

Auswirkung der EMV-Anforderungen auf den Netzteilentwurf für Modellbahnsysteme

Dr.-Ing. D. Kübrich, LEMF, Universität Erlangen-Nürnberg
Prof. Dr.-Ing. M. Albach, LEMF, Universität Erlangen-Nürnberg
K. Schöllkopf, Gebr. Märklin & Cie. GmbH, Göppingen

1 Modellbahnsysteme

Klassische Modellbahnsysteme werden mittels eines Streufeldtransformators zur Netztrennung versorgt. Für Systeme mit Gleichspannung wird ein Gleichrichter zwischen dem regelbaren Trafoausgang geschaltet, für Wechselspannungssysteme entfällt dieser. Der Transformator dient gleichzeitig zur Stellung der Ausgangsspannung und damit der Fahrgeschwindigkeit sowie zur Versorgung von weiteren Lasten (Weichenantrieb, Beleuchtung). An den entsprechenden Ausgängen wird die Gleisanlage angeschlossen, auf der eine oder mehrere Lokomotiven durch Kleinmaschinen mit Bürsten angetrieben werden. Die auftretenden EMV-Störungen werden hierbei vom Strom über die Bürsten des Motors, dem Stromfluss innerhalb der Lokomotive über sich drehende Teile des Getriebes oder des Gestänges sowie dem Stromfluss über den Rad-Schiene-Kontakt erzeugt. Der Transformator selbst erzeugt, den Einfluss des Gleichrichters ausgenommen, keine EMV-Störungen. Er dient vielmehr als Filterelement zum Netz hin. Diese Rundfunkstörungen sorgen seit der Existenz des Modellbahnsystems zu Komplikationen mit dem Rundfunk im Frequenzbereich der Mittelwelle, der in Deutschland jedoch an Bedeutung verloren hat. Aus diesem Grund wurde im letzten Jahrhundert eine Messung der Funkstörspannungen am Gleis gegenüber PE mit einem Tastkopf in den EMV-Normen aufgenommen, die immer noch Bestand hat (1). In der Norm ist nicht spezifiziert, an welcher Stelle am Gleis oder auf welchem Leitungsabschnitt die Störspannung erfasst werden muss. Der Messpunkt wird vom jeweiligen Prüfer bestimmt.

1.1 Modellbahnsysteme im Analogbetrieb

Nur durch die Sonderregelung, dass Netzteile mit zwei getrennten Ausgangsspannungen nicht unter die Energieeinsparrichtlinie (2) der EU fallen, ist ein Inverkehrbringen des Streufeldtransformators derzeit noch möglich. Die in dieser Richtlinie geforderten Leerlaufverluste von $P_v \leq 0,5 \text{ W}$ sind mit einem Streufeldtransformator nicht erreichbar. Es ist somit nur eine Frage der Zeit, bis dieser ersetzt werden muss. Als einzige Alternative bleibt daher, auch für ein analoges Modellbahnsystem, die Versorgung über ein Schaltnetzteil (SNT). Netzteile in der Leistungsklasse unter 50 W werden typischerweise als Steckernetzteile ausgeführt. Die erforderliche Stellung der Fahrgeschwindigkeit übernimmt ein sogenanntes Fahrgerät (FG). Es existiert somit auf der Sekundärseite eine Verbindung mit Schutzkleinspannung vom SNT zum FG und von diesem eine weitere zum Gleisbett. Die Messung der Funkstörspannung kann auf beiden Leitungen erfolgen oder aber nur auf einer der beiden. Eine Festlegung ist nicht getroffen. Den schematischen Aufbau eines analogen Modellbahnsystems zeigt Abbildung 1. Für das analoge Modellbahnsystem lassen sich folgende mögliche Störquellen identifizieren und klassifizieren, die in der Tabelle 1 sortiert nach der Störquelle aufgeführt sind. In dieser steht NF für Störungen im Niederfrequenzbereich (Flicker, Netzharmonische), DM und CM für Gegen- und Gleichtaktstörungen auf Leitungen im Bereich bis 30 MHz und Feld für abgestrahlte Störungen.

