

# Speicherung der aus Bremsvorgängen zurückgewonnenen Energie in Netz-Randbereichen: Erfahrungen im Kölner Stadtbahnnetz

Batteriebetriebene Elektrofahrzeuge werden in den kommenden Jahren bei Nutzfahrzeugen und Pkw stark an Bedeutung gewinnen. Aufgrund der gesetzlichen Vorgaben zur Luftreinhaltung übernehmen Unternehmen des öffentlichen Nahverkehrs sowie der Kommunen hierbei aktuell eine Vorreiterrolle bei der Einführung. Die Suche der Fahrzeughersteller nach einer Second Life-Verwendung für Batterien aus Fahrzeugen spielt dabei eine große Rolle. Anwendungen für Energiezwischenspeicherung im betrieblichen Alltag, die bisher nicht wirtschaftlich darstellbar waren, können perspektivisch realisierbar werden. Daraus ergeben sich neue Herausforderungen für die Energieinfrastruktur. Aber auch die aufzubauende Ladeinfrastruktur für batteriebetriebene Elektrofahrzeuge ist in die Betrachtung aufzunehmen. Der Beitrag führt durch die von den Kölner Verkehrs-Betrieben (KVB) in diesem Zusammenhang angedachten Ideen bzw. bereits realisierten Lösungen.

## Saving of the Energy Regained from Braking Processes in Network Outer Areas: Experience from the Cologne Tram Network

Battery-operated vehicles will become greatly more significant in the coming years, both for commercial vehicles and cars. Due to the statutory clean air regulations, public transport operating companies and councils are currently the leaders in their adoption. The search by the vehicle manufacturers for a second life use for batteries from vehicles is another major factor. Applications for intermediate energy storage in everyday operation, which were not economically conceivable until now, may become practical. This will lead to new challenges for the energy infrastructure, and the charging infrastructure for battery-operated vehicles also has to be included in the considerations. The paper presents ideas in this regard from Cologne public transport operator KVB, and some already implemented solutions.

## 1 Ausgangslage

Die Klimaschutzziele (Bild 1) der Bundesrepublik Deutschland für 2020 sind mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht mehr zu errei-

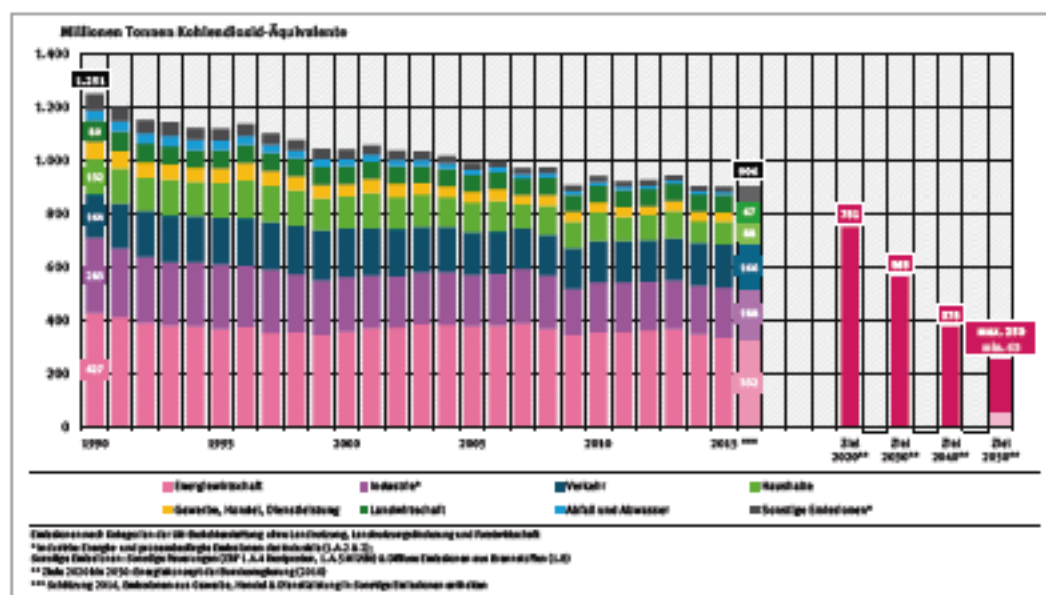


Bild 1 Treibhausgasemissionen in Deutschland und Klimaschutzziele (Quelle: Umweltbundesamt, Stand 05/2017)

chen. Die Treibhausgasemissionen stagnieren auf hohem Niveau, und insbesondere die Emissionen aus dem Verkehrsbereich nehmen sogar zu.

