

# Harmonisierung von Elektromobilität und verteilten Energienetzen

Ein verteilter Regelungsansatz mit modellprädiktiver Regelung

Tobias Sprodowski und Jürgen Pannek, Universität Bremen

## Harmonization of Electric Mobility and Distributed Energy Networks

The increasing market share of electric vehicles and the deployment of renewable energies gives rise to new challenges regarding both the energy network infrastructure as well as mobility. The solution of the arising problems allows for synergies among these fields. The batteries of electric vehicles can be used as distributed energy storage systems to retain the stability of the energy network. To ensure the availability of the latter in the network, the vehicles must stay connected for a certain time intervals. As the batteries may also be unloaded, this leads to a paradigm change in contrast to the available concepts. In a first step, existing charging stations could be used for this purpose. To access the battery as a storage continuously, inductive load systems could be installed in the streets. Here, deployment of the latter on motorways would simultaneously eliminate the problem of range of electric vehicles. A necessary requirement for such a combined traffic and energy system is a distributed control mechanism. The goal of this article is to show possibilities to reduce the necessary coordination while still retaining stability of the overall system.

### Keywords:

distributed model predictive control, optimal control, autonomous connected vehicles

Die zunehmende Präsenz von Elektrofahrzeugen sowie der Ausbau erneuerbarer Energien stellen sowohl das Mobilitätsverhalten wie auch die Infrastruktur der Energienetze vor neue Herausforderungen. Die Lösung dieser Probleme erlaubt dabei Synergieeffekte zwischen diesen Feldern. So stellen die Elektrofahrzeuge verteilte Speicherkapazitäten dar, die bei der Aufrechterhaltung der Netzstabilität dringend erforderlich sind. Um deren Präsenz im Gesamtnetz zu gewährleisten, müssen diese zumindest abschnittsweise dem Energienetz zur Verfügung stehen. Hierzu ist ein Gedankenwechsel notwendig, da die Batterien der Fahrzeuge hierzu nicht nur geladen, sondern auch entladen werden müssen. Seitens der Infrastruktur können hierfür in einem ersten Schritt Ladestationen genutzt werden. Zur dauerhaften Präsenz der Fahrzeugenergiespeicher im Energienetz ist zudem die drahtlose Ladung und Entladung durch induktive Energieübertragung in den Straßen denkbar. Die Umsetzung auf Bundesautobahnen würde in diesem Zuge die Reichweitenrestriktion von Elektrofahrzeugen eliminieren. Eine notwendige Voraussetzung für ein derartiges System ist die verteilte Regelung sowohl der Fahrzeuge wie auch des Energienetzes. Ziel dieses Beitrags ist es, die nötige Koordinierung zu minimieren und dennoch ein stabiles Verhalten des Gesamtsystems sicherzustellen.

Die Entwicklung von automatisierten bzw. autonomen Fahrzeugen nimmt in der Automobilindustrie einen fortlaufend höheren Stellenwert ein. Da insbesondere komplexe Verkehrssituationen wie Straßenkreuzungen beherrschbar bleiben müssen, verlagert sich der Schwerpunkt zunehmend vom autarken, autonomen Fahren auf das koordinierte autonome Fahren, in dem die Fahrzeuge zur Koordination Informationen austauschen und lokal auswerten. Hierbei sollen in der Kommunikation auch die Beschränkungen der drahtlosen Übertragung berücksichtigt werden, sodass möglichst wenige Fahrzeuge miteinander möglichst wenig kommunizieren müssen, jedoch ein stabiles Verhalten des Gesamtsystems sichergestellt ist. Gleichzeitig werden vermehrt Elektrofahrzeuge entwickelt, die aufgrund ihres hohen Energiebedarfs das Stromnetz ebenso vor eine Herausforderung stellen wie der im Rahmen der

Forcierung erneuerbarer Energien erfolgende Wechsel von großen zentralen Kraftwerken hin zu kleinen und weitläufig verteilten Erzeugersystemen. Seitens der Fahrzeuge ist somit nicht nur die Beherrschbarkeit von komplexen Verkehrsszenarien sicherzustellen, sondern im Bereich der Elektromobilität die Berücksichtigung von begrenzten Ressourcen wie Ladekapazität und Lademöglichkeiten einzuplanen. Dazu ist eine Berücksichtigung der Netzauslastung notwendig, um die Netzstabilität zu gewährleisten. Dies bedingt wiederum eine effiziente und vorausschauende Fahrweise und eine Koordination zwischen koordinierten autonomen Fahrzeugen und eine Koordination seitens des Infrastrukturanbieters über die aktuelle Verteilung von angeschlossenen Elektrofahrzeugen, um die Kapazität zu bestimmen. Dieses nicht-kooperative, aber koordinierte Mehrspielerprinzip kann direkt auf Netzbetreiber erweitert werden. So können über Ladestationen die Elektrofahrzeuge zu verteilten Energiespei-



Tobias Sprodowski arbeitet als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Arbeitsgruppe Dynamics in Logistics an der Universität Bremen.



