



FAHRZEUGFLOTTEN-UMSTELLUNG AUF ELEKTROANTRIEB:

Anforderungen an die Verkehrsbetriebe

Inhaltsverzeichnis

1. **Einleitung**
Konzept E-Busse, Einführung und Erfahrungen
2. **Betrieb**
Wartung und Überwachung
3. **Rechtliches zum Bau und Betrieb der Hallen**
Sonderbauverordnung und Brandschutz
4. **Risikoabschätzung**
Batterie und Ladesysteme
5. **Risikobewertung**
6. **Fazit**



1. Einleitung

Konzept E-Busse, Einführung und Erfahrungen

Von Diesel auf Elektro umsteigen – klingt im ersten Moment recht einfach. Für ein Verkehrsunternehmen stellt es jedoch eine große Disruption der Abläufe dar. Aufgrund dessen sollte die Einführung der ersten Elektrobusse gut geplant sein.

In Münster fahren seit 2015 fünf Elektrobusse auf der Linie 14. Die Vorbereitungen begannen bereits Jahre vorher mit der Einwerbung von Fördergeldern, dem Gewinnen von Projektpartnern aus Forschung und Wirtschaft, dem Planen der Ladeinfrastruktur sowie Schulungen für Mitarbeiter aus Werkstatt und Fahrdienst. Beteiligt waren neben den Stadtwerken als Verkehrsunternehmen unter anderem Hersteller von Bussen, Lade- und Batterie-Systemen, Trafostationen sowie die RWTH Aachen und weitere Projektpartner, die im EU-Projekt **ZeEUS (Zero Emission Urban Bus System)** zusammengearbeitet haben.

Die gute Nachricht vorweg: Durch die steigende Verfügbarkeit von Elektrobussen „von der Stange“, die zunehmende Standardisierung der Ladeinfrastruktur und die stetige Existenz von Fördertöpfen sind solche aufwendigen Projektstrukturen nicht mehr notwendig. Trotz alledem müssen folgende Fragen geklärt sein, bevor die E-Busse rollen:

• Wo laden die Busse?

Schnell an Ladestationen auf dem Linienweg und an der Endhaltestelle oder nur nachts im Depot?

Davon abhängig ist, welche Steckersysteme und Batteriegrößen verbaut werden.

• Wie werden die Busse in den Betrieb eingebunden?

Fahren sie gebündelt auf einer Linie oder im gesamten Liniennetz?

Dabei müssen unter anderem Höhenprofile der Linienwege, aber auch Fahrgastnachfrage und Umlauflänge berücksichtigt werden.

• Wer darf die Busse bedienen?

Sind Fahrerinnen und Fahrer, aber auch die Mitarbeiter in Werkstatt und Leitstelle ausreichend geschult?

Nur mit Hochvolt-Schulungen und Datenversorgung aus den Bussen kann der Betrieb effizient sichergestellt werden. Hierbei dürfen weder das Reinigungspersonal noch die Umsatzzfahrer vergessen werden.



© scharfsm86 - Fotolia.com



Für die Wartung gilt: Weniger bewegliche Teile bedeuten eigentlich, dass der Wartungsaufwand sinkt. Dieser Effekt wird sich allerdings erst bei einer ausreichend großen Zahl an E-Bussen bemerkbar machen. Im Mischbetrieb mit Dieseln muss die Werkstatt alte und neue Wartung parallel beherrschen. Dazu kommt, dass bei den E-Bussen mindestens genauso oft auf dem Dach wie unter dem Fahrzeug gearbeitet wird. Entsprechende Dacharbeitsplätze werden daher genauso benötigt wie traditionelle Hebebühnen. Das Stromnetz auf dem Betriebshof muss zudem für das Laden von mehreren E-Bussen ausgelegt sein. Den Stadtwerken Münster kommt hier zupass, dass sie nicht nur Verkehrsunternehmen, sondern auch Energieversorger sind (kurze Entscheidungswege).

Münsters erste fünf Busse sind beispielsweise mit kleineren Batterien ausgestattet, die maximale Reichweite liegt bei etwa 50 Kilometern. Daher werden sie nur auf der Linie 14 eingesetzt, die an beiden Endhaltestellen Schnellladestationen hat. Dort laden die Busse innerhalb weniger Minuten die Batterien vollständig auf und starten im Anschluss die nächste Tour.