Gründe hierfür sind die zunehmende Mobilität von Personen und die zunehmende Leistungserbringung im Güterverkehr. Der mit der Verkehrsleistung verbundene notwendige Energieverbrauch stieg darüber hinaus in einem noch stärkeren Maße, als die Emissionen vermuten lassen. Auffallend ist, dass der Verkehrssektor als einziger Sektor eine signifikante Zunahme des

Endenergieverbrauchs aufweist, wobei alle anderen Sektoren rückläufig sind (Bild 2).

Vergleicht man in diesem Zusammenhang den Anteil erneuerbarer Energien bei der Leistungserbringung im Verkehr, so fällt der deutlich kleine Anteil in diesem Sektor auf (Bild 3).

Unterlegt man für die kommenden Jahre noch eine Zunahme der Verkehrsleistung, mit der nach Maßgabe einer Reihe von Studien zu rechnen ist [1], [2], so wird in absehbarer Zeit mit einer Reduzierung der Treibhausgasemissionen nicht gerech-

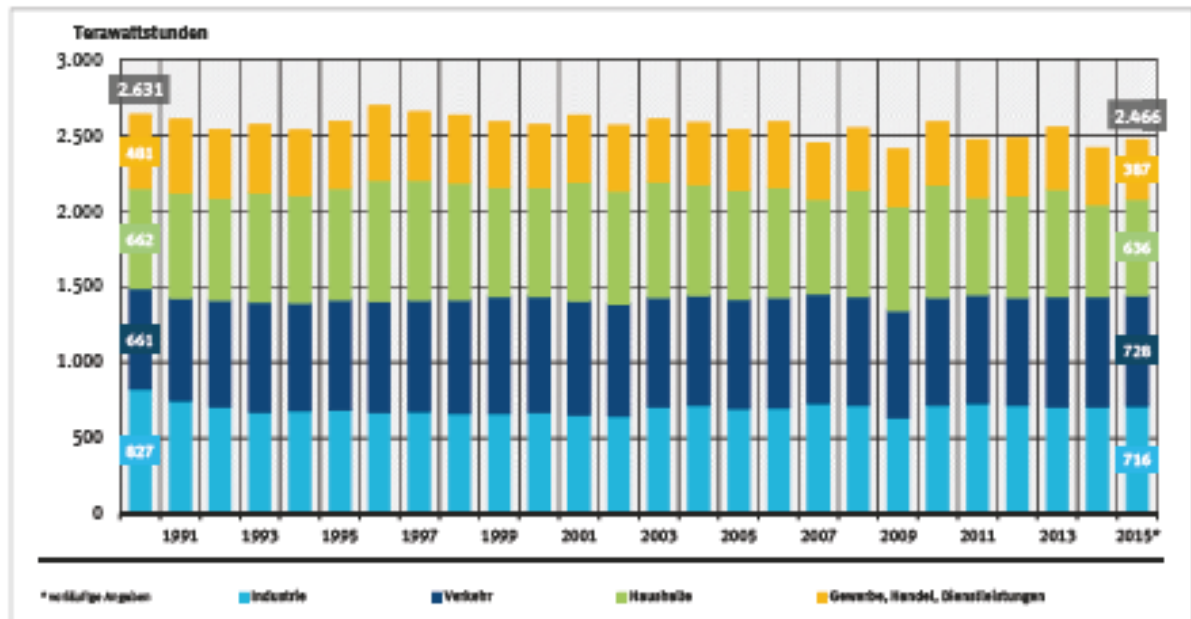


Bild 2 Entwicklung des Endenergieverbrauchs nach Sektoren (Quelle: Umweltbundesamt, Stand 07/2016)

