

Antriebsakustik von Hybrid- und Elektrofahrzeugen

Peter Genender¹, Klaus Wolff¹, Gary Jung¹, Georg Eisele¹

¹ FEV Motorentchnik GmbH, 52074 Aachen, Deutschland, Email: genender@fev.de

Einleitung

Aktuelle Ideen zur umweltfreundlichen Mobilität beinhalten Konzepte, die elektrische Energie als sekundären Energieträger nutzen. Die Entwicklung von Hybrid- und Elektrofahrzeugen wirft neue Fragen bezüglich einzuhaltender NVH-Ziele auf, die vom Markt aktuell noch nicht beantwortet sind. Dieser Beitrag diskutiert die aktuellen Erkenntnisse der akustischen Zielwertdefinition, Bewertung und Marktakzeptanz von Hybrid- und Elektroantrieben und berichtet über Erfahrungen in der Entwicklung des LIIONDRIVE, Abbildung 1.



Abbildung 1: FEV-LIIONDRIVE Elektrofahrzeug mit 30kW 100Nm (60kW 180Nm peak) Permanentensynchronmotor, 12kWh Li-Ion Batterie, 20kW Range Extender Wankelaggregat, 80km elektrische Reichweite, 0-60km/h in 6 sek, v_{max} 120km/h.

Elektrofahrzeuge

Elektrofahrzeuge weisen als besonders positive Eigenheit das geräuscharme Fahren speziell bei niedrigen Geschwindigkeiten im Innen- und Außengeräusch auf. Sie zeichnen sich durch ein deutlich geändertes NVH-Verhalten im Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren aus: Die fahrbahnerregten Rollgeräusche bleiben unverändert vorhanden. Ebenso sind die bei Geschwindigkeiten über 100 km/h bestimmenden Windgeräusche unabhängig vom Antrieb präsent. Die antriebsbezogenen Geräuschanteile sind jedoch anders und im Allgemeinen wesentlich leiser. Dadurch ergibt sich eine spürbare Komfortsteigerung gerade beim Fahren mit niedrigen Geschwindigkeiten, Abbildung 2. Insgesamt weist der LIIONDRIVE geringe Stand- und Fahrgeräusche auf, die insbesondere für ein Fahrzeug der Kompaktklasse überraschend sind. Nach einer Eingewöhnungszeit vermissen die wenigsten Fahrer das Geräusch des Verbrennungsmotors und genießen stattdessen die gesteigerte Umweltwahrnehmung. Da authentische Geräuscherlebnisse nur in Verbindung mit der verwendeten Technologie funktionieren und neue Technologien als Unterstützung des Innovationsgedankens eben neue Geräusche beanspruchen wollen, gehen die Autoren davon

aus, dass synthetisierte Verbrennungsmotorgeräusche in Elektrofahrzeugen nur bedingt marktfähig sein werden.

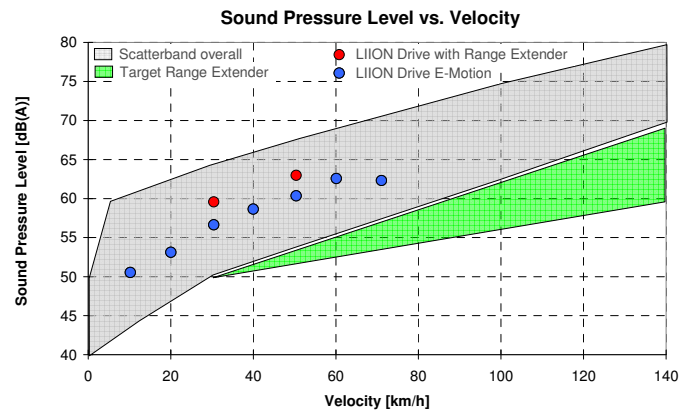


Abbildung 2: Fahrzeuginnengeräusch des LIIONDRIVE über Fahrzeuggeschwindigkeit im Vergleich zum Streuband konventioneller Fahrzeuge. Abgeleitet der Zielbereich für leise Range-Extender (grün)

