

Inhalt

Vorwort	5
1 Einleitung: Elektrische Kleinantriebe im täglichen Einsatz ..	11
2 Herausforderung EMV	13
2.1 Störquellen in elektrischen Antrieben	14
2.2 Zusammenfassung der Frequenzanteile	17
2.3 Von der Funkentstörung zur EMV	18
3 CE-Zertifizierung	21
3.1 EU-Richtlinien für den Betrieb von elektrischen Kleinantrieben	22
3.1.1 <i>Maschinenrichtlinie</i>	22
3.1.2 <i>EMV-Richtlinie</i>	23
3.1.3 <i>Niederspannungsrichtlinie</i>	24
3.2 Anwendbarkeit der Richtlinien	24
3.3 Relevante Normen	25
3.3.1 <i>IEC EN 61000-6-x</i>	26
3.3.2 <i>IEC EN 61800-3</i>	26
3.3.3 <i>EN 55014</i>	27
3.3.4 <i>EN 55011</i>	28
3.3.5 <i>IEC EN 61800-5-2</i>	28
3.4 Zusammenfassung	28
4 Störaussendung von Geräten	31
4.1 Leitungsgebundene Störungen	31
4.2 Koppelpfade für elektromagnetische Störgrößen	32
4.2.1 <i>Direkte galvanische Kopplung</i>	32
4.2.2 <i>Kapazitive Kopplungen</i>	33

4.2.3 Induktive Kopplungen	34
4.3 Messverfahren für leitungsgebundene Störungen	34
4.3.1 Messung der Störspannung im Frequenzbereich von 150 kHz ... 30 MHz	35
4.3.2 Messung der Störleistung im Frequenzbereich von 30 MHz ... 300 MHz	36
4.4 Messverfahren für Funkstörungen	37
4.5 Typische Messergebnisse	39
4.5.1 Leitungsgebundene Störung – Störspannungsmessung	40
4.5.2 Gestrahlte Störung – Störleistungsmessung	42
4.5.3 Gestrahlte Störung – Störfeldstärkemessung	42
5 Störsignale in geregelten Antrieben	47
5.1 Störverhalten eines DC-DC-Wandlers	47
5.2 Störverhalten eines Motorcontrollers	51
6 Begrenzung der Störaussendung	54
6.1 Ausbreitungswege der unterschiedlichen Störgrößen	54
6.1.1 Symmetrische Gegentaktstörungen durch Gegentakt- signale	54
6.1.2 Asymmetrische Gleichtaktstörungen durch Gleichtakt- signale	55
6.1.3 Funkausbreitung	56
6.2 Maßnahmen zur Begrenzung der Störaussendung	56
6.3 Erdung und Schirmung	57
6.4 Leitungsführung	59
6.5 Filter	62
6.5.1 HF-Sperrfilter (Ausgangsseite)	62
6.5.2 PWM-Filter (Ausgangsseite)	64
6.5.3 Störspannungsfiler (Eingangsseite)	65
Anteile von Eingangsfiltern	66
Kombinierte Filter	68
6.6 Messergebnisse zur Störaussendung	70
6.6.1 Störfeldstärkemessung	70
6.6.2 Störspannungsmessung	75

7	Störfestigkeit von Geräten	78
7.1	Akzeptanzkriterien für elektrische Kleinantriebe	78
7.2	Effekte	80
7.2.1	<i>Störfestigkeit gegen Entladung statischer Elektrizität (ESD) nach IEC 61000-4-2</i>	80
7.2.2	<i>Störfestigkeit gegen hochfrequente elektromagnetische Felder nach IEC 61000-4-3</i>	81
7.2.3	<i>Störfestigkeit gegen schnelle transiente elektrische Störgrößen (Burst) nach IEC 61000-4-4</i>	81
7.2.4	<i>Störfestigkeit gegen Stoßspannungen (Surge) nach IEC 61000-4-5</i>	82
7.2.5	<i>Störfestigkeit gegen leitungsgeführte HF-Gleichtaktstörungen nach IEC 61000-4-6</i>	83
7.2.6	<i>Störfestigkeit gegen Magnetfelder mit energietechnischen Frequenzen nach IEC 61000-4-8</i>	85
7.2.7	<i>Störfestigkeit gegen Spannungseinbrüche, Kurzzeitunterbrechungen und Spannungsschwankungen nach IEC 61000-4-11</i>	85
7.2.8	<i>Überspannung im dynamischen Antriebsbetrieb</i>	85
7.3	Maßnahmen zur Erhöhung der Störfestigkeit von elektrischen Kleinantrieben	87
7.3.1	<i>Schutzmaßnahmen gegen transiente Überspannung</i>	87
7.3.2	<i>Robustheit gegen leitungsgeführte HF-Störungen</i>	89
7.3.3	<i>Schutz gegen elektromagnetische Felder</i>	89
8	EMV-Maßnahmen bei Kleinantrieben	91
8.1	Integrierte Motorregler	91
8.2	Antriebssysteme mit extern verbautem Motorcontroller	93
8.3	Encoder in elektrischen Kleinantrieben	94
8.3.1	<i>Störaussendung von Encodern</i>	94
8.3.2	<i>Störfestigkeit von Encodern</i>	95
9	Ergänzende Maßnahmen zur Erhöhung der Robustheit	97
9.1	Codierung	97
9.2	Komplementärsignale (Linedriver)	99
9.3	Robustheit unterschiedlicher Schnittstellen	100