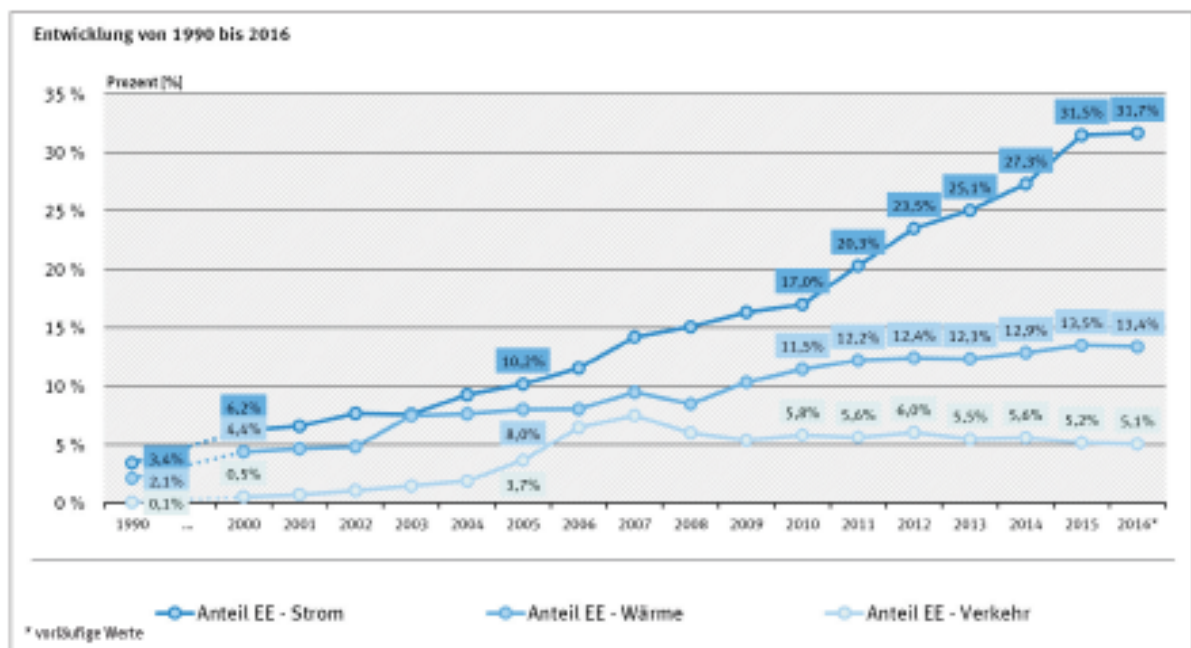


Bild 3 Anteil erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch (Quelle: Umweltbundesamt, Stand 02/2017)

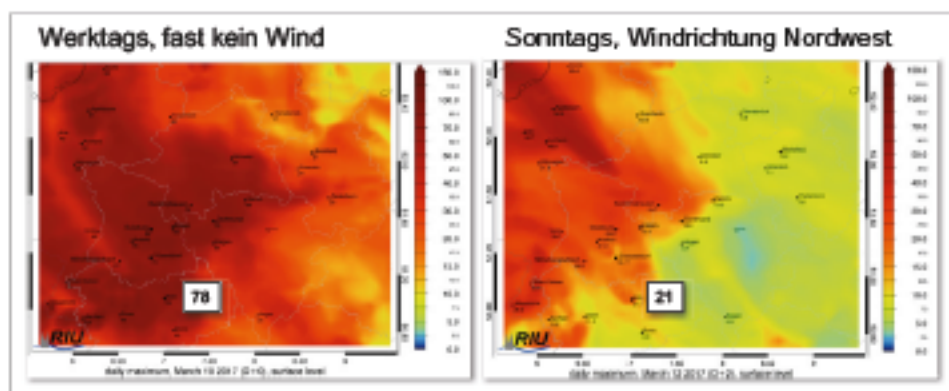


Bild 4 NOx-Emissionen in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  in Köln (Quelle: Landesumweltamt NRW und eigene Angaben)

net werden können, falls nicht der Anteil sauberer Quellen am notwendigen Energieverbrauch deutlich erhöht wird.

Am Beispiel der NOx-Emissionen in Köln, die Bestandteil der Gesamtemissionen sind und besondere Aufmerksamkeit durch die Klagen der Umwelthilfe erhalten haben, sei das Problemfeld kurz beschrieben. Werktags werden die NOx-Grenzwerte regelmäßig überschritten. In Bild 4 ist links die Situation an einem windstillen werktäglichen Freitag dargestellt (Basis: Veröffentlichte Messwerte des Landesamts für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW am 10.03. und 12.03.2017), wobei als Einzelwert der Tageshöchstwert angegeben ist. Auf der rechten Bildseite ist der darauffolgende Sonntag mit einer Windrichtung Nordwest gezeigt. Aus Bild 4 wird klar, dass die NOx-Grenzwertüberschreitung nicht nur ein Problem der Stadt Köln oder des Landes Nordrhein-Westfalen ist, sondern inzwischen ein europäisches länderübergreifendes Problem.