Elektromotoren im Vergleich zu Verbrennungsmotoren

Das konventionelle Verbrennungsmotoraggregat erzeugt über Luft- und Körperschallanregung Geräusche. Diese sind abhängig von Motordrehzahl und -last und beeinflussbar durch das Fahrerverhalten (eingelegter Gang, Gaspedalstellung). Die Überlagerung aller mechanischen und verbrennungsbedingten Geräuschanteile führt zu einem komplexen Spektrum aus tonalen, impulsiven oder rauschenden Komponenten. Das Verhalten von Elektroantrieben ist deutlich anders. Die Luft- und Körperschallemissionen sind bis zu 20dB geringer. Hier überwiegen eindeutig hochfrequente, tonale Komponenten. Die Motorlastabhängigkeit ist dabei wesentlich geringer als bei Verbrennungsmotoren, wo sie bis zu 10dB(A) im Fahrzeuginnengeräusch beträgt. Ebenso ist die Drehzahlabhängigkeit deutlich geringer als bei Verbrennungsmotoren. Auch wenn der Elektroantrieb damit gute Voraussetzungen für leise Betriebsgeräusche besitzt, ist eine sorgfältige Integration in das Fahrzeug notwendig, um eine überzeugendes NVH-Verhalten zu erreichen. Auftretende Heulgeräusche (Straßenbahngeräusch), insbesondere bei der elektrischen Rekuperation im Bremsbetrieb, haben nicht nur die elektromagnetische Feldanregung als Ursache, sondern auch das Verzahnungsheulen der verwendeten Getriebestufe im Antriebsstrang. Da die vorhandenen Verzahnungen in Fahrzeuggetrieben oftmals nicht auf die in Schubrichtung hohen Bremsmomente des Elektromotors ausgelegt sind, können hier deutliche Geräuschüberhöhungen auftreten. Für zukünftige Elektroantriebe sind daher leise elektrische Motoren und Übersetzungsgetriebe zu entwickeln. In Bezug

auf die Elektromotorlagerung wurde beim LIIONDRIVE die Aggregatlagerung des Verbrennungsmotors an den Elektroantrieb angepasst. Deutlich steifere Lager als bei Verbrennungsmotoren üblich wären hier nicht empfehlenswert, da sie die Körperschalleinleitung dieser Störgeräusche begünstigen würden. Die vorhandenen elektrifizierten Nebenaggregate und elektrischen Bauteile (Pumpen, Lüfter, Relais, Leistungselektronik etc.) können im Stillstand und bei niedrigen Geschwindigkeiten nun ebenfalls störend werden. Beispielsweise erzeugte eine zuerst verwendete Zweikolbenunterdruckpumpe tonale Geräusche bis zu 56dB(A) im Innengeräusch. Sie wurde daher durch eine mit 39dB(A) deutlich leisere Flügelzellenpumpe ersetzt.

Hybridfahrzeuge

Bei Hybridfahrzeugen mit zusätzlichem Verbrennungsmotor kann das Erlebnis des lautlosen Fahrens bei dessen Anspringen jäh enden. Dieser Effekt ist von aktuellen Hybridfahrzeugkonzepten bekannt und hat bereits zu antriebsseitigen Entwicklungsprämissen geführt. Prinzipiell kritisch sind die Übergänge zwischen allen Betriebsmodi, da sie akustisch auffällige, transiente NVH-Phänomene beinhalten, Abbildung 3.

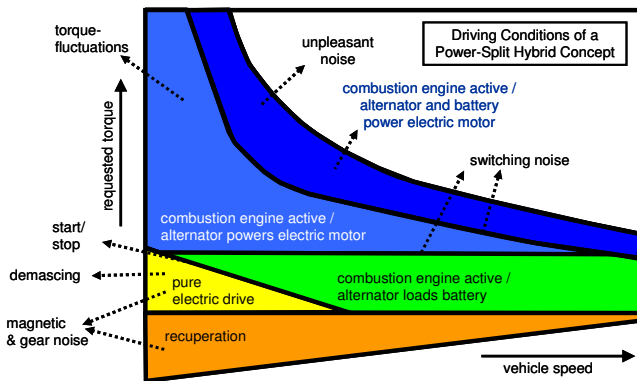


Abbildung 3: NVH-Phänomene eines Powersplit-Hybridsystems bei unterschiedlichen Betriebsmodi

Bei den Übergängen vom reinen elektrischen Betrieb zum Betrieb mit Verbrennungsmotor darf der Startvorgang des Verbrennungsmotors keine unangenehmen Schwingungen oder Geräusche verursachen. Zur Reduktion der hierdurch verursachten Schwingungen werden neben Maßnahmen an Aggregatlagerung und Verbrennungsmotorsteuerung auch Regelungsmethoden der elektrischen Komponenten eingesetzt. Durch eine Steuerung bzw. Regelung der verwendeten Elektromotoren in Bezug auf Drehzahl oder Moment können die durch den Verbrennungsmotorstart im Antriebsstrang auftretenden, dynamischen Verdrehwinkel kompensiert werden und somit lästiges Fahrzeugruckeln reduziert werden.

