

# Wie soll eine S-Bahn klingen? Eine Übersicht über weniger bekannte akustische Optimierungsmöglichkeiten

Martin Klemenz

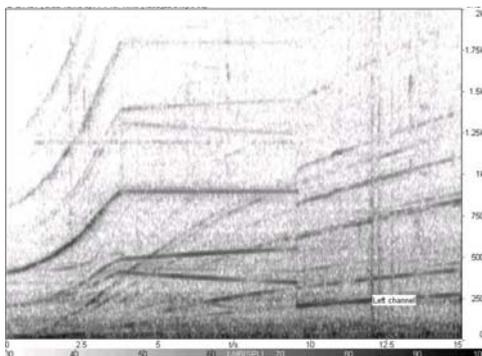
Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., D-13355 Berlin, E-Mail: [dega@dega-akustik.de](mailto:dega@dega-akustik.de)

## Einleitung

Bei der Anfahrt von elektrisch betriebenen Schienenfahrzeugen treten oft Geräusche in den Vordergrund, die nicht durch den Rad-/Schiene-Kontakt, sondern im Bereich des Antriebs erzeugt werden. In erster Linie ist dies das Geräusch des Fahrmotors; auch Getriebe- und Lüftergeräusche können hinzugezählt werden. Dieser Beitrag fasst die Ergebnisse einer vorangegangenen Studie zusammen, bei der diese sogenannten „traktionsbedingten“ Geräusche auf ihr Optimierungspotenzial hin analysiert wurden [1-3]. Es wurden dabei vor allem solche Eingriffsmöglichkeiten aufgedeckt, die nicht den Schallpegel senken, sondern die subjektiv empfundene Geräuschqualität.

## Was sind traktionsbedingte Geräusche?

Während beim Rad/Schiene-Kontaktgeräusch in den letzten Jahren spürbare Pegelsenkungen erreicht wurden, treten die traktionsbedingten Geräusche bei modernen Fahrzeugen stärker in den Vordergrund als bei älteren Fahrzeugen. Deutlich wird dies z.B. in Abbildung 1, welches den FFT-Zeitverlauf eines typischen S-Bahn-Fahrzeuges zeigt. Alle tonalen Komponenten, die im Signal sichtbar hervortreten, stammen von Motor und Getriebe.



**Abbildung 1:** FFT-Zeitverlauf der ersten 15 Sekunden einer typischen Anfahrt, aufgenommen im Inneren eines modernen S-Bahn-Fahrzeugs

Die Hauptursache für diese Entwicklung ist die Verwendung von Asynchronmaschinen (ASM) gegenüber den früheren Gleichstrommaschinen. Die Vorteile der ASM liegen in der geringeren Wartung, des geringeren Gewichtes und der besseren Energieausnutzung. Da eine ASM aber mit einem zeitlich veränderlichen Strom gespeist werden muss, entstehen hierbei nach dem Lautsprecherprinzip fast immer Geräusche. Diese resultieren hauptsächlich aus den unerwünschten Oberschwingungen im Stromsignal. Im Luftspaltfeld des Motors werden diese in Körperschall gewandelt, der sich schließlich auf verschiedenen Wegen fortpflanzt und als Luftschall in den Fahrgastraum bzw. nach außen abgestrahlt

wird. Bei älteren Fahrzeugen mit Gleichstrommaschine treten diese Geräusche in der Regel nicht auf, so dass zur Prüfung der akustischen Qualität moderner Fahrzeuge in [4] der Begriff „gleichstromleise“ verwendet wird.

Neben dem Luftspaltfeld des Motors kann es noch weitere elektro-mechanische Wandler geben, d.h. Spulen, Kabel etc., bei denen durch magnetische Kräfte Strukturen angeregt werden. Auch das Geräusch des Getriebes kann als „traktionsbedingt“ bezeichnet werden; hörbar ist fast immer die Zahneingriffsfrequenz samt ihrer Oberschwingungen. Eine ausführliche technische Beschreibung, wie diese Geräusche erzeugt werden und welche Parameter hierbei eine Rolle spielen, findet sich in [1].

## Muss man traktionsbedingten Geräuschen Beachtung schenken?

Gemessen an der geringen Zahl von Veröffentlichungen zu diesem Thema könnte man meinen, es handle sich um ein eher unbedeutendes Geräusch, vor allem im Vergleich zu einer Fülle von Forschungsarbeiten auf dem Gebiet des Rad/Schiene-Kontaktes. Allerdings lässt sich beobachten, z.B. in einer Umfrage von Pro Bahn, dass die Akustik eines neuen Fahrzeuges nicht immer positiv beurteilt wird, selbst wenn es leiser als sein Vorgänger ist.