Die langjährige lokale Zahlenreihe in Köln zeigt darüber hinaus deutlich den Trend zur Stagnation bzw. den Anstieg der Emission, wie er bereits auf Bundesebene dargestellt bzw. gemessen werden konnte (Bild 5).

Überdeutlich wird aber auch, dass trotz des multinationalen Problems der Treibhausgasemissionen dringend lokale Maßnahmen ergriffen werden müssen, die eine signifikante Reduzierung der Emissionen nach sich ziehen. Sollen die Grenz- und Zielwerte in naher Zukunft eingehalten werden, müssen diese Maßnahmen kurz- und mittelfristig umsetzbar sein.

Solche technischen Lösungen und ihre lokale Umsetzung können beispielsweise sein:

- Effizienzsteigerung durch die Vermeidung von Verlusten: Die Speicherung der Rekuperationsenergie von Stadtbahnen und die Entnahme bei Spitzenbedarfen kann deutlich zur Reduzierung der Energiespitzen beitragen und den Energieverbrauch senken.
- Übergang bei der Antriebstechnologie von emittierend auf lokal emissionsfrei: Einführung eines Elektromotors als Antriebskonzept, wie ihn das Kölner Verkehrsunternehmen schon mit der ersten E-Buslinie und für die weitere Inbetriebnahme von 50 E-Bussen aufgezeigt hat. Damit wird die Voraussetzung geschaffen, dass der für die Mobilität notwendige Energiebedarf erneuerbar bereitgestellt werden kann.
- Vermehrte Nutzung von erneuerbaren Energien auch im Verkehrssektor, wobei die unterschiedlichen Produktions- und Verbrauchszeiten ein erhebliches Maß an vorhandenen Kapazitäten für die Zwischenspeicherung von Energie bedingen.

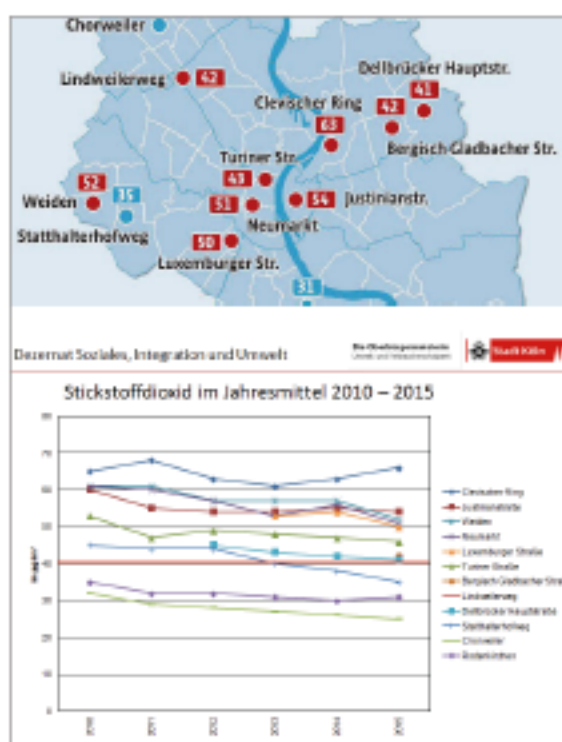


Bild 5 Entwicklung der NOx-Emissionen an ausgewählten Messstationen in Köln (Quelle: Stadt Köln, Präsentation vom 28.09.2016 und eigene Angaben)

## 2 Mögliche technische Lösungen zur Reduzierung von Emissionen

### 2.1 Effizienzsteigerung durch die Vermeidung von Verlusten

Die KVB setzen bereits seit einigen Jahren eine Kondensatorbank zur Speicherung der Bremsenergie von Stadtbahnwagen an vier Stellen in ihrem Stadtbahnnetz ein. Die Lage der Energiespeicher ist so gewählt, dass eine bremsende und damit rekuperierende

Stadtbahn selten oder nie eine anfahrende Stadtbahn in ihrer Nähe hat, da ansonsten Bremsenergie verloren ginge.

