

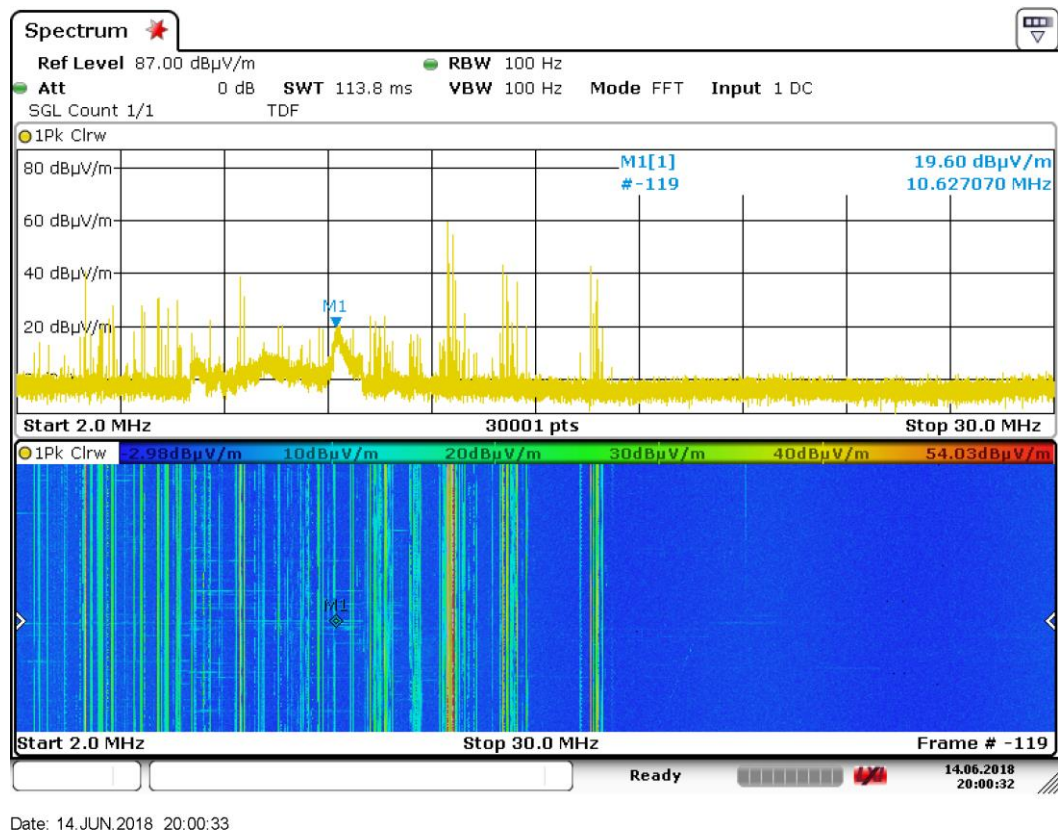


Abb. 4: Spektrogramm der Vorbeifahrt des Güterzuges bei Verzögerung der Fahrt. Oben wird das Spektrum an der Stelle des Cursors im Spektrogramm angezeigt. Der Cursor wurde auf das Maximum der Störung gesetzt und seine Position und der Pegel (um 10 dB verringert) werden rechts oben angezeigt.

Als Ausbreitungsdämpfung wurde bei 2 MHz der Wert der freien Ausbreitung nach der Formel

$$D = 20 * \log_{10} \left(\frac{900}{50} \right) \text{dB} = 25 \text{dB}$$

angenommen. Bei Simulationen mit Nahfeldberechnungen mit Hilfe des Antennenberechnungsprogramm NEC-2 konnte dieser Wert bei 2 MHz im Wesentlichen bestätigt werden. Es ist allerdings zu erwarten, dass eine zusätzliche Dämpfung bei der Ausbreitung der Wellenanteile im Boden stattfindet. So findet man je nach Frequenz differenzierte Werte der „ground wave propagation curves“ in ITU-R P.368. Leider fangen diese Kurven erst ab einer Entfernung von 1 km an, die Kurven weisen dort aber schon mit steigender Frequenz niedrigere Pegel an und auch der weitere Abfall ist unterschiedlich. Daher wurde auf die Werte der Simulation mit einem 8 m langen vertikalen Monopol (Mitte bei 4 m, Größenordnung der Oberleitung) und Berechnung der Feldstärke auf 1,5 m Höhe (=Höhe der Messantenne) zurückgegriffen. Die Werte waren z.B. 26 dB Dämpfung bei 2 MHz und 37 dB bei 30 MHz. Um auf der sicheren Seite zu sein, wurden 25 dB und 35 dB in die Rechnungen eingesetzt. Es wurden die Gleichungen ermittelt und an einzelnen Frequenzen mit Simulationen verglichen. Es zeigte sich, dass die Dämpfung gegenüber der Simulation um bis zu 4 dB gegenüber den Simulationen unterschätzt. Die weitere Dämpfung von 900 m auf die maximale Entfernung des Zuges im Schutzbereich von 1.500 m berechnet sich zu 5,3 dB bei 2 MHz und läuft gegen 8,5 dB ab 10 MHz, was mit ITU-R P.368 übereinstimmt.

Dadurch, dass nur die einzelnen Maxima als signifikante Werte ausgewertet wurden und die anderen Werte, wo keine Störungen durch die Bahn auf das obere Rauschlevel des Messsystems gesetzt wurden, ergibt sich in Abb. 5 ein „zackiges“ Aussehen, dadurch, dass die Werte nicht kontinuierlich dargestellt werden. Jedoch können die Problemstellen eindeutig erkannt und quantifiziert werden.

Alle Werte wurden auf eine Messbandbreite von 100 Hz umgerechnet. Die Messwerte wurden um die Ausbreitungsdämpfung reduziert.