Literatur.....	102
Abbildungsverzeichnis.....	104
Sachregister.....	108

1 Einleitung: Elektrische Kleinantriebe im täglichen Einsatz

Elektrische Kleinantriebe gibt es inzwischen in vielfältigen Anwendungsgebieten. Im Haushalt werden neben den klassischen am Netz betriebenen Küchengeräten unterschiedlichste batteriebetriebene Geräte mit eingebauten Elektromotoren verwendet, vom Saugroboter über motorisch betriebene Heizungsventile bis zum Milchaufschäumer. Etwas weniger sichtbar sind elektrische Kleinantriebe im täglichen Arbeitseinsatz in optischen Geräten, in der Laborautomatisierung oder im Sondermaschinenbau. Je nach Leistungsklasse kommen unterschiedliche Motoren und Elektronik zum Einsatz [1].

Bei den batteriebetriebenen Geräten werden typischerweise einfache DC-Motoren verbaut. Die Steuerung reicht vom einfachen Schalter bis zur



Abb. 1.1 FAULHABER-Demonstrator eines Pick & Place-Systems mit kompakter Lineareinheit und BLDC-Linearmotor

vollständigen elektronischen Positionsregelung, die Betriebsspannung liegt durch den Batteriebetrieb in der Regel bei unter 30 V.

Eine ähnliche Entwicklung ist auch bei Elektromotoren mit externer Stromversorgung und jenseits des Consumerbereichs zu beobachten. Kompakte Stellantriebe, z. T. mit direkt eingebauter Regelelektronik finden vielfältige Anwendungen in Technik und Industrie. Ein Beispiel zeigt Abb. 1.1.

Verwendet werden auch hier DC-Motoren mit und ohne Regelelektronik. Gerade für dynamische Positionieraufgaben werden jedoch inzwischen oft elektronisch kommutierte BLDC-Motoren eingesetzt. Servoantriebe mit Leistungen bis zu einigen 100 W werden dabei typischerweise an einer DC-Kleinspannungsversorgung betrieben, d. h. mit maximal 70 V Gleichspannung.

In der Automatisierungstechnik können mehrere Komponenten an einer gemeinsamen Kleinspannung betrieben werden, es handelt sich dann um eine DC-Netz-Anwendung mit typischen Nennausgangsspannungen von entweder 24 V DC oder – bei höherem Leistungsbedarf – 48 V DC.

Zusätzlich zum Motor sind dann eine Regelelektronik, ein Positionsgeber und weitere Filter verbaut. Reine DC-Motoren werden z. T. auch ohne Regelung direkt am Netzteil betrieben.

2 Herausforderung EMV

In Systemen mit elektrischen Kleinantrieben wird die elektrische Energie z. T. mehrfach umgeformt. Dabei treten elektrische Wechselgrößen als Spannungen und Ströme mit sehr unterschiedlichen Frequenzen auf. Die möglichen Störquellen, die dabei auftreten, werden in Abschnitt 2.1 erläutert. Abb. 2.1 zeigt den Gesamtaufbau eines geregelten Antriebssystems inklusive Versorgungsnetz. Die auf diesen Aufbau zurückzuführenden in Abschnitt 2.1 benannten Störungen sind dort über die Referenznummern eingetragen.