Darüber hinaus kann ein Energiespeicher auch zur Netzstabilisierung verwendet werden, damit die am Fahrdraht anliegende Netzspannung nicht unter 500 V fällt. Ein solcher Spannungsfall ist dann kritisch, wenn im Kernnetz viele Anfahrvorgänge gleichzeitig erfolgen und so die Netzspannung für Anfahrvorgänge nicht mehr ausreicht.

Damit ergeben sich die technisch sinnvollen Lagen von Energiespeichern in den Außenästen des Netzes und im eigentlichen innerstädtischen Kernnetz.

Aufgebaut wurden in der letzten Dekade vier Energiespeicher im Netz der Stadt Köln, wobei zwei Speicher an Außenästen des Netzes und zwei im Kernnetz platziert wurden.

Anhand der durchgeführten Analysen konnte die technologische Funktionsfähigkeit der Speicher nachgewiesen werden, allerdings war die Amortisationszeit mit 71 Jahren bei weitem nicht akzeptabel. Durchgeführt wurde die Kostenanalyse auf Basis der ermittelten Werte aus dem Jahr 2008.

Zu ähnlichen betriebswirtschaftlichen Ergebnissen kommt [3] bei Analysen fahrzeugseitiger Speicher, wo Amortisationszeiten für Batteriespeicher von ca. 15 Jahren angegeben werden.

Es wird damit deutlich, dass der flächendeckende Einsatz von Energiespeichern ohne einen technologischen Impuls, beispielsweise durch signifikante Weiterentwicklungen, oder eine erhebliche Preissenkung wirtschaftlich nicht darstellbar sein wird.

## 2.2 Übergang bei der Antriebstechnologie

Mit der erfolgreichen Inbetriebnahme von acht batteriebetriebenen Bektrobussen (Bild 6) hat das Kölner Verkehrsunternehmen die Alltagstauglichkeit von emissionsfreien Bussen auf einer Innenstadtlinie nachgewiesen. Der Betrieb erfolgt durch den Verzicht von Zusatzheizungen auf Dieselmotor vollständig lokal emissionsfrei. Damit wurde eine Voraussetzung geschaffen, um die für die Alltagsmobilität der Kölner Bürger und die Gäste der Stadt notwendige Energie erneuerbar bereitzustellen. Das Verkehrsunternehmen kauft zu 100 % grünen Strom ein und trägt neben der Vermeidung von Treibhausgasen direkt dazu bei, dass der Anteil an erneuerbaren Energien am Endenergieverbrauch für Verkehrsleistung steigt.



Bild 6 Inbetriebnahme der Linie 133 mit batteriegestützten Elektrobussen

Wird dieses Konzept auf den Pkw- und Nutzfahrzeugbereich übertragen, besteht die Möglichkeit, den Anteil erneuerbarer Energien bei der Erbringung von Verkehrsleistungen nochmals erheblich zu steigern.

Die Frage, welche Rolle das Kölner Verkehrsunternehmen in diesem Zusammenhang spielen kann, wird nachfolgend erläutert. An dieser Stelle sei angemerkt, dass die notwendigen Stromtankstellen für die E-Mobilität auch in den urbanen Räumen aufzubauen sind und damit die sowieso schon knappen Flächen weiter verdichtet werden.

## 2.3 Vermehrte Nutzung erneuerbarer Energien im Verkehrssektor

Aktuell tragen im Wesentlichen die Biokraftstoffe im Verkehrssektor zur Nutzung erneuerbarer Energieträger bei. Allerdings stagniert ihre Verwendung in den letzten Jahren bzw. ging in den vergangenen zwei Jahren sogar wieder zurück [4]. Sollen erneuerbare Energien jedoch vermehrt im Verkehrssektor Verwendung finden, so muss diese möglichst energiesparend sein und vom Endnutzer akzeptiert werden.

Die in Bild 7 gezeigte Gegenüberstellung möglicher Antriebsarten und Kraftstoffkombinationen kommt zu einem energetisch eindeutigen Ergebnis.

Demnach ist die Kombination eines batterieelektrischen Fahrzeugs mit direkter Stromnutzung die energieeffizienteste Art der Energieerzeugung, die für erneuerbare Energien eine sinnvolle größere Verwendung im Verkehrssektor bietet. Insofern kann die Kombination elektrischer Antriebe mit erneuerbaren Energien die Emission von Treibhausgasen deutlich senken.