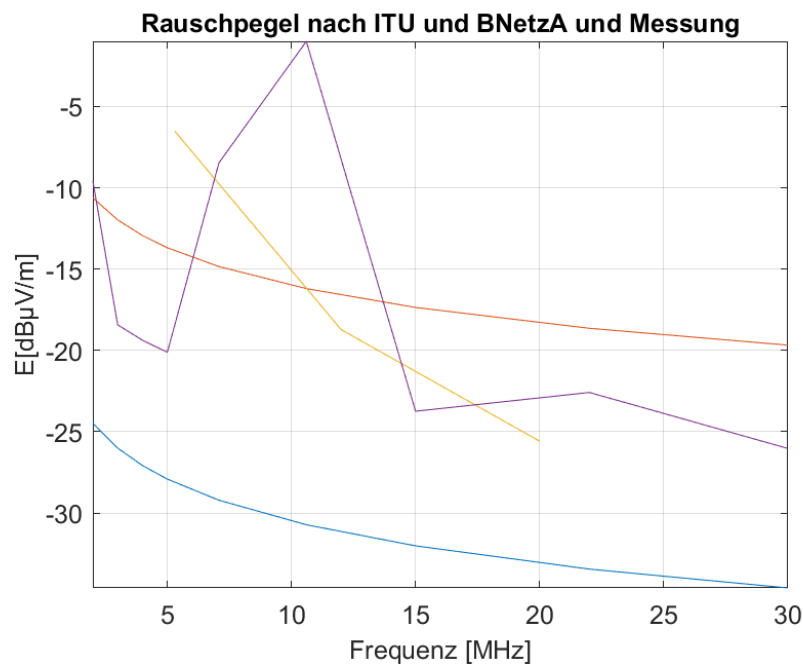


Abb. 5: Zusätzliches Rauschen durch den Güterzug am Ort der Marine-Empfangsantenne im Vergleich zu verschiedenen Annahmen des örtlichen Rauschens.

In Lila ist die Messung zu sehen. Die untere blaue Kurve ist nach ITU „quiet rural“, was in Deutschland kaum anzutreffen ist. Die Ocker-farbene entspricht der Kategorie „rural“, was für einen Standort wie Sengwarden vernünftig erscheint. Die drei Messpunkte der gelben Linie stammen von Messungen der Koordinierungsgruppe MUSE der BNetzA. Sie sind berechnet aus Messungen an drei Tagen in den Jahren 2011, 2012 und 2013, jeweils als Median über 24 h und dem Mittelwert der drei Messungen. Die Medianwerte stimmten innerhalb 2 dB überein. Es zeigte sich auch in Messungen an anderen Standorten der Trend, dass die in den letzten Jahren gemessenen Kurven steiler abfallen als die ITU-Werte aus den 70er Jahren. Bei 10,6 MHz zeigt sich bei dem verzögernden Zug, dass die Pegel um ca. 15 dB gegenüber rural und BNetzA erhöht sind. Aus dem Spektrogramm sieht man, dass die Zeitdauer der Störung maximal in der Größenordnung von 100 ms liegt (nur in einem Spektrum vorhanden).

2.3.2 Messungen 11.4.2018

Am zweiten Tag fuhren mehrere Güterzüge über die Strecke. Durch Veränderung der Position konnten verschiedene Fahrzustände vermessen werden. Weiterhin erschwerte das schadhafte Betriebssystem die Messung. Trotzdem wurde, bis auf die um fast exakt 10 dB zu niedrigen Werte eine erfolgreiche Messkampagne durchgeführt.

Am Anfang steht wieder die Ruhemessung, um die bereits vorhandenen Störungen zu zeigen (Abb. 6):

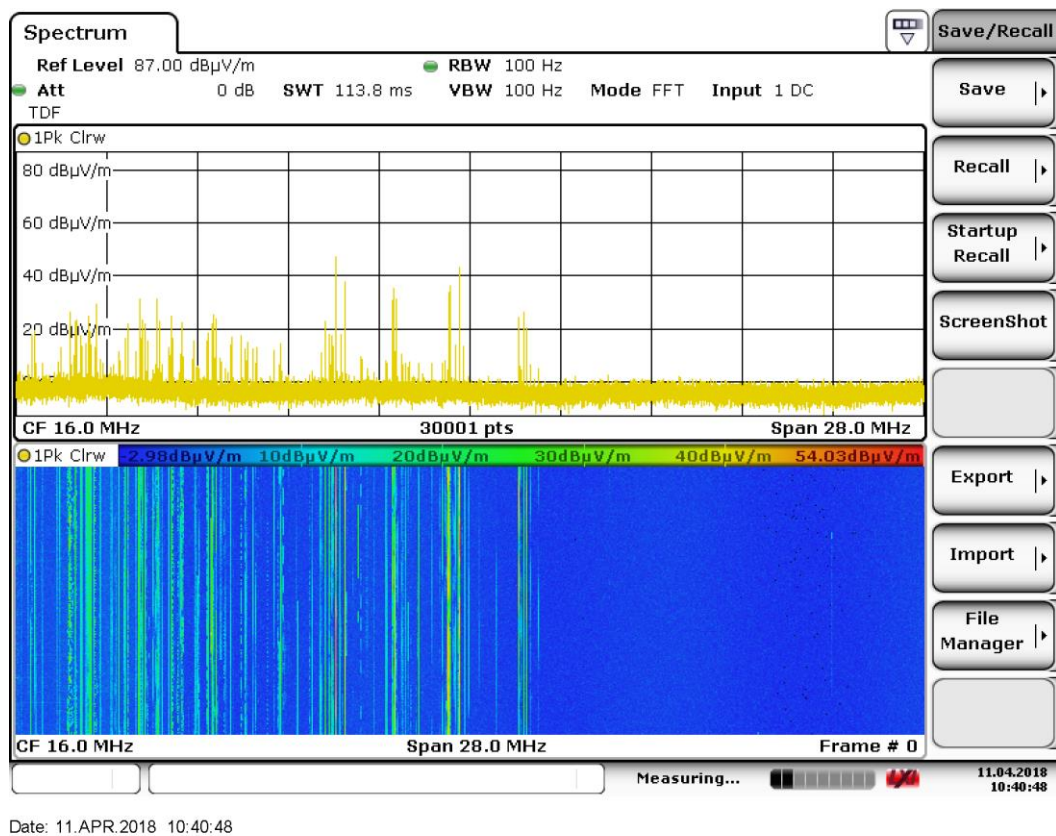


Abb. 6: Ruhespektrum bei Leckerhörne am zweiten Tag.