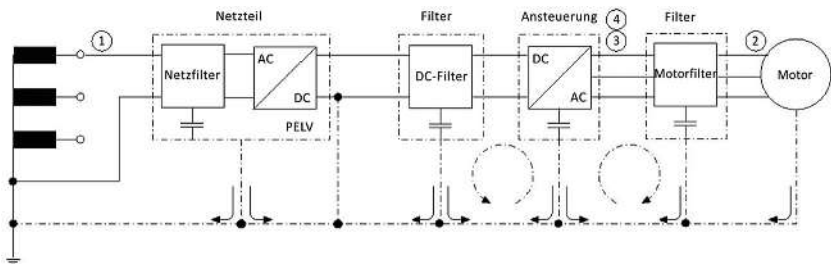


Abb. 2.1 Blockschaltbild eines geregelten Motors und der Störpfade, Erläuterung der Nummerierungen im Text

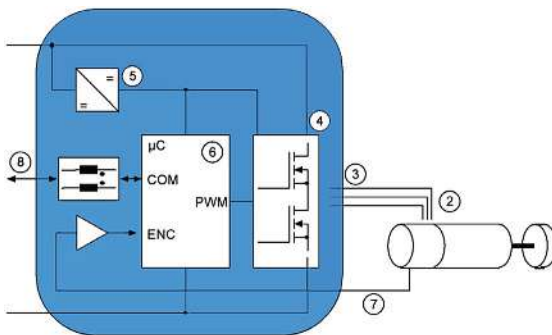


Abb. 2.2 Blockschaltbild eines geregelten Antriebes mit den identifizierten Störquellen, Erläuterung der Nummerierung im Text

Abb. 2.2 zeigt die Störquellen im Antriebsregler selbst, dort finden sich die weiteren Referenznummern zu Abschnitt 2.1.

2.1 Störquellen in elektrischen Antrieben

In Abb. 2.1 und 2.2 sind die Störquellen mit Referenznummern markiert, hier folgen genauere Erläuterungen.

① Netzspannung

Sinusförmige Spannungen mit 50 Hz ... 60 Hz oder höher in Sondernetzen

② Motorströme

Bei BLDC-Motoren mit sinusförmiger Ansteuerung liegen die Grundschwingungen der Motorströme bei bis zu 1 kHz für einen 4-pol Motor bei 30 000 min⁻¹. Zusätzlich treten je nach Ansteuerung energiereiche Oberschwingungen bis in den 100-kHz-Bereich auf. Bei DC-Motoren und BLDC-Motoren mit Blockkommutierung ergibt sich zusätzlich ein pulsierender Motorstrom mit einer Kommutierungsfrequenz, die Vielfaches der Motorgeschwindigkeit ist. Bei DC-Motoren hängt die Kommutierungsfrequenz von der Teiligkeit des Kollektors ab, bei BLDC-Motoren von der Polpaarzahl des Motors.

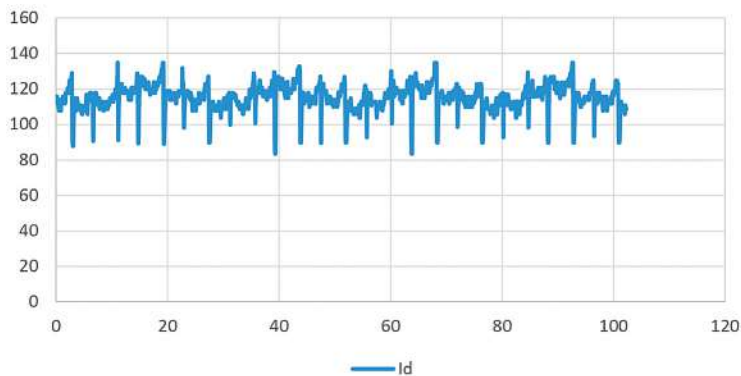


Abb. 2.3 Zuleitungsstrom I_d eines BLDC-Motors

Bei DC-Motoren treten über die mechanische Kommutierung z. T. Funken am Kommutator auf. Das Frequenzspektrum dieser Motoren ist sehr breit und reicht dadurch bis deutlich in den MHz-Bereich. Einen typischen Zuleitungsstrom eines BLDC-Motors mit Blockkommutierung zeigt Abb. 2.3. Für einen DC-Motor ergäbe sich ein vergleichbarer Verlauf, jedoch mit ungerader Teiligkeit.