Range-Extender-Modul

Bei der Frage der Integration eines zusätzlichen Range-Extender-Moduls in ein Elektrofahrzeug zur Reichweitenerhöhung bei ausgeschöpfter Batteriekapazität spielen Lastenheffaktoren wie Kosten, Gewicht, Package,

Emissionen, Verbrauch und nicht zuletzt NVH bei der Bewertung möglicher Konzepte eine entscheidende Rolle. Zur NVH-Bewertung verschiedener Aggregate werden oftmals die freien Massenkräfte als Kriterium herangezogen. Je nach Drehzahl und Lastbereich sind diese aber gar nicht dominant, sondern die freien Gaskraftrollmomente um die Kurbelwellenachse. Daher spielt die Skalierung des Motors zur Leistungserreichung – ob größerer Motor bei kleinerer Drehzahl oder kleinerer Motor bei höherer Drehzahl – eine entscheidende Rolle. Es darf nicht vergessen werden, dass ein hochdrehender Motor unabhängig vom Pegel unnatürlich in Verbindung mit einem stehenden oder langsam fahrenden Fahrzeug klingt. Auf der anderen Seite sind bei wenigzylindrigen Motoren, speziell beim Ein- und Zweizylinder bei niedrigen Drehzahlen, die Einzelzylinderereignisse deutlich heraushörbar. Über all diesen Betrachtungen der NVH-Qualität verschiedener Motorkonzepte steht die Fragestellung, wie weit das Aggregatgeräusch im Fahrzeug über Sekundärmaßnahmen absenkbar ist, denn dann haben obige Aspekte immer weniger Einfluss. Beim LIIONDRIVE wurde auf ein angenehmes und leises NVH-Verhalten abgezielt. Mit Blick auf die Package- und Gewichtsvorteile fiel die Wahl auf einen 294ccm Einscheibenwankelmotor. Als Zielgeräusch etablierte sich das „Kühlschrankgeräusch“, d.h. der Range-Extender springt bei Bedarf selbständig an und surrt dabei leise.

Interessante Eigenheit der Range-Extender-Einheit ist die äußere Drehmomentfreiheit, da das Motormoment im Generator direkt abgenommen wird. Als besonders kritisch wurden in Vorversuchen nicht nur mechanische Geräusche der Drehkolbeninnenverzahnung identifiziert, sondern insbesondere das zweitaktähnliche, extrem laute Auspuffgeräusch. Unterstützt durch 1D-CFD-Berechnungen wurde eine vorgelagerte V-Nut in den Auslassschlitz integriert, welche den Auslassstoß abmildert und bereits eine Geräuschreduktion um 5dB(A) bewirkt. Über eine serielle Anordnung zweier bezüglich der Oberflächenabstrahlung optimierter Serienschalldämpfer konnte das Mündungsgeräusch mit hohem Installationsaufwand für den Aggregateträger auf ein akzeptables Maß abgesenkt werden. Für eine Serienlösung besteht beim Abgasschalldämpfer Optimierungspotential in Bezug auf Package und Kosten.

Fahrversuche mit integrierter Range-Extender-Einheit im Fahrzeug haben schnell deutlich gemacht, dass der Applikation der möglichen Betriebspunkte entscheidende Bedeutung zukommt. Ziel ist es, den Verbrennungsmotor möglichst wenig wahrnehmbar in das Fahrerlebnis zu integrieren. Bei stehendem Fahrzeug und niedrigen Fahrgeschwindigkeiten sollte ein Betrieb des Verbrennungsmotors aus NVH-Sicht möglichst vermieden werden. Diese Funktion kann in die Betriebsstrategie der Batterieladezustandsregelung eingebunden werden, führt dann aber bei anderen Fahrgeschwindigkeiten zu vermehrtem Range-Extender-Betrieb. Für den Fahrbetrieb scheint eine Applikation sinnvoll, die bei größeren Geschwindigkeiten höhere Drehzahlen zulässt und die Maskierung durch Roll- und Windgeräusche ausnützt, Abbildung 2.