Zur Illustration des Vorgehens wird in Abbildungen 7 und 8 das gleiche Spektrogramm eines Güterzuges in Vorbeifahrt in nördlicher Richtung bei Bettingbühren mit dem Cursor an zwei verschiedenen Maxima gezeigt. Die Messung wurde kurz angehalten und nach einiger Zeit weitergeführt, so dass im oberen Teil die Ruhesituation ohne Zug gezeigt wird.

In Abb. 9 sieht man die Überschreitung des Außenrauschens nach ITU und BNetzA. Die gemessene und um die Ausbreitungsdämpfung reduzierte Feldstärke ist um 18 dB höher als die Kurve nach rural. Extrapoliert man die Messungen der BNetzA zu tiefen Frequenzen hin, ist es unter 10 dB, wofür allerdings kein Beleg vorliegt. Die nächsten beiden Ausreißer sind bei 18 MHz und 24 MHz. Bei 18 MHz würde das zusätzliche Rauschen um 10 dB über rural liegen, bei 24 MHz 8 dB. Dies allerdings nur kurzzeitig um 100 ms, wohingegen bei den tiefen Frequenzen eine längere Störung vorliegt.

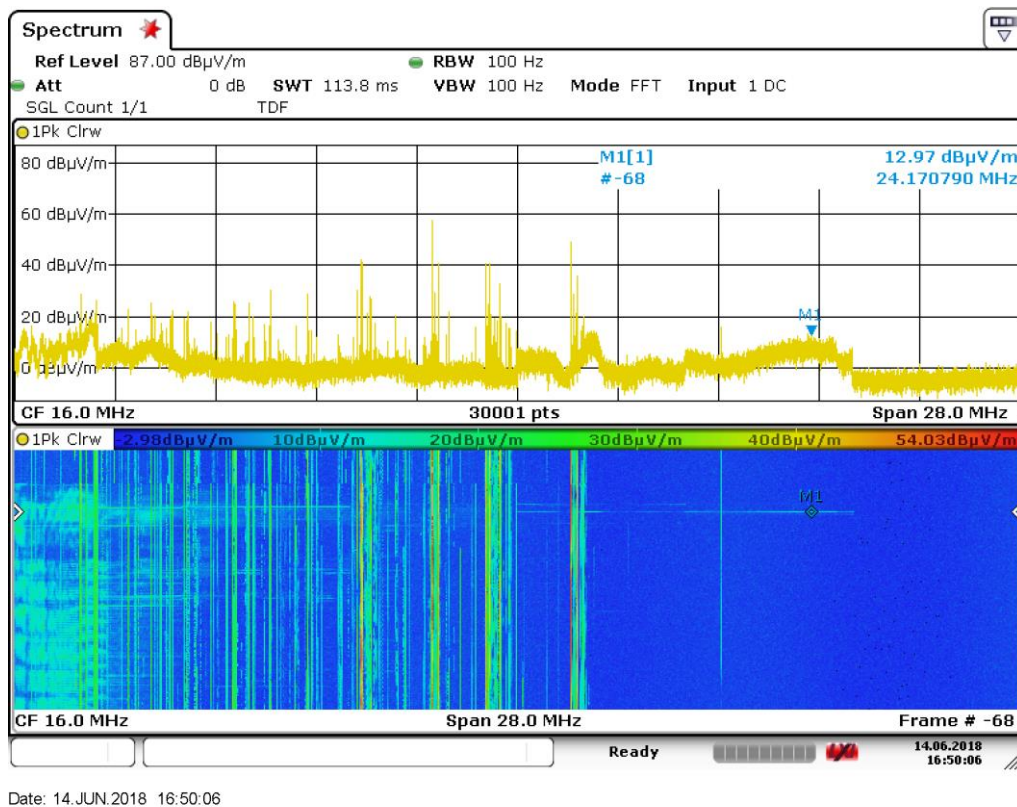


Abb. 7: Spektrogramm eines Güterzuges in Vorbeifahrt bei Bettingbühren in nördlicher Richtung. Marker an einer Impuls-artigen Störung