Bzüglich der Energieerzeugung kommt der Fotovoltaik für den urbanen Raum dank ihrer einfachen Installationsmöglichkeit auf Dächern eine besondere Bedeutung zu. Zu erwarten ist, dass aufgrund der in den vergangenen Jahren gefallenen Investitionskosten diese Technik vermehrt eingesetzt wird.

Die Produktions-Tagesgang-Linie mit ihrem Maximum um 12 Uhr und keiner Produktion außerhalb der Sonnenscheinstunden macht eine Zwischenspeicherung notwendig, sobald sich ein weiter steigendes Energieangebot aus Fotovoltaikanlagen realisiert. Erhöht wird diese Notwendigkeit zudem durch die noch überlagernde Volatilität der Windkraftproduktion. Wie wesentlich diese Schwankungen sind, zeigt die Darstellung des Stromverbrauchs in verschiedenen Netzen für den April 2016 (Bild 8). Unterlegt man diese Darstellung mit der Information, dass in 2016 die Windkraft mit 11,9 und die Fotovoltaik mit 5,9 % einen Gesamtanteil an der Bruttostromerzeugung in Höhe von zusammen 17,8 % hatten, so wird die Notwendigkeit von Zwi-

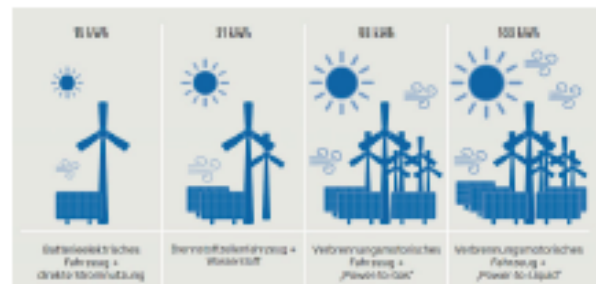


Bild 7 Strombedarf aus erneuerbaren Energien bei verschiedenen Antriebs- und Kraftstoffkombinationen pro 100 km (Quelle: Agora Verkehrswende)

55,7%

## Speicherung zurückgewonnener Energie aus Bremsvorgängen

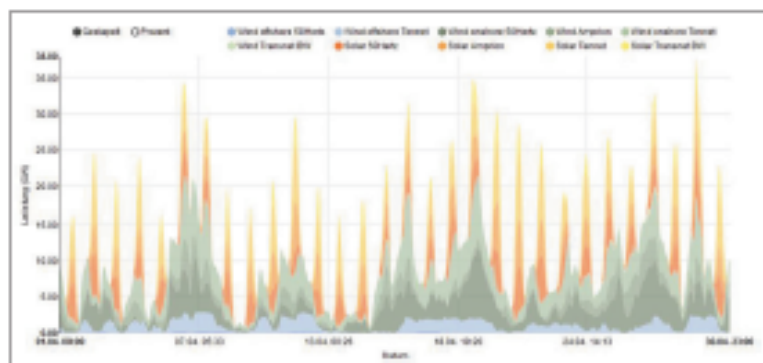


Bild 8 Stromverbrauch in verschiedenen Netzen  
(Quelle: [http://ruhrkultur.de/wp-content/uploads/2016/05/Stromverbrauch\\_Deutschland\\_April\\_2016\\_SE.jpg](http://ruhrkultur.de/wp-content/uploads/2016/05/Stromverbrauch_Deutschland_April_2016_SE.jpg))

scherspeicherung größer, sofern auf die Zuschaltung von fossilen Kraftwerken perspektivisch vermehrt verzichtet werden soll.

### 3 Entwicklung der Elektromobilität im Pkw-Bereich

Wird der Anteil an Elektrofahrzeugen in den kommenden Jahren ansteigen, so wird die Recycling-Fähigkeit oder weitere Verwendung (Second Life) der Batterien dieser Fahrzeuge zu klären sein, da deren Maximaladekapazität über die Lebensdauer stark abfällt und die Batterien deshalb durch neue ersetzt werden müssen. Alle großen Pkw-Hersteller suchen deshalb aktuell nach Anwendungsmöglichkeiten für ihre Second Life-Batterien und beginnen den Batteriekreislauf, d. h. den Recycling-Kreislauf, zu definieren.

Insbesondere an die Speicherung von Stromüberschüssen wird hierbei gedacht.