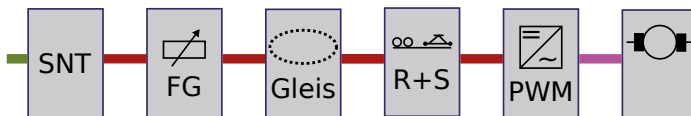


Abbildung 1: Analoges Modellbahnsystem mit Schaltnetzteil, Fahrergerät sowie der relevanten Störquellen in der fahrenden Lokomotive (grün \equiv 230 V , rot \equiv 18 V–, pink \equiv PWM).

Die Unterteilung ist jedoch keineswegs allgemeingültig sondern lediglich sehr wahrscheinlich. Im System treten manche Störungen kontinuierlich bei diskreten Frequenzen andere sehr sporadisch über einen weiten Frequenzbereich auf. Die Störungen können von der Leistungsaufnahme (P), dem Strom (I) aber auch von der Fahrgeschwindigkeit (v) und weiteren Größen abhängig sein. Eine Reduktion der Fahrgeschwindigkeit der Lokomotive ist generell mit einer Reduktion der stochastisch auftretenden Störungen verbunden. Diese ist manchmal notwendig, um die geforderten Grenzwerte einhalten zu können.

Quelle	Störart	Charakteristik	Abhängigkeit
Flyback im SNT	NF, DM, CM, Feld	kont., f-diskret	P, \dots
Rad-Schiene-Kontakt	DM, CM, Feld	stochastisch	$I, v, \text{Verschmutzung}, \dots$
Stromführung in Lok	DM, CM, (Feld)	stochastisch	$I, \text{mech. Aufbau}, \dots$
PWM-Erzeugung	DM, (CM, Feld)	kont., f-diskret	$I, (v), \dots$
Bürsten im Motor(4)	DM, CM, Feld	stochastisch	$I, \text{Motoraufbau}, \dots$

Tabelle 1: Zusammenstellung möglicher Störquellen im analogen Modellbahnsystem.

1.2 Digitales Modellbahnsystem

Die Funktionalität analoger Modellbahnen ist sehr eingeschränkt. Digital gesteuerte Systeme bieten getrennte Ansteuerbarkeit vieler Lokomotiven in einer Modellbahnanlage und eine kontinuierliche Versorgung der Lokomotiven am Gleis. Dies wird erreicht, indem das Gleis mit einer relativ niederfrequent arbeitenden PWM zwischen 10..20 kHz und einer Spannung von $\pm 18V$ umgeschaltet wird. Mittels einer geeigneten Modulation werden die Informationen auf die so entstandene Wechsellspannung modelliert. Die Kommunikation von Steuergerät zur Lokomotive oder anderen zu steuernden Teilen ist daher gewährleistet. Ein Rückkanal von der Lokomotive zum Steuergerät bedient sich einer Frequenz von 57 kHz die etwaige Filter nicht unterdrücken dürfen. Bei digitalen Modellbahnsystemen ist die Takterzeugung für das Gleisbett von der Steuereinheit getrennt, so dass weitere Verbindungsleitungen entstehen, auf denen mittels Tastkopfmesung Störspannungen gemessen werden könnten. In Abbildung 2 wird die Erweiterung deutlich. Zu den bereits vorhandenen Störquellen kommen im digitalen Modellbahnsystem weitere hinzu. Ein weiterer Flyback oder einfache DC-DC-Umsetzer zur Bereitstellung der Versorgung der Steuergeräte liefert auf der Gleichspannungsseite weitere Gegen- und Gleichtaktstörungen. Im sogenannten „Booster“ wird die PWM mittels einer hart schaltenden Vollbrücke aus MOSFETs erzeugt. Aus dem Rückkanal, der nur sehr sporadisch aktiv ist, sind keine signifikanten Störungen zu erwarten. Bedingt durch das PWM Signal am Gleis wird bei der Messung eines einzelnen Leiters der Grenzwert gegenüber PE immer überschritten. Die resultierende Abstrahlung aus dem Gleisbett wird jedoch nur durch den Gleichtaktstrom erzeugt.

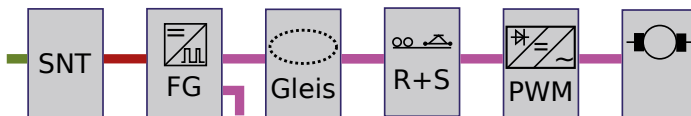


Abbildung 2: Blockschaltbild eines einfachen digitalen Modellbahnsystems.