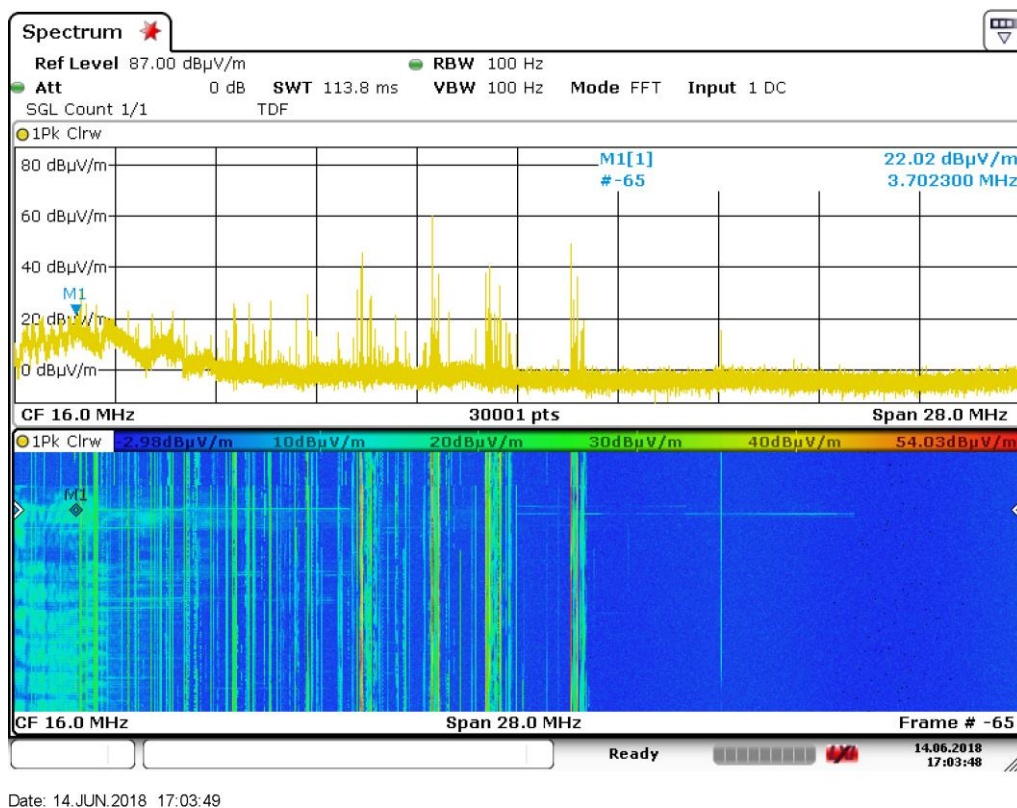


Abb. 8: Spektrogramm aus Abb. 4 eines Güterzuges in Vorbeifahrt. Marker beispielhaft an einer anderen, länger anhaltenden Störung

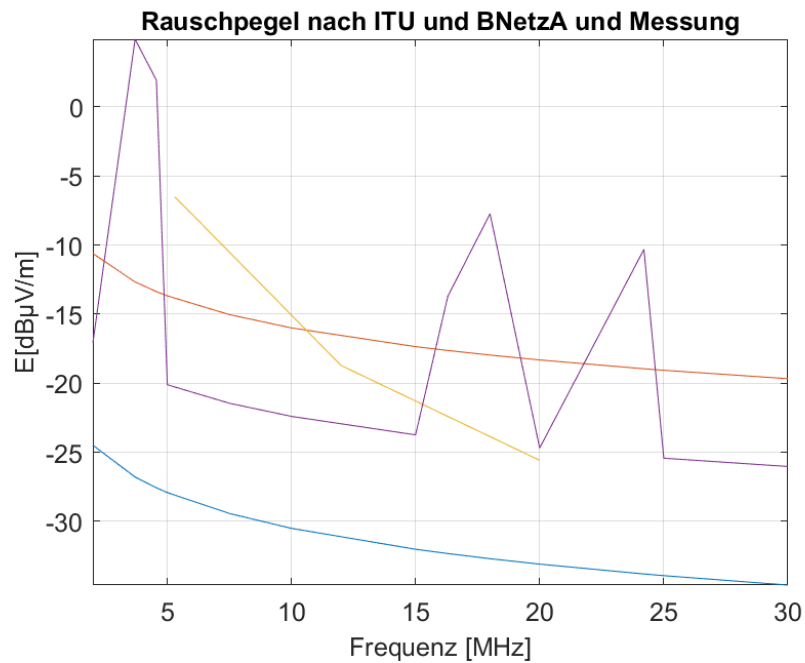


Abb. 9: Zusätzliches Rauschen durch den Güterzug am Ort der Marine-Empfangsantenne im Vergleich zu verschiedenen Annahmen des örtlichen Rauschens.

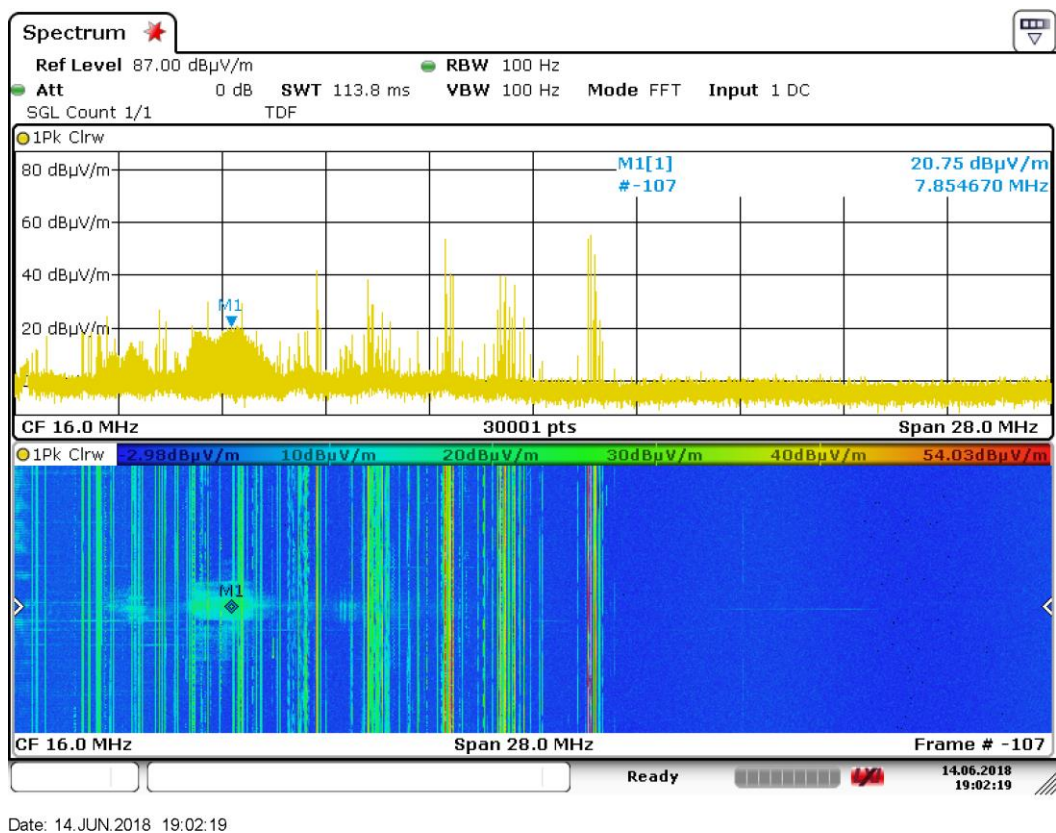


Abb. 10: Spektrogramm eines Güterzuges in Vorbeifahrt bei Bettingbühren in nördlicher Richtung. Marker an einer typischen Störung