③ Getaktete Endstufe

Über eine mit Pulsweitenmodulation (PWM) betriebene Endstufe wird aus der DC-Versorgung die Motorspannung generiert. Die Schaltfrequenz der PWM muss für Motoren mit eisenloser Wicklung vergleichsweise hoch gewählt werden, da deren elektrische Zeitkonstanten mit ca. $50 \mu\text{s} \dots 200 \mu\text{s}$ um mindestens eine Größenordnung unter derjenigen üblicher eisenbehafteter Wicklungen liegt. Typische PWM-Frequenzen liegen hier bei $50 \text{ kHz} \dots 100 \text{ kHz}$, um keine unnötigen PWM-bedingten Verluste in den Motoren zu erzeugen. Die relevanten Oberschwingungen reichen bis in den unteren MHz-Bereich und nehmen mit 20 dB pro Dekade der Frequenz ab.

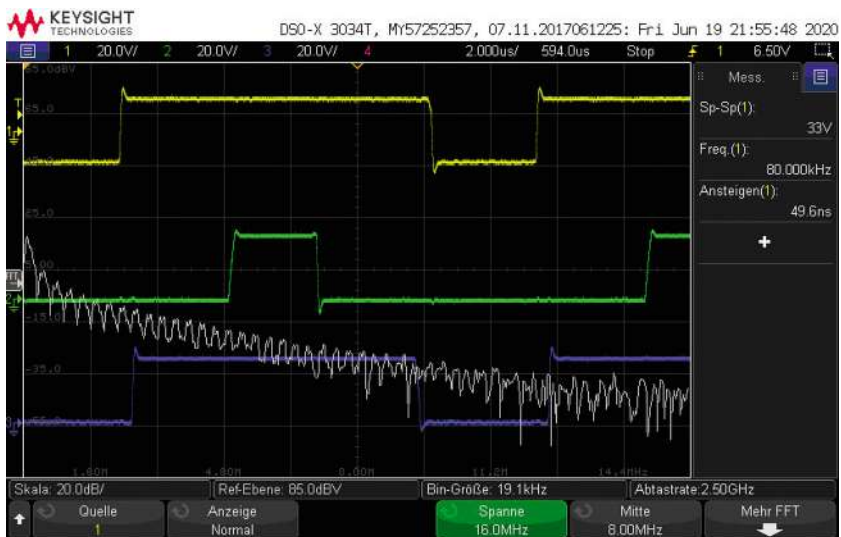


Abb. 2.4 Ausgangsspannung $U_A \dots U_C$ eines Antriebsreglers bei 80 kHz Schaltfrequenz und FFT des Ausgangssignals über einen Frequenzbereich von 16 MHz , Dämpfungsskala 20 dB/ .

④ Umschaltvorgänge in der Endstufe

An jeder Schaltflanke der Endstufen werden kapazitive Lasten umgeladen. Das sind einerseits die Gate-Ladungen der MOSFETs, andererseits deren parasitäre Drain-Source-Kondensatoren sowie die kapazitiven Leitungsbeläge der Motorleitungen. Im Umschaltunkt können dabei für kurze Zeit sehr hohe Spitzenströme fließen. An Endstufen auf Basis von Si-MOSFETs sind die Schaltvorgänge nach 5 ns ... 50 ns abgeschlossen. Die energiereichen Anteile dieser Signale gehen daher bis in den 100-MHz-Bereich. An den Umschaltpunkten ergeben sich zusätzlich hochfrequente Einschwingvorgänge auf den Motorausgangsspannungen im unteren MHz-Bereich.

In Abb. 2.4 weisen die Ausgangsspannungen einen Spitze-Spitze-Wert von 33 V auf, bei 24 V Versorgung. Die Differenz ergibt sich aus den Einschwingvorgängen an jeder Schaltflanke. In Abb. 2.5 sind die benannten Einschwingvorgänge auf den Phasen gut zu erkennen.