So sollte es im Interesse der Hersteller und Betreiber von Schienenfahrzeugen liegen, ihren Fahrgästen komfortable Produkte anzubieten. Man bedenke, dass jeder Pendler im Nahverkehr täglich eine Vielzahl von Beschleunigungsvorgängen erlebt. Traktionsbedingte Geräusche sind zwar weitgehend unvermeidlich, aber innerhalb gewisser Grenzen liegt durchaus ein Optimierungspotenzial, welches nicht bei allen Fahrzeugen bisher voll ausgeschöpft wird.

## Wie kann man diese Geräusche optimieren?

Zunächst ist anzumerken, dass die Einhaltung von Richtlinien bzw. Lastenheften nicht automatisch zu einem optimierten Produkt führt. Vor allem ältere Regelwerke beschränken sich oft auf A-bewertete Schalldruckpegel, und aus der Psychoakustik ist bekannt, dass ein leises Geräusch nicht automatisch auch ein angenehmes Geräusch ist. Es kommen zwar in neueren Regelwerken Kennwerte wie z.B. die Tonhaltigkeit hinzu [5]; im Allgemeinen ist es aber schwierig, die Angenehmheit eines Geräusches allein durch Zahlenwerte zu beurteilen. Zwar gibt es eine Vielzahl von Rechenmodellen, z.B. zur Rauigkeit; allerdings können diese nicht in allen Fällen das Urteil des Menschen exakt nachbilden [1].

Ein besser geeignetes Mittel zur Beurteilung der Geräuschqualität sind daher Hörversuche, wobei deren Ergebnisse

aber schwerlich vertraglich festgelegt werden können. Die folgenden Aussagen sind daher als Ratschläge in Ergänzung zu bestehenden Regelwerken zu verstehen.

**Pegel senken:** Selbstverständlich sollte dies der erste Ansatz zur Geräuschoptimierung sein und bleiben. Da die primäre Schallerzeugung im Motor-Luftspaltfeld weitgehend unvermeidlich ist, werden Maßnahmen meist auf der Sekundärseite angesetzt. Hierzu zählen z.B. die Entkopplung schwingender Strukturen (z.B. Motor und Drehgestell), die Dämmung von Luftschall (z.B. durch doppelte Faltenbälge) oder die Vermeidung kritischer Resonanzen.

**Frequenzgehalt ändern:** Daneben gibt es Maßnahmen, die sich - bei gleicher Lautheit - auf die Angenehmheit der Geräusche auswirken, indem der Frequenzgehalt verändert wird. Vor allem stellt das Schaltsignal für den Umrichter einen wichtigen Parameter dar, da dieser in seinem Zeitverlauf unterschiedlich programmiert werden kann. Die entsprechenden Eingriffsmöglichkeiten sind hier nicht so etabliert wie bei der Pegelreduktion.

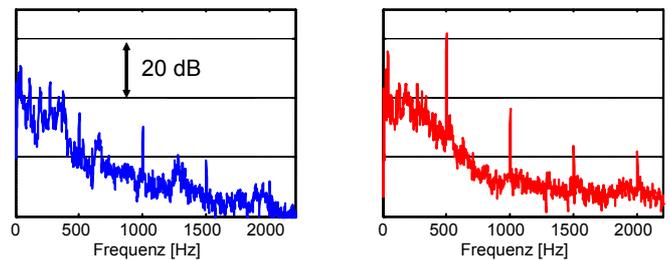
Hörversuche aus [1] zeigten die folgenden Ergebnisse:

- Speziell bei asynchroner Taktung besteht prinzipiell die Wahl zwischen einer konstanten oder modulierten Schaltfrequenz. Hier wurde die modulierte Schaltfrequenz als deutlich angenehmer bewertet.
- Die Modulation kann entweder periodisch oder randomisiert erfolgen. Die randomisierte Variante hat sich hierbei als etwas angenehmer erwiesen.
- Beim Anfahren wird zur Energieeinsparung manchmal ein schneller Wechsel der Schaltfrequenz angesetzt, meist in Form eines Sweeps. Hier ist darauf zu achten, dass der Geräuschcharakter nicht zu unruhig wird.
- Antriebe mit Thyristor-Schaltern und Phasenfolge-Signalen gelten als veraltet und sind auch aus akustischer Sicht nicht zu empfehlen.
- In den letzten Jahren wurden die meisten Fahrzeuge mit GTO- oder IGBT-Antrieben ausgerüstet. Die moderneren IGBT-Antriebe sind in der Regel leiser als GTO-Antriebe, aber nicht a priori angenehmer, da die hörbaren Frequenzen oft in dem für das Gehör empfindlichsten Frequenzbereich zwischen 2 und 5 kHz liegen.