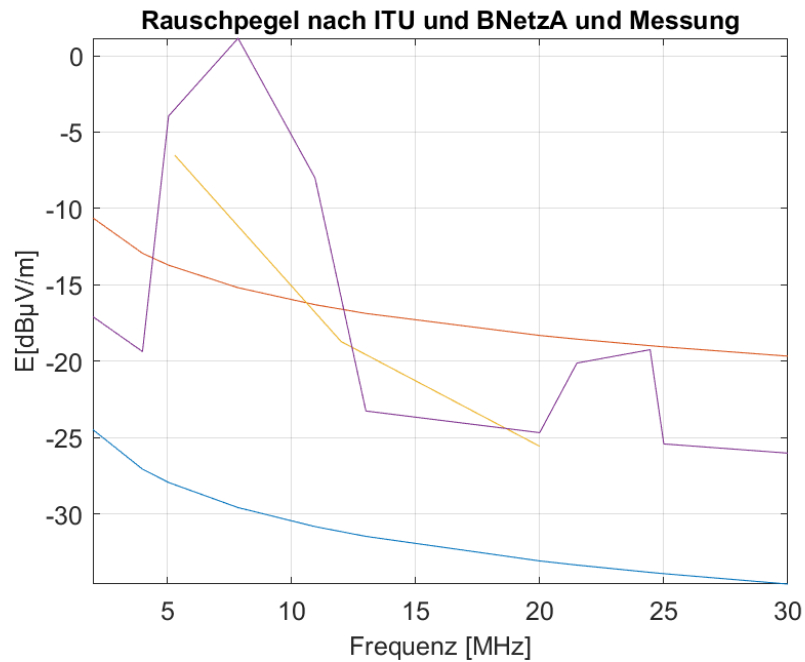


Abb. 11: Zusätzliches Rauschen durch den Güterzug am Ort der Marine-Empfangsantenne im Vergleich zu verschiedenen Annahmen des örtlichen Rauschens.

Abb. 11 zeigt, dass insbesondere bei 7.85 MHz eine Überschreitung des Außenrauschens um 16 dB gemäß rural vorliegen würde. Gegenüber der interpolierten Rauschmessung der BNetzA sind es noch 13 dB. Auch ist dies eine lang anhaltende Störung.

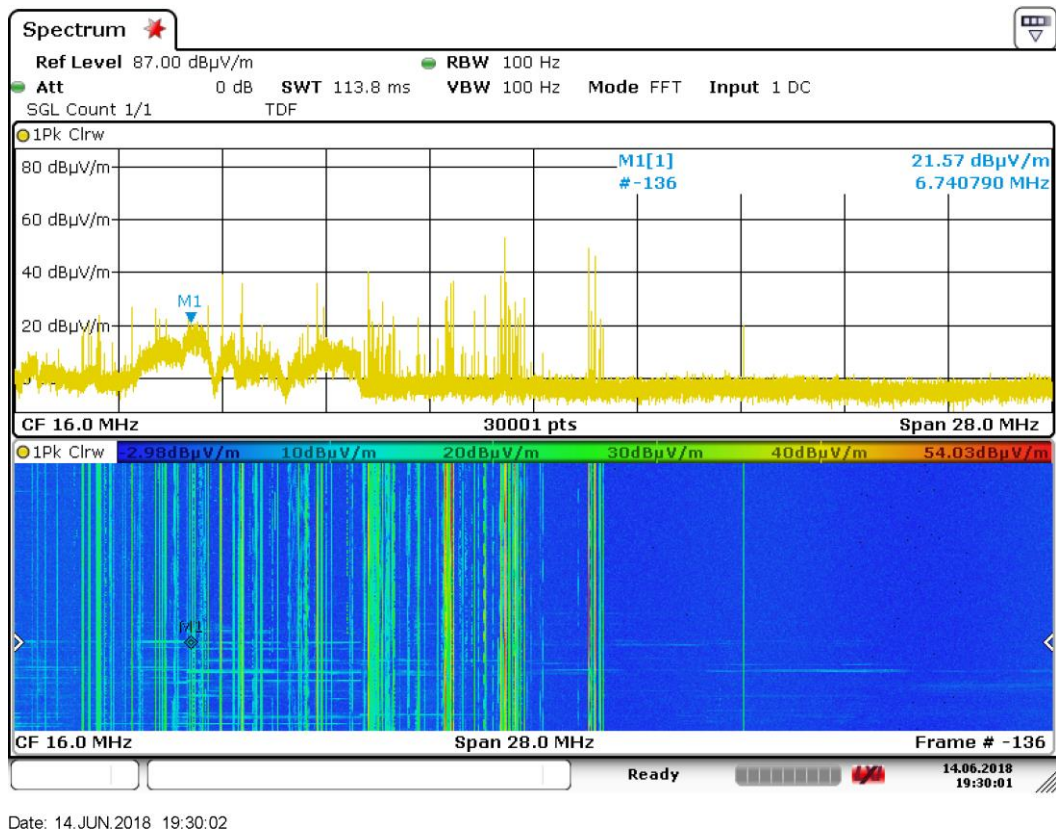


Abb. 12: Spektrogramm eines Güterzuges in Vorbeifahrt bei Bettingbühren in südlicher Richtung in eine Kurve hinein. Marker an einer Impuls-artigen Störung.