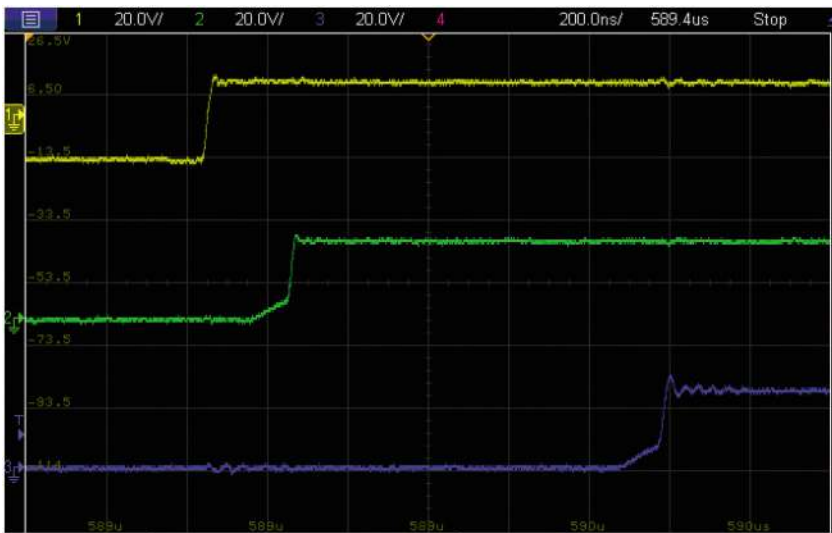


Abb. 2.5 Steigende Flanken in den drei Phasen eines Antriebsreglers mit erkennbaren Einschwingvorgängen im 40-Mhz-Bereich

⑤ Taktfrequenz der internen DC/DC-Wandler

Die internen DC/DC-Wandler der Regelelektronik werden mit Schaltfrequenzen zwischen mehreren 100 kHz und ca. 2 MHz betrieben. Auch hier reichen die energiereichen Oberschwingungen bis in den MHz-Bereich.

⑥ Taktfrequenz der Prozessoren

Antriebsregler bei elektrischen Kleinantrieben werden typischerweise über μ Controller mit integriertem Flash-Speicher für das Programm realisiert. Deren Taktfrequenzen liegen – bedingt durch die begrenzte Flash-Geschwindigkeit – im Bereich zwischen 16 MHz und 200 MHz.

⑦ Taktfrequenz von Positionssensoren

Positionsgebersysteme mit Inkremental- oder Absolutschnittstelle weisen Signalfrequenzen im Bereich von ca. 500 kHz bis ca. 5 MHz auf.

Hallsignale, die zur Kommutierung von BLDC-Motoren verwendet werden, liegen mit den Grundfrequenzen wieder genau bei den Grundfrequenzen der kommutierten Motorströme. Durch die Rechteckform mit steilen Flanken treten hier jedoch ebenso wie bei der PWM energiereiche Oberschwingungen auf.

⑧ Taktfrequenzen von Kommunikationsleitungen

Die Regelelektronik kann über eine Kommunikationsleitung mit einem übergeordneten System verbunden sein. Die dabei auftretenden Signalfrequenzen liegen zwischen 10 kHz (RS232) und 100 MHz (Ethernet).

2.2 Zusammenfassung der Frequenzanteile

Abb. 2.6 zeigt zusammenfassend die wichtigsten Störsignale, ihre Frequenzbereiche und eine qualitative Abschätzung der Störleistung.

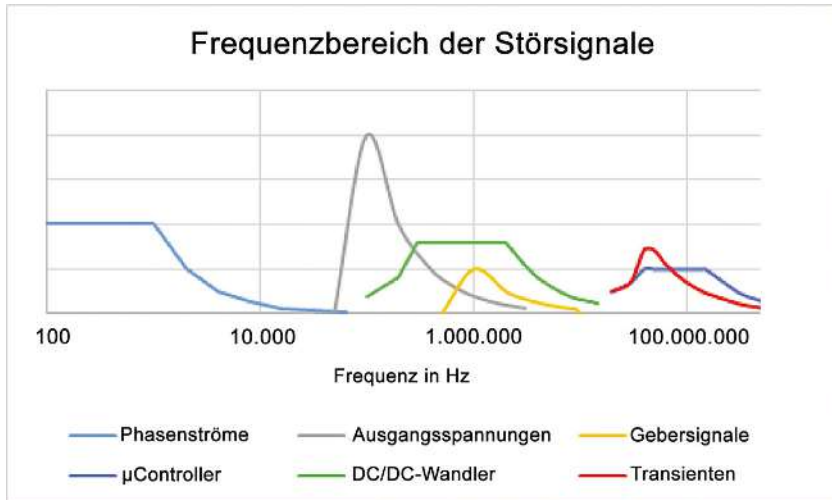


Abb. 2.6 Frequenzbereiche der Störsignale mit qualitativ eingetragener Störleistung

2.3 Von der Funkentstörung zur EMV

Alle elektrischen und magnetischen Wechselgrößen sind über die Maxwell'schen Gleichungen mit entsprechenden Wechselfeldern verknüpft. Entscheidend sind hier die Induktion und das Durchflutungsgesetz.