Die Busse haben sich seit 2015 – wie in einem Forschungsprojekt erwartbar – von Prototypen hin zu seriennahen Fahrzeugen gewandelt. Um eine hohe Zuverlässigkeit der Nachladung zu erreichen, wurde zum Beispiel das gesamte Steckersystem von einer im Projekt entwickelten seitlichen Lademöglichkeit hin zum Pantografen getauscht. Solch hoher Einsatz von allen Projektpartnern ist bei aktuellen Beschaffungen nicht mehr notwendig.

sich durchgesetzt, da dort die Steuerung einfacher als im Nabenantrieb ist. Ein Getriebe gibt es nicht. Abgasnachbehandlung ist überflüssig. Der dadurch eingesparte Platz wird allerdings trotzdem benötigt und von Batterien belegt. Hinzu kommen zusätzliche Techniksysteme, wie ein Batterie-Lademanagement. All diese Systeme müssen vom Verkehrsunternehmen beherrscht werden. Spezielle Schulungen für die Arbeit an Hochvolt-Systemen sind daher unerlässlich. Zusätzlich müssen die Mitarbeiter über das richtige Verhalten bei Unfällen geschult werden, da die Gefahr durch möglicherweise beschädigte Li-Akkus nicht zu unterschätzen ist.

Das eingespielte Verfahren zwischen Verkehrsleitstelle und Werkstatt bei technischen Problemen auf der Linie steht ebenfalls auf dem Prüfstand. Solange die E-Bus-Anzahl klein ist und die Fahrer nur selten einen der Busse bekommen, bleibt eine Unsicherheit nicht aus. „Schaffe ich es noch zur nächsten Zwischenladung?“, ist nur eine Frage, die die Verkehrsmeister in der Leitstelle per Funk hören. Um unnötige Auswechslungen zu vermeiden, haben die Verkehrsmeister in Münster direkten Zugriff auf den gesamten Datenbestand der Busse, vom Ladestand über Batteriespannung bis hin zum Betriebsstatus der Ladestationen. Dafür kommt das System des niederländischen Start-ups Viriciti zum Einsatz. ▶

2. BETRIEB

Wartung und Überwachung

Statt eines komplexen Dieselmotors im Heck befinden sich bei E-Bussen kleinere Elektromotoren in den Radnaben oder an der Antriebsachse. Der Achsantrieb hat



Bild 1 | Ladestation mit Pantograf



Bild 2 | Schaltanlage Gleichspannung



3. RECHTLICHES ZUM BAU UND BETRIEB DER HALLEN

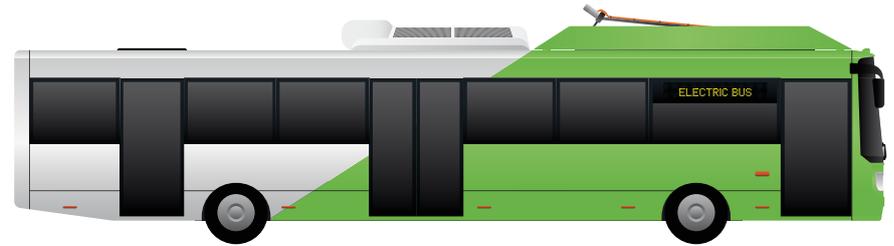
Sonderbauverordnung und Brandschutz

Neben den komplexen Fragestellungen der Verkehrsplanung und Verkehrsleitung stellen sich mitunter auch bauordnungsrechtliche Fragen. Werden die Elektrobusse in den Abstellhallen lediglich geparkt, ist keine Nutzungsänderung erkennbar. Sollen die Busse in den Hallen, welche oft in Anlehnung an eine Großgarage errichtet wurden, auch geladen werden, hilft ein Blick in die Garagenverordnungen oder Sonderbauverordnung nicht weiter.

Busabstellhallen sind in der Regel Sonderbauten, für die ein Brandschutzkonzept erstellt werden muss. Da es keine expliziten rechtlichen Vorgaben für diese Sonderbauten gibt, werden hilfsweise die Verordnungen über Großgaragen von den Brandschutzsachverständigen herangezogen. Letztlich ist die Baugenehmigung mit dem dazugehörigen Brandschutzkonzept für die Behörden entscheidend.