Es ist in diesem Zusammenhang sehr wahrscheinlich, dass sich der Preis für Batterien des Second Life deutlich vom Preis einer Neubatterie unterscheiden wird. Angaben darüber sind leider von den großen Automobilherstellern noch nicht veröffentlicht. Es ist aber davon auszugehen, dass sich für eine Reihe von Projekten und Anwendungen für Energiespeicher, die in der Vergangenheit wirtschaftlich nicht sinnvoll umzusetzen waren, in der nahen Zukunft eine Realisierungschance bietet.

Dass diese Entwicklung schon jetzt eine Dynamik in sich trägt, zeigt der steigende Anteil von Batteriespeichern für die Primärregelleistung in den Stromnetzen, wobei die installierte Leistung, basierend auf den Zahlen in [5], von ca. 15 MW in 2014 auf inzwischen knapp 160 MW in 2016 angewachsen ist.

### 4 Bedeutung für das Kölner Verkehrsunternehmen

Die KVB beobachten die Preisentwicklung aktuell mit steigendem Interesse. Insbesondere, da die Stadtbahnen mit Gleichstrom betrieben werden. Denn unterstellt man einen direkten Anschluss an das Gleichstromnetz, so können die Anschlusskosten von regenerativen Energieerzeugern deutlich sinken, da in der Regel kein Umrichter benötigt wird. Die geringeren wirtschaftlich darstellbaren Reichweiten bei der Übertragung von Strom in Gleichstromnetze ist für einen urbanen Raum wie das Kölner Stadtgebiet nicht relevant, da die Stadtbahnlagen und Unterwerke der KVB in jedem Stadtteil mehrfach vorhanden sind. Unterlegt man

weiterhin, dass für die Stromtankstellen für Elektroautos und -busse im Wesentlichen ebenfalls Gleichspannung mit 700 V Spannung benötigt wird, werden sich die möglichen Einspeisepunkte für regenerativ erzeugten Gleichstrom noch erhöhen.

Wichtig ist in diesem Zusammenhang, dass die mögliche Zwischenspeicherung im Gleichstromnetz ebenfalls im hochverdichteten urbanen Kölner Raum aufzubauen ist. Insofern werden Design, Platzbedarf und Möglichkeiten einer einfachen unterirdischen Realisierungsmöglichkeit wichtige Details darstellen. Gute und kostengünstige Lösungen von den hierbei zu beteiligenden wesentlichen Industrien, d. h. der Stromerzeuger und der Bauindustrie, werden Ziel der möglichen Entwicklung sein.

### 5 Fazit

Die nach wie vor unzureichende Senkung der Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor werden zur Folge haben, dass der notwendige Energiebedarf für unsere Mobilitätsansprüche schnell von fossiler Bedarfsdeckung hin zu erneuerbaren Energien gehen muss, um einen deutlichen Beitrag zur Reduktion der Emissionen zu leisten. Hierbei kommt der Energiezwischenspeicherung eine wichtige Aufgabe bei der Zusammenführung von Stromproduktion und -abnahme zu, die insbesondere bei Gleichstromnetzen sinnvoll erscheint. Dies kann in großen städtischen Räumen von den Verkehrsunternehmen durch bereits bestehende Gleichstromnetze der Stadtbahnsysteme stark unterstützt werden. Besonderes Augenmerk wird dabei auch auf die städtebauliche Verträglichkeit der notwendigen Bauten und den knappen zur Verfügung stehenden Raum in den urbanen Räumen zu legen sein.

### Literatur

- [1] Deutsches Mobilitätspanel (MOP) – Wissenschaftliche Begleitung und Auswertungen. Bericht 2015/2016: Alltagsmobilität und Fahrleistung; Forschungsprojekt FE-Nr. 70.923/2015
- [2] Klimafreundlicher Verkehr in Deutschland – Weichenstellungen bis 2015. WWF, BUND, Germanwatch, NABU, VCD, Stand 06/2014.
- [3] Firma Bombardier: Präsentation Konzept Stadtbahnwagen am 23.10.2013 bei den KVB.
- [4] Daten des Umweltbundesamts, Stand 02/2017.
- [5] Bereitstellung von Primärregelleistung durch stationäre Großbatteriespeicher. LRST Kolloquium Regenerative Energien SS 2016; Vortrag von Dr. Peter Stenzel am 31.05.2016, Forschungszentrum Jülich, Institut für Energie- und Klimaforschung – Systemforschung und Technologische Entwicklung (EK-STE).