Quelle	Störart	Charakteristik	Abhängigkeit
Konverter (DC-DC)	DM, CM, Feld	kont., f-diskret	P
PWM-Erzeugung	DM, CM, Feld	kont., f-diskret	I
Rückkanal	-	stochastisch	-

Tabelle 2: Zusammenstellung zusätzlicher Störquellen im digitalen Modellbahnsystem.

Dieser wird im Digitalbetrieb alternativ mittels einer Stromzange über die beiden Stromzuführungen erfaßt. Diese Störstrommessung dient als Ersatz für die geforderte Tastkopfmessung. Sie wird als äquivalent seitens der Prüflabore anerkannt.

1.3 Anforderungen an das Netzteil

An ein Netzteil für dieses System werden zahlreiche Anforderungen und Randbedingungen gestellt. Dies beeinflusst die möglichen Maßnahmen zur Störunterdrückung. Die für das EMV-Verhalten relevanten Anforderungen sind hier zusammengestellt:

- Sicherheitstrennung gemäß den Anforderungen an elektrisch betriebenem Spielzeug
- Verluste im Leerlauf kleiner $0,5\text{ W}$ und Mindestwirkungsgrad an vorgegebenen Lastpunkten
- Netzoberschwingungen für Leistungen größer 50 W
- Einhalten aller Grenzwerte der Störaussendung auf Leitungen und bei Abstrahlung unabhängig von der angeschlossenen Modellbahnanlage
- Anschluss über zwei Leiter ans Netz, kein PE-Anschluss aus Sicherheitsanforderung
- Als Steckernetzteil integrierbar ($P < 50\text{ W}$)

Diese Untersuchung wird für Netzteile mit einer kleinen Eingangsleistung ($P < 50\text{ W}$) durchgeführt. Diese müssen Anforderungen an Netzoberschwingungen oder Leistungsfaktor nicht erfüllen; auf eine Leistungsfaktorkorrekturstufe wird verzichtet. Für diese Spezifikation ist ein Sperrwandler die geeignete Topologie.

2 Netzteile für Modellbahnanlagen

Der Sperrwandler in den Steckernetzteilen wird mit variabler Schaltfrequenz betrieben. Dies hat Vorteile im Bezug auf Verlustleistung und zieht keine Nachteile für den Filterentwurf nach sich. Wie bei jedem Netzteil werden Gegen- und Gleichtaktstörungen (DM- und CM-Störungen) erzeugt, die im Frequenzbereich von $150\text{ kHz} \leq f \leq 30\text{ MHz}$ als leitungsgeführte Störungen

messbar sind. Gegentaktstörungen resultieren aus den für den Betrieb des Sperrwandlers notwendigen Stromverläufen. Diese lassen sich durch entsprechende Filterelemente auf der Netzseite, aber auch auf der Niederspannungsseite unter die Grenzwerte der Norm dämpfen. Sie werden im Folgenden nicht mehr näher betrachtet.

Weit anspruchsvoller ist es, die Gleichtaktstörströme im System genügend stark zu unterdrücken. Diese Art der Störströme sind auch für die abgestrahlten Störungen im Frequenzbereich $f > 30$ MHz verantwortlich; sie werden beispielsweise bei der Störleistungsmessung auf der Netzzuleitung erfasst. Für ein Netzteil sind Maßnahmen zur Unterdrückung der Gleichtaktstörströme bekannt (3). Es werden Y-Kondensatoren zwischen Primär- und Sekundärseite sowie stromkompensierte Drosseln in der Netzzuleitung eingesetzt. Der Wert der Y-Kondensatoren ist durch den zulässigen Ableitstrom nach oben begrenzt. Das Vorgehen zur Entstörung des Netzteils berücksichtigt jedoch nicht weitere Störquellen auf der Niederspannungsseite sowie die Grenzwerte auf der Sekundärseite. Das Netzteil stellt für die von außen erzeugten Gleichtaktströme die einzige Verbindung - von parasitären Kapazitäten abgesehen - zwischen der Störquelle und den Netzaußenleitern und damit über die Netzimpedanz zum Potential PE dar. Gegenüber diesem Potential werden die hochfrequenten Spannungen $u_{TK,\nu}$ gemessen. Das Netzteil muss daher eine definierte möglichst kleine Impedanz für diese Störströme zum Netz hin darstellen. Eine mögliche Filterstruktur, die zum Erfolg führen könnte, ist in Abbildung 3 als Blockschaltbild dargestellt. In Abbildung 3 ist das Netzteil zwischen den linken beiden Klemm-