Auch in der Wahl der Getriebe-Zähnezahl liegt ein relevanter Parameter, da die Zahneingriffsfrequenzen mit synchronen motorbedingten Geräuschen in feste Frequenzverhältnisse treten. Die entsprechenden Intervalle können unterschiedlich angenehm sein. Bei einem einstufigen Getriebe und einer Motor-Polpaarzahl von 2 haben sich z.B. die Zähnezahlen 12, 18 und 24 (des kleinen Rades) als relativ angenehm und 11, 13 und 23 als relativ unangenehm erwiesen [1] [3].

**Vermeidbare Geräusche aufdecken:** Einem aufmerksamen Fahrgast fällt auf, dass zwei Fahrzeuge gleicher Bauart manchmal sehr unterschiedlich klingen. Dies betrifft vor allem das Geräusch des Choppers bei Fahrzeugen mit Thyristor, wie es Abbildung 2 zeigt. Der Chopper ist ein Bauteil, welches die Amplitude eines Stromsignals durch

regelmäßiges Umschalten variiert. Wenn die resultierende Chopperfrequenz (meist etwa 250-500 Hz) in einzelnen Fahrzeugen unangenehm hervortritt, drängt sich der Verdacht auf, dass dies durch schlecht verlegte Kabel oder mangelhafte Entkopplung etc. zustande kommt.



**Abbildung 2:** Über 2 s gemittelte Spektren bei der Anfahrt zweier S-Bahnfahrzeuge gleicher Bauart,  $\Delta f = 2$  Hz

**Pegel anheben (?):** Schließlich liegt eine unkonventionelle Idee zur Optimierung der Geräuschqualität darin, angenehme Geräusche zu verstärken, um somit unangenehme Geräuschkomponenten zu verdecken. Dies könnte z.B. durch Lautsprecherwiedergabe erfolgen; ein einfacherer Ansatz wäre eine Pegelerhöhung infolge der Klimaanlage [6].

## Zusammenfassung

Bei der akustischen Optimierung eines Schienenfahrzeuges wird dem Rad/Schiene-Kontaktgeräusch in der Regel die größte Beachtung geschenkt. Maßnahmen im Bereich des Antriebs wurden bisher eher selten erforscht, und dieser Beitrag zeigt Beispiele auf, welche technischen Parameter sich auf die Geräuschqualität auswirken können. Es sollte nicht nur ein leises Geräusch erzielt werden, sondern auch ein möglichst angenehmes Geräusch bzw. ein Geräusch, welches zum Produkt passt. Die vorgeschlagenen Maßnahmen, welche sich größtenteils auf den zeitlichen Verlauf der Umrichter-Schaltfrequenz beziehen, können hierzu beitragen.

## Literatur

- [1] M. Klemenz, Die Geräuschqualität bei der Anfahrt elektrischer Schienenfahrzeuge. Dissertation, RWTH Aachen, 2005  
<http://www.akustik.rwth-aachen.de/Veroeff>
- [2] M. Klemenz, Sound-generating Parameters of Starting Electric Railbound Vehicles and their Influence on Sound Quality. Proc. CFA/DAGA '04, Strasbourg, S. 749-750, 2004
- [3] M. Klemenz, Sound Synthesis of Starting Electric Railbound Vehicles and the Influence of Consonance on Sound Quality. Acta Acustica/Acustica 91, S. 779-788, 2005
- [4] H. Hondius, Die Entwicklung der Niederflur- und Mittelflur-Straßen- und Stadtbahnen. stadtverkehr 47(1), S. 6-26, 2002
- [5] Geräusche von Nahverkehrsfahrzeugen nach BOStrab. VDV-Schrift Nr. 154, Köln, 2002
- [6] M. S. Khan, Effects of masking sounds on passenger onboard activities and on other annoying noises. Acta Acustica/Acustica 89, S. 711-717, 2003