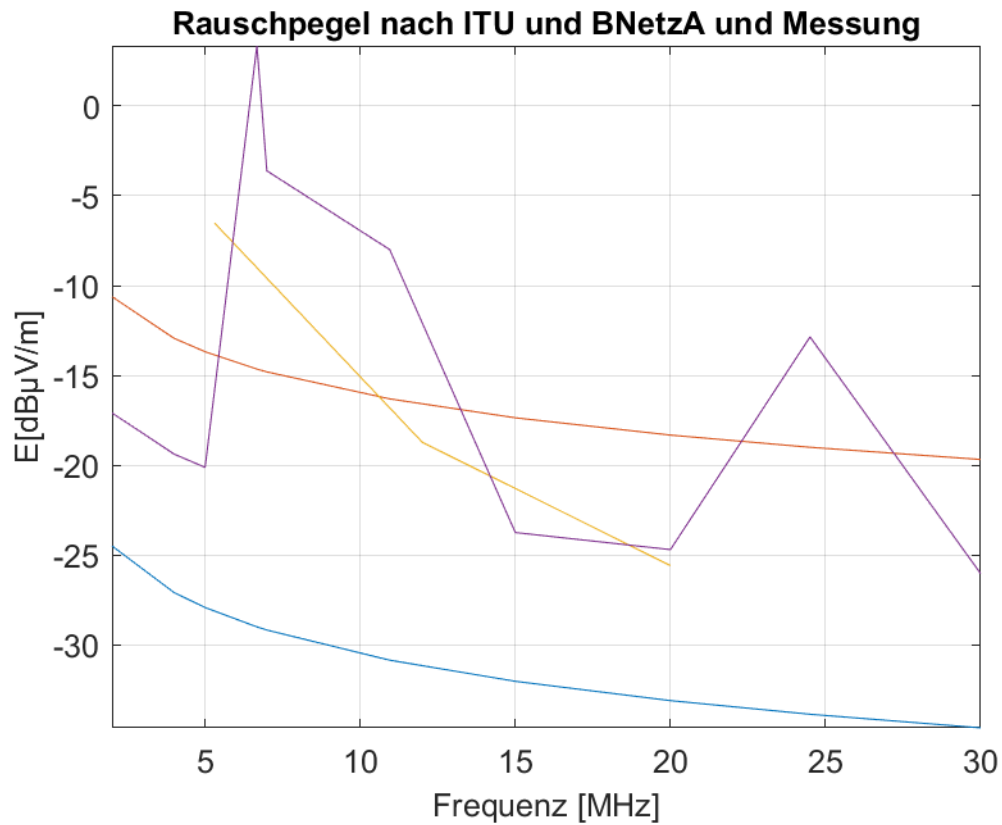
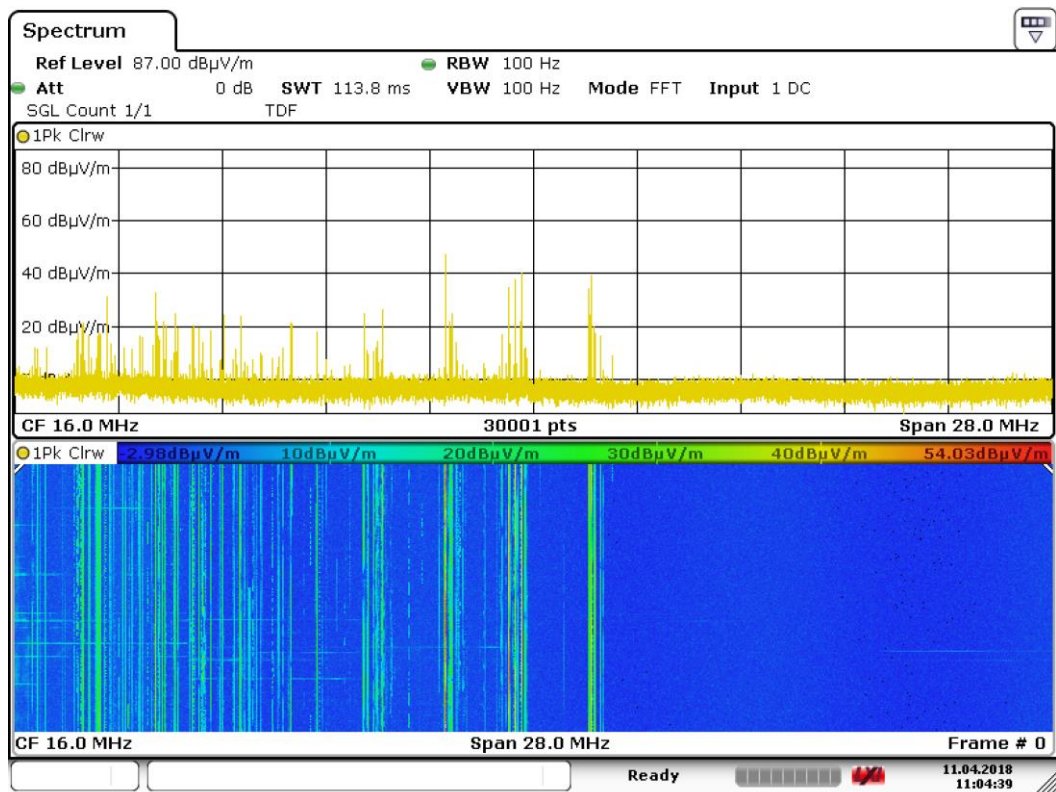


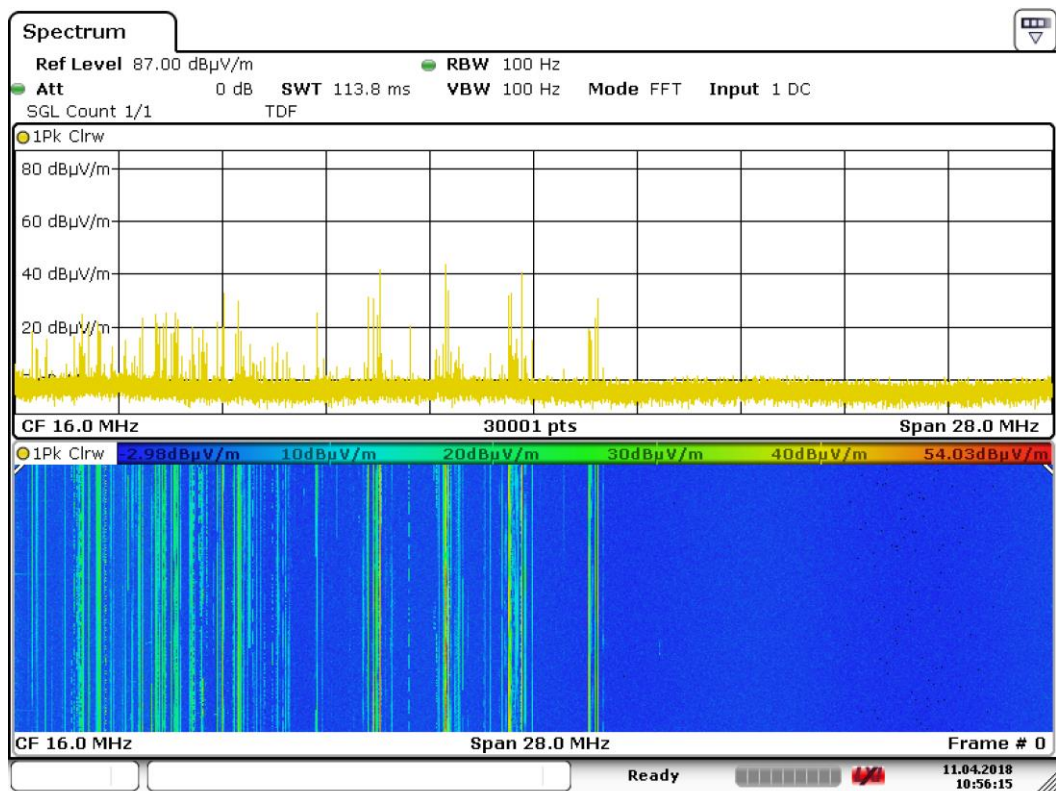
Abb. 13: Zusätzliches Rauschen durch den Güterzug am Ort der Marine-Empfangsantenne im Vergleich zu verschiedenen Annahmen des örtlichen Rauschens.