Mit Ausnahme der Garagenverordnung des Bundeslandes Hessen ist das Laden von Elektrofahrzeugen bisher in keiner der einschlägigen Verordnungen aufgeführt. Da aber in Hessen eine Mindestanzahl an Ladeplätzen gefordert wird, gehen die Autoren davon aus, dass dem Laden der Batterie im Innern des Fahrzeugs aus Richtung der Bauordnung nichts im Wege steht. Für die Nutzung der Busabstellhalle in Anlehnung an eine Großgarage ergeben sich daher aus der reinen Abstellung von E-Bussen keine Nutzungsänderungen.

Dies trifft auch zu, wenn die Batterien nicht außerhalb des Busses geladen werden. Die Lagerung von Batterien innerhalb der Abstellhallen, wozu auch das Laden außerhalb des Fahrzeugs zählen könnte, stellt aus unserer Einschätzung jedoch eine Nutzungsänderung dar.



© scharfsm86 - Fotolia.com

Gegebenenfalls sind neue Anforderungen durch den Brandschutzingenieur des Kreises und im Brandschutzgutachten zu prüfen.

Behördliche Auflagen durch die Nutzung der Abstellhallen durch E-Busse sind somit nicht bekannt. Im Zuge der Planung durch den Betreiber empfiehlt es sich, die Feuerwehr und den Gebäudeversicherer miteinzubeziehen. Auch eine Begehung mit der Feuerwehr nach Fertigstellung der Ladeinfrastruktur ist sinnvoll. So sind die Einsatzkräfte im Ernstfall bereits über die neuen Gefahren informiert. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass für die Feuerwehr die E-Busse auch im normalen Verkehrsraum erkennbar sein müssen.

4. RISIKOABSCHÄTZUNG

Batterie und Ladesysteme

Bisher stand das Risiko eines Busbrandes ausgehend vom Motorraum im Vordergrund, der dann auf die eng abgestellten Busse in den Abstellhallen übergreifen kann^[1-3]. Durch die Umrüstung auf Elektroantrieb sind die Gefahren neu zu bewerten. Sowohl aus Schadenergebnissen wie auch durch Simulationen von Busbränden ist bekannt, wie gefährlich Busbrände sind^[3].

Dabei besteht die Brandlast insbesondere aus den Innenraummaterialien, die zum Teil leicht entzündlich sind. Reduziert um den ca. 300 l fassenden Dieseltank ergeben sich bei Elektrobussen im Vergleich zu konventionellem Antrieb ähnliche Brandlasten. Neu einzuschätzen ist allerdings die Brandgefahr, die vom batteriebetriebenen Antrieb eines Busses und der Ladeinfrastruktur ausgeht.

Bilder 3 und 4 vermitteln einen Eindruck vom unterschiedlichen Aufbau und Platzbedarf eines Dieselmotors und der Lithium-Akkus für den Elektromotor, z. B. in der Radnabe.



Bild 3 | Motorraum Dieselantrieb

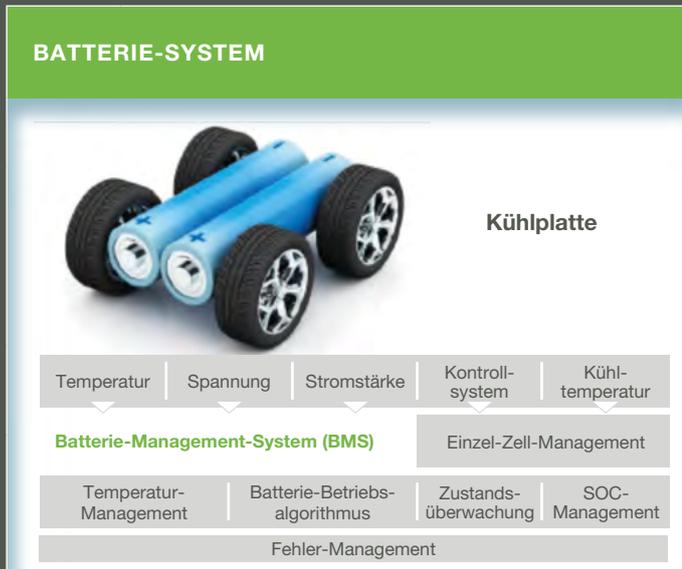


Bild 4 | Motorraum Elektroantrieb Batterieraum

Beim Dieselantrieb kommt zur Einhaltung der Stickoxid-Grenzwerte die Abgasverbrennung mit > 1.000 °C im Heckraum oberhalb des Motors hinzu.