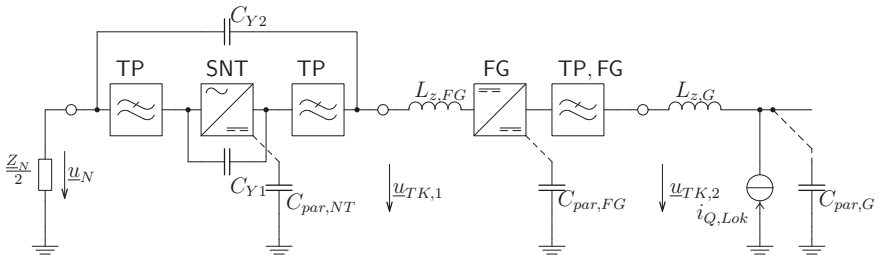


Abbildung 3: Prinzipschaltbild aus konzentrierten Elementen zur Erläuterung der Gleichtaktstörungen einer Modellbahnanlage mit SNT und FG. Die fahrende Lok als Störquelle wird als Stromquelle $i_{Q,Lok}$ dargestellt.

punkten dargestellt. Das Schaltnetzteil beinhaltet zwei Tiefpässe realisiert als stromkompensierte Drosseln, sowie einen Y-Kondensator C_{Y1} . Der Kondensator C_{Y2} soll eine definierte Impedanz zum Netz hin darstellen. Vom Netzteil selbst zur unendlich fernen Hülle liefert eine Kapazität von wenigen pF, in der gleichen Größenordnung liegt die Kapazität des Fahrgeräts $C_{par,FG}$. Die Kapazität des Gleises zur Umgebung kann anhand einer Ersatzanordnung durch Simulation gewonnen werden. Es wird von einem leitfähiger Kreisring mit einer Weite von 4 cm, einer Höhe von 1 cm und einen Radius von $R_1 = 0,36$ m ausgegangen. Das resultierende 2D-Problem ist rotationssymmetrisch, seine Kapazität zu einer leitfähigen Hülle mit einem Radius zwischen $1 \text{ m} \leq R_H \leq 10 \text{ m}$ liegt zwischen $24,6 \text{ pF} \geq C_{par,G} \geq 16,5 \text{ pF}$. Für große Modellbahnanlagen aber auch für das Gleismaterial in Startpackungen kann diese Kapazität deutlich größer werden.

Die Induktivitäten der Leitungen resultieren aus deren Länge und der Lage bei der Messung. Als grober Richtwert kann $1 \frac{\mu\text{H}}{\text{m}}$ angenommen werden. Im Betrieb bewegt sich die Lokomotive auf dem Gleis. Die Störquelle ändert daher ständig die Position und mit ihr die effektive Induktivität $L_{z,G}$. Mit dem Ersatznetzwerk in Abbildung 3, das nur gültig ist, falls Wellenausbreitung

vernachlässigt werden kann, können aus Simulation dieses Ersatznetzwerk erste Erkenntnisse gewonnen werden. Zunächst soll jedoch ermittelt werden, welcher Wert des Kondensators C_{Y2} über dem Netzteil erforderlich ist. Zu dieser Berechnung werden zunächst alle Induktivitäten zu Null gesetzt und der Einfluss der Kapazitäten nach PE vernachlässigt. Es wird weiterhin davon ausgegangen, dass Störströme nur am Gleis erzeugt werden, das Netzteil trägt nicht zum Störstrom bei. Bei den Stromamplituden in Abbildung 4 links wird der Grenzwerte der Norm (1) auf der Netzseite und der für die Messung mit dem Tastkopf erreicht. Die Netzimpedanz hat den in der Norm CISPR 16-1-2 geforderten Frequenzgang, der Tastkopf eine Impedanz von $1,5\text{ k}\Omega$. Es wird über der Frequenz ein Kondensator $C_{Y2,min}$ bestimmt der für die Ableitung des Gleichtaktstörstroms erforderlich ist. Sein minimaler Kapazitätswert ist in Abbildung 4 rechts dargestellt. Auf der linken Seite ist der maximal beherrschbare Störstrom aus der Quelle $i_{Q, Lok}$ zu sehen. Um bei niedriger Frequenz den Störstrom ins Netz abzuleiten, müsste der