Abb. 13 zeigt die Auswertung zum Spektrogramm von Abb. 12. Eine Spitze bei 6.67 MHz ragt 18 dB über rural und 13 dB über die interpolierte BNetzA Rauschmessung hinaus. Im oberen Frequenzbereich bei 24.5 MHz ist ein zusätzliches Rauschen von 6 dB über rural zu erwarten.



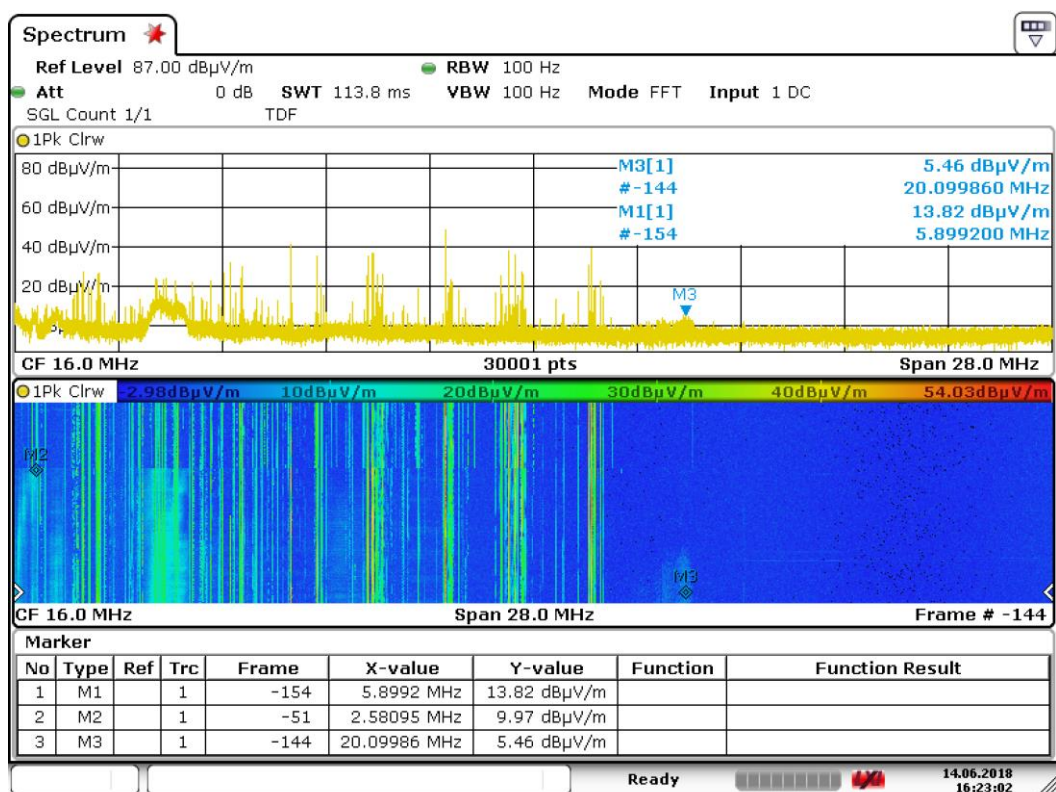
Date: 11.APR.2018 11:04:40

Abb. 14: Güterzug in Schrittgeschwindigkeit bei Leckerhörne.



Date: 11.APR.2018 10:56:16

Abb. 15: Güterzug in Schrittgeschwindigkeit bei Leckerhörne.



Date: 14.JUN.2018 16:23:03

Abb. 14: Güterzug anfahrend bei Berne im Vergleich mit Ruhespektrum (oberer Teil des Spektrogramms).

3 Skizzierung möglicher Lösungsansätze

Die Störungen sind typisch für Abstrahlungen eines Frequenzumrichters. Erfahrungen an anderen Systemen mit Frequenzumrichtern (Notstromaggregat, Windenergieanlagen WEAs) zeigen, dass der Frequenzumrichter selbst gut geschirmt werden kann und daher in diesen Systemen nicht selbst die Quelle der Abstrahlungen ist. Vielmehr ist es die angelegte Leitung, insbesondere bei WEAs sowohl die zur Erde als auch die zum speisenden System (Generator). Dafür spricht bei den Messungen der Güterzüge, dass die Störungen der unteren Frequenzbereiche schon bei großer Entfernung des Zuges messbar sind. Die Impulsstörungen bei Verlangsamung des Zuges sind wahrscheinlich auf Schaltvorgänge bei Veränderung der Frequenz (entsprechend der Veränderung der Geschwindigkeit) zurückzuführen. Mögliche Verringerung der Abstrahlung kann durch auf EMV-optimierte Konstruktion des Frequenzumrichters oder Filterung an der angeschlossenen Leitung erfolgen:

- Geringere Flankensteilheit der Rechteckspannung / längere Anstiegszeiten: Geht mit einer schlechteren Effizienz einher
- Mehr Stufen zur Erzeugung einer Sinus-ähnlichen Spannung: Verursacht meines Wissens auch höhere Verluste
- Filterung der angeschlossenen Leitungen durch Ringkerne: Ist häufig das Mittel der Wahl, wurden WEA-Projekten bereits angewendet, offenbar die Lösung mit den niedrigsten Leistungsverlusten. Störungen wurden um mindestens 10 dB verringert.