Übersicht über die Funktionen eines Batterie-Management-Systems (BMS):



| FUNKTIONEN DES BMS U. A. | |
|--------------------------|---|
| SOC | State of Charge Steuerung und Überwachung des Be- und Entladens |
| SOH | State of Health, Balancing-Funktion Schutz vor Über- und Tiefenentladung der Zellen Überladung > Thermal Runaway > Brand und Explosion |
| DOD | Depth of Discharge Entladetiefe Thermomanagement Kaltstartverhalten |

Quelle:
„Kompendium: Li-Ionen-Batterien“, www.dke.de

Immer wieder tauchen teils spektakuläre Schadenmeldungen im Zusammenhang mit Lithium-Ionen-Akkumulatoren in den Medien auf.

Das grundsätzliche Prinzip von den Zellen aus dem Consumer-Bereich (E-Bikes, Akkus für Smartphones etc.) und den Batterien von Elektrobussen ähnelt sich. Entscheidend für einen sicheren Betrieb von Batterien dieser Größenordnung ist jedoch das Batterie-Management-System. Bei einem Verbund mehrerer Zellen in Reihe zur Erzielung einer höheren elektrischen Spannung müssen zum Ausgleich der Toleranzen in der Kapazität zwischen den Zellen zusätzliche Maßnahmen in Form eines Balancers (zum Ausgleich der Ladespannung zwischen den einzelnen Akkuzellen) vorgesehen werden.

Interne Schutzschaltungen oder Batterie-Management-Systeme (BMS) mit Tempe-

raturesensoren, eine Spannungsüberwachung und Sicherheitsabschaltungen sollen bei Überladung oder Überlastung eine Erhitzung bzw. Entzündung verhindern.

Hinzu kommen Kommunikationsmöglichkeiten der Batterie mit dem Leitsystem der Stadtwerke. Bei den BMS wird der Batteriezustand online sowohl im Leitsystem der Stadtwerke als auch vom Hersteller überwacht. Werden kritische Zustände erreicht, können sowohl Leitwarte als auch Hersteller Maßnahmen einleiten. Der Fahrer des Busses selbst darf nicht in das BMS eingreifen. Wenn das BMS abgeschaltet wird, ist es notwendig, dass der Fahrer den Bus noch einige Meter (ca. 100–300 m) aus einer Gefahrensituation, z. B. Straßenkreuzungen, Brücken oder Tunnel, befördern kann.

Ein besonderes Risiko stellen verunfallte Elektrobusse dar. Eine Beschädigung der

Batterie ist nicht immer äußerlich erkennbar. Auch nach längerer Zeit kann sich aus dem internen Defekt noch ein Brand entwickeln. Daher dürfen Busse, die in einen Unfall verwickelt worden sind, nicht einfach in die Abstellhallen oder ohne Prüfung in die Werkstatt gefahren werden. Es empfiehlt sich, einen Abstellplatz im Freien mit ausreichendem Sicherheitsabstand zu Gebäuden einzurichten. Darüber hinaus ist ein Havarie-Management-Konzept (betriebs-sicheres Abstellen von Bussen) mit dem Hersteller zu entwickeln.

5. RISIKOBEWERTUNG

Ein wesentlicher Punkt für die Risikobewertung ist das Fehlen von betriebsbedingt hohen Temperaturen im Motorraum eines Elektrobusses. Bei einem Dieselmotor ▶



Bild 5 |
Abgasnachbehandlung im Motorraum
eines konventionellen Busses



Bild 6 |
Li-Batterien als Energiespeicher nach der Nutzungszeit für den E-Antrieb

entstehen hohe Verbrennungstemperaturen und erhitzen den gesamten Motorraum (z. B. Temperaturen $> 1.000\text{ °C}$ bei Euro-Norm 6).

In Kombination mit den dort vorhandenen Betriebsstoffen ergibt sich ein Gefahrenpotenzial, welches beim Elektrobuss in dieser Form nicht vorliegt.

Die Gefahren sind bei den eingesetzten elektrischen Systemen andersartig gelagert. So ist insbesondere auf eine sichere Lagerung von neuen, alten und beschädigten Akkus zu achten. Werden Batterien für die Busse vorgehalten, kann auf eine feuerbeständige Abtrennung des Batterielagers nicht verzichtet werden.