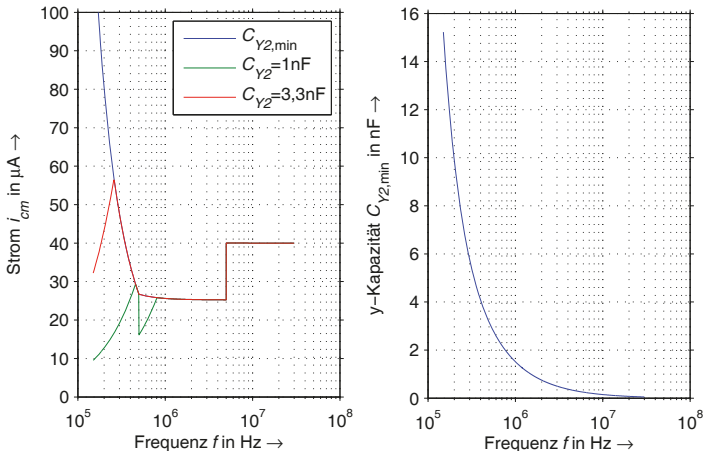


Abbildung 4: Maximal zulässiger Störstrom $i_{Q, Lok}$ in Abhängigkeit des Kondensators C_{Y2} und Kapazitätswert dieses Kondensators für bestmögliche Gleichtaktstörstromableitung in die Netzanschlüsse.

Y-Kondensator Werte annehmen, die Sicherheitsvorschriften nicht zulassen. Mit eine Kondensator von $C_{Y2} = 3,3\text{ nF}$ kann aber ab etwa $f > 300\text{ kHz}$ der maximal mögliche Strom bereits abgeleitet werden. Generell sind kontinuierliche Störströme mit einer Amplitude größer als etwa $40\text{ }\mu\text{A}$ nicht unterdrückbar.

Wird der Kondensator eingebaut, so entsteht mit den bisher vernachlässigten Induktivitäten und den parasitären Kapazitäten ein Schwingkreis, der nur wenig gedämpft ist. es gilt für den Kondensator $C_{Y2} \gg \sum C_{par}$. Er kann als Kurzschluss angesehen werden. Für eine angenommene Leitungsinduktivität von $L_{z, ges} = 5\text{ }\mu\text{H}$ und bei einer Kapazität von $C'_{par, ges} = 50\text{ pF}$ resultiert eine Frequenz f_r

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{z, ges}C_{par, ges}}} = 10\text{ MHz}, \quad (1)$$

die im Frequenzbereich der leitungsgeführten Störungen liegt. Diese Resonanzfrequenz muss durch eine zusätzliche große Induktivität einer stromkompensierten Drossel hin zu niederen

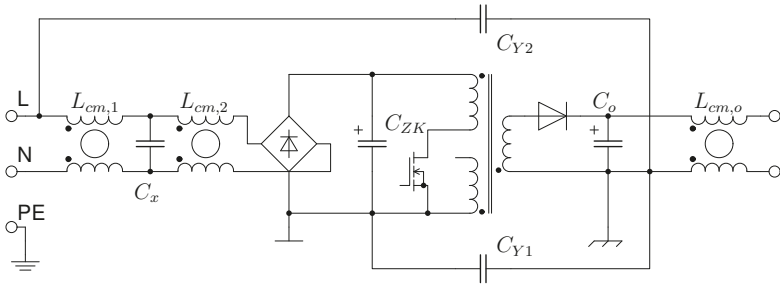


Abbildung 5: Reduziertes Schaltbild des Netzteils mit 18VA mit idealen Filterelementen.