Durchflutungsgesetz
$$\operatorname{rot} \vec{B} = \mu_0 \left[\vec{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right]$$

Induktionsgesetz (integrale Form)
$$\oint_{\partial A} \vec{E} \cdot d\vec{s} = - \iint \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{A}$$

Das Durchflutungsgesetz gibt an, wie Ströme \vec{J} von magnetischen Feldern \vec{B} umgeben sind: Die Feldstärke ist proportional zur Stromstärke, die Amplituden sind zueinander proportional. Insbesondere sind dadurch Wechselströme von Wechselfeldern gleicher Frequenz umgeben.

Das Induktionsgesetz beschreibt, wie magnetische Wechselfelder $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ ihrerseits Spannungen $U = \int_{\partial A} \vec{E} \cdot d\vec{s}$ in Leiterschleifen induzieren: Die Höhe der induzierten Spannung ist proportional zur Fläche der Leiterschleife und zur Änderungsrate des magnetischen Felds [3].

In verteilten Aufbauten koppeln die Felder unterschiedlicher Signale ineinander über und beeinflussen oder stören sich wechselseitig.

Aufgefallen waren die von der Energienutzung ausgehenden Störungen zuerst in den 1920er Jahren, als der aufkommende Rundfunk von elektrischen Bahnen gestört wurde [4]. 1934 wurden mit dem CISPR (Comité international spécial des perturbations radioélectriques, Internationales Sonderkomitee für Funkstörungen) ein internationaler Sonderausschuss gegründet, mit dem Ziel, international einheitliche Messverfahren und Grenzwerte zunächst nur für die Funkstörung durch Geräte zu erarbeiten.

Waren Elektromotoren selbst zunächst eher eine Störquelle, so mussten mit der steigenden Verbreitung von mikroelektronischen Steuerungen auch die auf die elektrischen Antriebe wirkenden Störungen mitberücksichtigt werden. Damit musste auch der wechselseitigen Beeinflussung mehr Aufmerksamkeit gewidmet werden. Statt Funkentstörung zu betreiben, wird daher inzwischen die Elektromagnetische Verträglichkeit der Geräte betrachtet. Es geht also nicht mehr nur um Elektroantriebe als Störquelle im Funkfrequenzbereich, sondern auch um deren eigene Störfestigkeit.

Unter EMV wird inzwischen eine Vielzahl von Phänomenen inklusive der Rückwirkung in die Versorgungsnetze betrachtet. Der betrachtete Frequenzbereich reicht theoretisch von 0 Hz bis 400 GHz. Beim CISPR, inzwischen unter Schirmherrschaft des IEC (International Electrotechnical Commission), wird weiterhin die Funkstörung bearbeitet, direkt bei der IEC die Störfestigkeit. Deren Arbeitsergebnisse werden als IEC-Norm veröffentlicht.

Der veränderte Umgang mit der EMV kann leicht an Produkten aus den jeweiligen Zeiträumen nachvollzogen werden. Als Beispiel wird in Tab. 2.1 die Entstörung eines Kleinantriebs in einer Modellbahn herangezogen.

	<p>Universalmotor einer Modellbahnlok, etwa 1960 An den Bürstenanschlüssen sind keine Entstörellemente erkennbar. Die Lok selbst enthält keine Elektronik, die Richtungssteuerung erfolgt über ein Relais, die Geschwindigkeitssteuerung über einen Regeltrafo.</p>
	<p>Universalmotor einer Modellbahnlok, Anfang der 1980er Jahre An den Bürstenanschlüssen sind Entstörkondensatoren verbaut. Die Motorzuleitung ist zusätzlich über eine Ferritdrossel gefiltert. Im Original war weiterhin keine Elektronik enthalten.</p>
	<p>Universalmotor einer Modellbahnlok, ca. 2015 Zwischen den Bürsten ist ein Kondensator verbaut. Beide Zuleitungen sind mit je einer Induktivität gegen die Elektronik abgeblockt. Die Motoransteuerung erfolgt inzwischen komplett elektronisch.</p>

Tab. 2.1 Vergleich der Entstörmaßnahmen an verschiedenen Generationen einer Kleinantriebsanwendung (Modellbahnlok)