Insbesondere zu beachten ist die sichere Lagerung beschädigter Akkus. Durch eine beschädigte Batterie kann es auch noch nach längerer Zeit (bis zu mehreren Wochen) nach dem auslösenden Ereignis zu einem thermischen Runaway kommen, woraus sich dann ein Brand entwickeln kann. Eine sichere Lagerung von havarierten Li-Akkus ist sicherzustellen. Eine mögliche praktische Lösung wäre z. B. die Lagerung in geschlossenen Metallbehältern, die zusätzlich mit Sand oder Wasser gefüllt werden können.

Um Schäden an anderen Batterien zu vermeiden, empfiehlt sich darüber hinaus eine separate Lagerung der defekten Batterien. Dabei sind Mindestanforderungen an den

baulichen und anlagentechnischen Brandschutz zu stellen: mindestens F90-Bauteile, Feuerabschluss mit mindestens T30-Türen, geschottete Durchführungen sowie automatische Brandmeldeanlage mit Aufschaltung. Organisatorisch sind die zukünftigen Lagerräume in die FW-Pläne aufzunehmen und mit der Feuerwehr ist ein Einsatzplan zu entwickeln.

Ein sicherer Betrieb der Akkus in den Bussen ist durch das Batterie-Management-System mit einer permanenten Überwachung und Eingriffsmöglichkeiten durch die Leitzentrale und den Hersteller sichergestellt. Durch systembedingte bzw. eigene Grenzwerte werden entsprechende Signalgrenzen generiert.

Bei der Modernisierung der Busflotte darf die Erneuerung der elektrischen Anlagen nicht vergessen werden^[4]. In der Regel entsprechen weder Leitungsquerschnitte noch Verteiler den hohen Leistungsanforderungen der Ladeinfrastruktur. Besonders wenn der Bestand an Elektrobussen wächst, führt kein Weg an einem Lastmanagement vorbei. Da die Energieversorgung eine zentrale Rolle im Betrieb der Elektrofahrzeuge einnimmt, kommt der Wartung und Prüfung der Anlagen eine noch höhere Bedeutung zu. Hier empfiehlt sich eine regelmäßige Prüfung und Thermografie der elektrischen Anlage durch einen VdS-anerkannten Sachverständigen. Im Zuge der Umstellung auf Elektroantrieb wird die hohe Verfügbarkeit eine Grundvoraussetzung für den modernen Bus-

betrieb sein. Daher empfiehlt es sich, die eigenen Elektrofachkräfte weiter vorausschauend zu schulen und zu entwickeln. Dabei bieten sich z. B. die Seminare und Kurse beim VdS an. Der Überspannungsschutz ist dabei für einen störungsarmen Betrieb auch heute schon unverzichtbar.

SCHUTZ VON LADEEINRICHTUNGEN

Sofern Schnellladeeinrichtungen (je nach System, z. B. bis zu 400 A bei 700 V für eine Schnellladung innerhalb von 7 Minuten) an zentralen Punkten im Stadtgebiet vorgesehen sind, müssen Trafostationen mit der Netzeinspeisung durch das Mittelspannungsnetz gebaut werden. Die Mittelspannung muss dann über die Gleichrichtung für die Busbatterien umgeformt werden. Sowohl für die Trafostation als auch für die Schnellladeeinrichtung sind besondere Blitz-/Überspannungsschutzgeräte vorzusehen.

An exponierten Lagen ist der äußere Blitzschutz durch eine Blitzschutzanlage, die die gesamte Ladeeinrichtung in den Schutzbereich integriert, sicherzustellen. Die Gefahr der Ableitung des Blitzstromes über den Pantografen entweder in das Batteriesystem oder in die Schnellladeeinrichtung ist dabei zu berücksichtigen.

Auch der Brandschutz für die Trafostation ist zu bedenken. Für einen störungsarmen



Bild 7 |
Ausklappbarer Pantograf auf dem Busdach für die Schnellladeeinrichtung



Bild 8 |
Installation der Kühl- und Steuereinrichtungen auf dem Dach – zukünftig werden die Batterien auch seitlich auf dem Dach installiert.



Bild 9 |
Blitzstrom-Ableiter in Niederhauptverteilung

Betrieb sind dies Grundvoraussetzungen bei der Umstellung auf Elektroantrieb. Für die Räume der Trafostation ist eine automatische Brandmeldeüberwachung mit Aufschaltung auf die Leitstelle erforderlich, um frühzeitig eine Rauchentwicklung zu detektieren und Maßnahmen einleiten zu können.