Frequenzen verschoben und gleichzeitig gedämpft werden. Hier kann beispielsweise die Ausgangsdrossel im Netzteil verwendet werden. Ein Netzteil hat daher das in Abbildung 5 dargestellte Ersatznetzwerk. Das Filter besteht auf der Netzseite für DM-Störungen aus den Streuinduktivitäten der beiden unterschiedlichen stromkompensierten Drosseln $L_{cm,1}$ und $L_{cm,2}$, dem Kondensator C_X und dem Kondensator C_{ZK} . Für Gleichtaktstörungen wirken die Serienschaltung von $L_{cm,1}$ und $L_{cm,2}$ als ein Filterelement. Zusammen mit dem Kondensator C_{Y1} entsteht ein zweistufiges Filter, das jedoch vom Kondensator C_{Y2} überbrückt wird. Es gilt eine Balance der beiden Kondensatorwerte zu finden, die zu einer genügend hohen Unterdrückung der Störaussendung aus dem Netzteil führt, aber auch eine genügend hohe Ableitung der Störströme der fahrenden Lok ermöglicht. Der Anschluss PE ist eigentlich der ausgezeichnete Punkt, der für die Ableitung der Ströme verwendet werden sollte. Dieser darf jedoch nicht im Stecker-Netzteil kontaktiert werden. Die Induktivität des Kondensators C_{Y2} , der vom Netzanschluss zum Ausgang eingebaut wird, erreicht Werte größer als 100 nH was in einer Serienresonanz im betrachteten Frequenzbereich resultiert. Störungen des Schaltnetzteils werden dann über das Filter hinweg ins Netz geleitet. Der Abgleich der beiden Kondensatoren wird letztendlich empirisch gefunden. Notwendig sind beide, wie die Messergebnisse in Abbildung 6 zeigen. Es werden die Störspannung aufgrund des Gleichtaktstroms (5) ins Netz und die Spannung $U_{TK,1}$ bei ohmscher Belastung des Netzteils erfaßt. Nur mit beiden Kondensatoren in der Schaltung sind die Grenzwerte einzuhalten. Das Netzteil muss im Hinblick auf die intern erzeugten Gleichtaktstörungen optimiert werden. Hierzu wird eine Schirmwicklung im Transformator und eine passive Kompensation der Störströme zur Niederspannungsseite mittels eines zusätzlichen kleinen Y-Kondensators an geeigneter Stelle eingebaut. Es kann dadurch eine Reduktion der Störströme erreicht werden. Zusätzlich wird die Fläche des Drainanschlusses auf der Leiterplatte so weit wie möglich reduziert. Alle diese Maßnahmen sind nicht notwendig um die Normgrenzwerte einzuhalten, sondern um genügend Freiheitsgrade zu haben, Maßnahmen zum Vermindern der Auswirkung der Störströme der fahrenden Lokomotive zu ergreifen. Das so modifizierte Netzteil erreicht zusammen mit den Filterelementen jedoch nicht die inhärente Filtereigenschaft eines Streufeldtransformators.

Ein Vergleich des angepassten und optimierten Schaltnetzteils mit Standardnetzteilen der gleichen Leistungsklasse bei ohmscher Belastung zeigt Abbildung 7. Das Industrienetzteil und das Computernetzteil erfüllen Tastkopfmessung bei ohmscher Last bereits nicht. Sie können aus EMV-Sicht nicht für Modellbahnen verwendet werden. Auch Seilssysteme für Niederspannungsleuchten erfüllen diese Anforderungen im Allgemeinen nicht.

Wird jedoch selbst mit dem modifiziertem Netzteil an anderer Stelle in der Modellbahnanlage

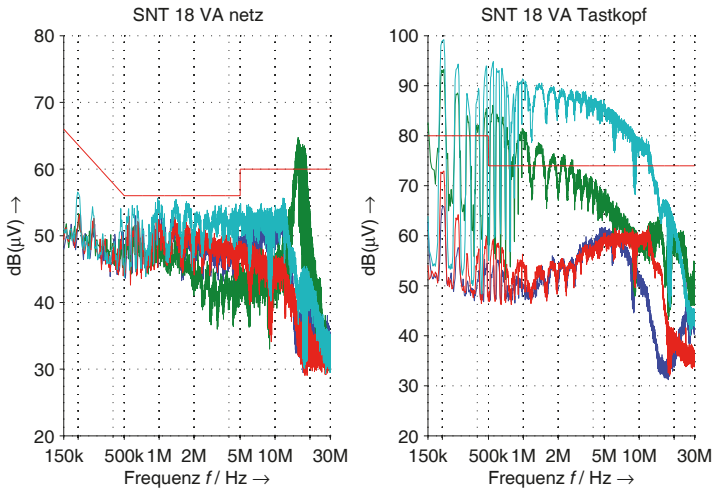


Abbildung 6: Messung der Gleichtaktanteile der leitungsgeführten Störungen am Netz und der Störspannung mittels Tastkopf. (Blau $\equiv C_{Y1} = 470 \text{ pF}$ und $C_{Y2} = 3,3 \text{ nF}$; grün \equiv nur $C_{Y1} = 470 \text{ pF}$; rot \equiv nur $C_{Y2} = 3,3 \text{ nF}$; türkis \equiv kein Y-Kondensator).