Lichtbögen können eine breitbandige Ausstrahlung aussenden. An einem Typ WEA konnte durch Veränderung eines Schleifrings der Störpegel breitbandig um 20 dB verringert werden. Die Messergebnisse deuten nicht auf eine spezielle Problematik mit Funken hin. Evtl. sind in höheren Frequenzbereichen Probleme vorhanden, die hier aber nicht Gegenstand der Untersuchungen sind. Bei Vereisung ist hingegen mit einer Funkenproblematik zu rechnen. Bei Einsatz einer Fahrdrathheizung wird dieses Problem mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht auftreten.

Da sich die Störungen auf der Oberleitung ausbreiten, würde eine häufige Ableitung durch Kondensatoren die effektive Länge der Antenne und damit die Strahlungsleistung verringern. Diese müssen hochspannungsfest sein und müssen Blitzschutzanforderungen genügen.

Der Sender Heusweiler wurde als stärkster deutscher Mittelwellensender eine Sendeleistung von 1,2 MW. Um elektromagnetische Auswirkungen auf den Autoverkehr auszuschließen, wurde auf 500 m Länge ein Stahldrahtnetz über die naheliegende A8 gespannt. Eine ähnliche Lösung ist für die Strecke bei Sengwarden denkbar. Aufgrund der großen Wellenlängen ist vermutlich eine Einhausung nötig, eine Wand bzw. Zaun wäre wahrscheinlich wegen Beugungseffekten nicht ausreichend. Es ist keine massive Bauweise notwendig, vermutlich kommt man mit einer Maschenweite von $1/10$ der kleinsten Wellenlänge (10 m bei 30 MHz), also 1 m aus. Weil der Zaun bzw. die Einhausung sich im Nahfeld der abstrahlenden Struktur befindet, ist Maschenweite jedoch noch zu überprüfen.

Eine Tieferlegung der Strecke kann helfen, den Aufwand bei der Schirmung zu verringern. Allerdings ist aufgrund von Beugungseffekten bei diesen niedrigen Frequenzen eine Tieferlegung alleine vermutlich zielführend.

Die Verlegung der Strecke außerhalb des Schutzbereichs ist eine weitere Maßnahme, die allerdings auch nicht zwingend ausreicht, um die Störungen komplett an der Empfangsantenne zu unterdrücken. Die Berechnungen der zusätzlichen Ausbreitungsdämpfung zeigen, dass diese bei 2 MHz 8.4 dB und der Höchstwert bei 20 MHz 13.7 dB beträgt (Tab. 1). Hingegen waren die gemessenen Pegel, hochgerechnet auf 900 m Abstand, bis zu 18 dB über dem Außenrauschen. 12.7 dB zusätzliche Dämpfung würde eine Verlegung der Strecke auf 2.000 m Abstand bringen.

4 Zusammenfassung

Es wurde die Abstrahlung elektrischer Güterzüge in Vorbeifahrt gemessen. Es konnte das unterschiedliche Verhalten bei verschiedenen Lastzuständen bei Vorbeifahrt über die Zeit aufgezeichnet werden. Der Abstrahlungsmechanismus ist sehr wahrscheinlich in der Regeltätigkeit des Frequenzumrichters begründet. Erfahrungen aus anderen Messungen an Windenergieanlagen und Notstromaggregaten zeigen, dass es nicht der Frequenzumrichter selbst ist, der strahlt, sondern Störungen sich auf die angeschlossene Leitung ausbreiten und dann abstrahlen. Durch die Abstrahlung über die Oberleitung sind die abgestrahlten Pegel elektrischer Züge nicht nur unmittelbar bei Vorbeifahrt erhöht, sondern über einen längeren Zeitraum. So konnten nahende Züge schon im Spektrum erkannt werden, bevor sie sichtbar waren. Die höchsten Pegel ergeben sich jedoch unmittelbar bei Vorbeifahrt, also wenig überraschend beim kleinsten Abstand.

Die Berechnung der Ausbreitungsdämpfung wurde in Simulationen mit dem Antennenberechnungsprogramm NEC-2 durchgeführt. Die Freiraumdämpfung, also die Verringerung der Feldstärke an einem Punkt im Raum nur durch die Vergrößerung der Kugeloberfläche, auf die sich die abgestrahlte Leistung während der Ausbreitung im freien Raum verteilt, beträgt 25 dB von der Messentfernung von 50 m auf die kleinste Entfernung der Züge von der Antenne in Sengwarden von 900 m 25 dB und weitere 4,4 dB, wenn man die Entfernung von 1.500 m voraussetzt. Es ist jedoch mit einer zusätzlichen Dämpfung zu rechnen, da ein Teil der Welle im Boden verläuft und dort gedämpft wird. Die zusätzliche Dämpfung steigt mit der Frequenz und der Entfernung an, bis sie $40 \cdot \log(r_1/r_2)$ beträgt, also das Doppelte der Freiraumdämpfung in dB.

Die Abstrahlung der elektrischen Züge liegt typischerweise 15-18 dB über dem Wert, der an dem Ort der Antenne eine zusätzliche Feldstärke in Höhe des Außenrauschens bewirkt. Also, wenn eine Dämpfung in dieser Höhe durch Gegenmaßnahmen erreicht wird, dann würde nach Elektrifizierung das zusätzliche Rauschen in der Höhe des mittleren angenommenen Rauschens liegen.

5 Appendix

Rev. 111. R P.368.7

7