Der Einsatz von einer begrenzten Anzahl von Trafostationen mit Schnellladeeinrichtungen an bestimmten Punkten ist bei dem Fahrplankonzept zu bedenken. Dies bedeutet unter Berücksichtigung der notwendigen Ladezeiten den Einsatz von computergesteuerten Fahrplänen. Hierbei bedarf es einer sehr genauen Abstimmung der Ladevorgänge mit den Fahrplänen.

6. FAZIT

Das Verkehrskonzept für E-Busse in Münster geht weit über den einfachen Einsatz von E-Bussen hinaus. Hier wird ein ganzheitliches Verkehrskonzept schon bei der Erzeugung von regenerativer Energie für

den Einsatz in der E-Mobilität entwickelt und in der Praxis umgesetzt. Dabei werden Randbedingungen wie Lastspitzenmanagement, systematische Energieeinsparungen und der Nutzen von stationären Batteriespeichern in das Verkehrskonzept integriert. Gleichzeitig ist neben dem praxistauglichen Einsatz die Klärung von Fragen der Normung für einen weitverbreiteten Einsatz von E-Bussen unumgänglich.

Durch die frühzeitige Beschäftigung mit diesen Themen konnten Frage- und Hilfestellungen formuliert und Ansätze zur Schadenverhütung gegeben werden. Andererseits sind die Informationen aus erster Hand für die Versicherungswirtschaft von zentraler Bedeutung, wenn neue Technologien Einzug in den Alltag finden und gleichzeitig versichert werden sollen. Hier bedarf es dann des Ingenieurwissens, um mögliche Auswirkungen abschätzen zu können. Durch die wesentlich niedrigeren Temperaturen im Motorraum/Antriebsstrang und die permanente Überwachung der Batterien durch ein BMS reduziert sich das Risiko sowohl für den einzelnen Bus als auch für die Busabstellhallen.

Das ganzheitliche Verkehrskonzept für die Umstellung auf E-Busse ist für die Westfälische Provinzial Versicherung zukunftsweisend und beinhaltet risikominimierende Schadenverhütungsgedanken. Die zusätzlichen Maßnahmen der Schadenverhütung tragen zum störungsarmen Betrieb bei.

Wenn die beschriebenen Punkte berücksichtigt werden, ist von keiner Risikoerhöhung der Busse durch den Einsatz von Li-Ionen-Batterien auszugehen.

Die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Brandes durch den batteriebetriebenen Elektroantrieb wird aus heutiger Sicht geringer eingeschätzt. Ob dies in Zukunft so bleibt, werden erst die Erfahrungen mit dem weitverbreiteten Einsatz von E-Bussen und der technischen Entwicklung am Markt, z. B. neue Generationen von E-Bussen mit zusätzlichen Brennstoffzellen, zeigen.

Die Stadtwerke Münster haben seit Oktober fünf weitere E-Busse mit neuen Akkus, die auf dem Dach untergebracht sind, angeschafft. Diese haben nun eine Reichweite von 120 km^[6,7].

LITERATURVERWEISE

- [1] Anja Hofmann-Böllinghaus, Steffen Dülsen, Georg Scholzen, Brand in einem Busdepot – eine bisher nicht beachtete Gefahr? schadenprisma 3/2014, 4–11.
- [2] Steffen Dülsen, Anja Hofmann-Böllinghaus, Georg Scholzen, Brand in einem Busdepot – eine bisher nicht beachtete Gefahr?, s+s-report 1/2014, 18–24.
- [3] Anja Hofmann-Böllinghaus, Steffen Dülsen, Georg Scholzen, Schnelle Brandausbreitung bei einem Brand in einem Busdepot vfdb 4/2014, 132–135.
- [4] Lutz Erbe, Moderne Elektrobusse stehen häufig in alten Busabstellhallen, s+s report, 2/2017 13–16.
- [5] VdS-Richtlinien 3103: 2016-05 Lithium Batterien.
- [6] Bis 2030 sollen 100 Elektrobusse unterwegs sein, Die Glocke, 29.08.2018.
- [7] Leise Riesen schonen Umwelt, Westfälische Nachrichten, 29.08.2019.

Eckhard Schläfke,
Betriebsleiter Verkehrsbetrieb,
Stadtwerke Münster GmbH, Münster
Bernd Große-Schermann, Dipl.-Ing. (FH),
Schadenverhütung / Risikoberatung,
Provinzial NordWest Konzern, Münster
Dr. Georg Scholzen, Diplom-Chemiker,
Schadenverhütung / Risikoberatung,
Provinzial NordWest Konzern, Münster