ge mit dem Tastkopf gemessen, so ist es durchaus denkbar, dass die Störspannung dort den Grenzwert überschreitet. Der Ausgang des Schaltnetzteils und der Ausgang des analogen Fahrreglers unterscheiden sich bereits deutlich. Dies ist der verteilten Induktivität und der verteilten Kapazität im Aufbau geschuldet.

3 Zusammenfassung

Beim Entwurf eines Netzteils für Modellbahnsysteme sind interne und externe Störquellen für Gleichtaktströme zu berücksichtigen. Die externen Gleichtaktströme lassen sich nur durch Y-Kondensatoren zu den Netzanschlüssen ableiten und erhöhen so die Störpegel an den Netzanschlüssen. Damit es überhaupt gelingen kann, müssen interne Störquellen hinreichend kleine Störströme liefern. Es sind alle Regeln des EMV-gerechten Netzteilentwurfs anzuwenden. Trotzdem gelingt es nicht für jede beliebige Kombination von Modellbahnanlage und Lokomotive, die Grenzwerte der leitungsgeführten Störungen einzuhalten. Inwieweit die Normgrenzwerte bei von der Ausdehnung unbegrenzten Modellbahnanlagen von Kunden eingehalten werden, kann nicht in Erfahrung gebracht werden. Messungen finden dort nicht statt. Das Vorhandensein einer PE-Verbindung erleichtert die Auslegung des Systems maßgeblich und stellt weniger Störprobleme auch bei Kundenanlagen sicher.

Literatur

- [1] Elektromagnetische Verträglichkeit - Anforderungen an Haushaltsgeräte, Elektrowerkzeuge und ähnliche Elektrogeräte - Teil 1: Störaussendung (CISPR 14-1:2005 + A1:2008 + Cor.:2009 + A2:2011), Mai 2012.

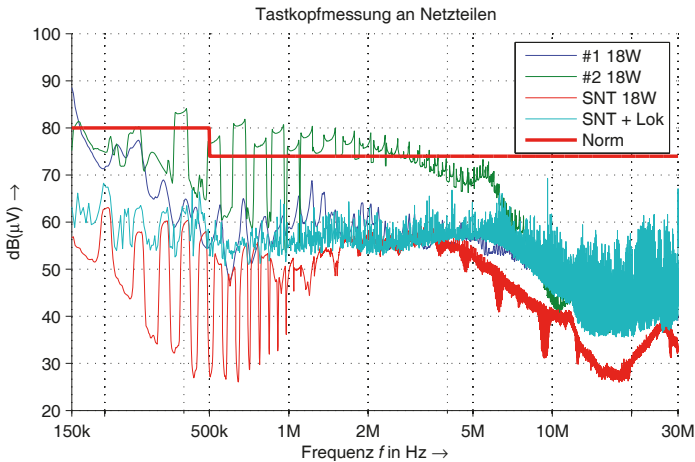


Abbildung 7: Störspannungsmessung auf der Ausgangsseite an Netzteilen für Computer oder Industrie (#1, #2) bei ohmscher Belastung im Vergleich zu modifiziertem Netzteil für Modellbahnsysteme.

- [2] Die Kommission der Europäischen Gemeinschaften. Verordnung (EG) Nr. 278/2009 der Kommission vom 6. April 2009 zur Durchführung der Richtlinie 2005/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Ökodesign-Anforderungen an die Leistungsaufnahme externer Netzteile bei Nulllast sowie ihre durchschnittliche Effizienz im Betrieb, Apr. 2009.
- [3] Jasper Goedbloed. *Electromagnetic Compatibility*. Kluwer Technische Boeken B.V., 1990.
- [4] R. E. Hellmund and L. R. Ludwig. Sparking under brushes of commutator machines. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 54(3):315–321, 1935.
- [5] Jürgen Stahl, Daniel Kübrich, and Thomas Dürbaum. Characterisation of an effective EMI noise separation including a standard LISN. In *URSI Int Electromagnetic Theory (EMTS) Symp*, pages 13–16, 2010.