Prof. Dr. Jürgen Pannek leitet die Arbeitsgruppe Dynamics in Logistics an der Universität Bremen im Fachbereich Produktionstechnik.

spr@biba.uni-bremen.de  
www.dil.biba.uni-bremen.de

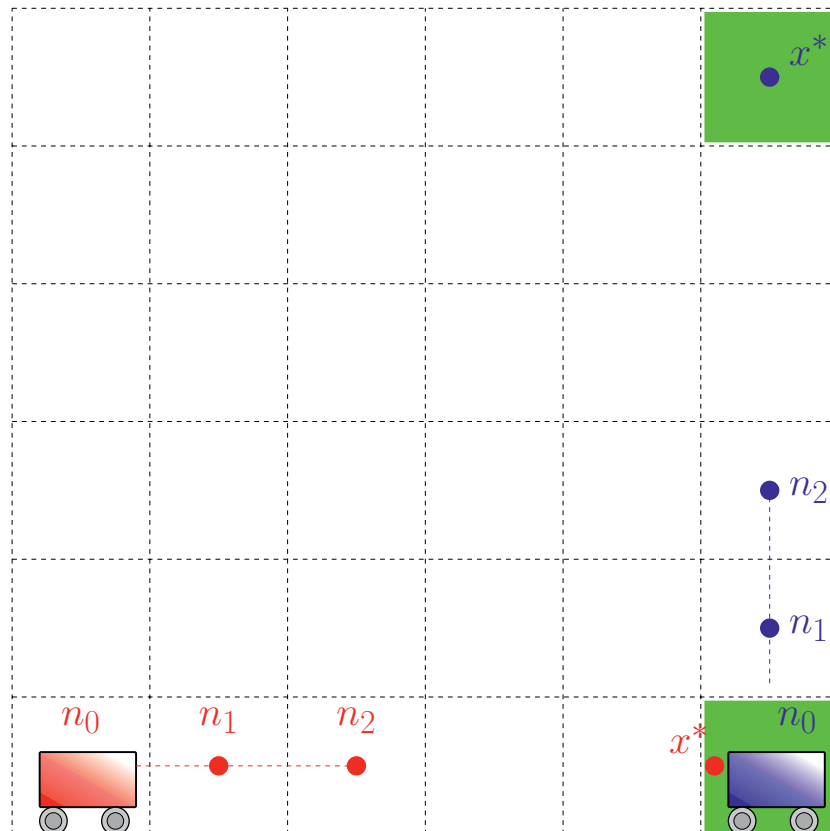
chern umfunktio-  
niert werden, um  
für eine optimale  
Auslastung der  
verteilten Energie-  
erzeuger zu sor-  
gen.

Wir betrachten in  
diesem Beitrag  
einerseits die not-  
wendige Koordi-  
nation zwischen  
Fahrzeugen, wo-  
bei wir zur Illu-  
stration die komplexe  
Standardsituation  
einer Kreuzung  
auswählen. Die  
Fahrzeuge müs-  
sen sich dabei  
untereinander so  
koordinieren, dass  
eine kollisionsfreie  
Durchfahrt mit  
sowohl geringer  
Wartezeit als auch  
wenigen Anhalte-  
vorgängen möglich ist. Andererseits zeigen wir  
auf, wie das Konzept der prädiktiven Regelung  
direkt auf den Netzbetreiber erweitert werden  
kann, um die Dynamik und Kapazitäten der  
Elektrofahrzeuge hinsichtlich Netzauslastung  
und -stabilität zu nutzen.

Dazu werden wir zunächst den Stand der Tech-  
nik, die gewählte Regelungsmethode und die  
Problemstellung unseres Straßenkreuzungs-  
szenarios präsentieren, bevor wir auf die nötige  
Koordination zwischen den einzelnen Fahrzeu-  
gen und dem Infrastrukturbetreiber eingehen.

### Stand der Technik

In der Regelungstechnik wird ein Fahrzeug  
durch eine Systemdynamik dargestellt, die die  
für die Regelungsaufgabe relevanten Eigen-  
schaften des Fahrzeugs repräsentiert. Dieses  
Modell beschreibt z. B. Position und Ausrich-  
tung des Fahrzeugs und entsprechende Ände-  
rungen. Zusätzlich unterliegen diese variablen  
Beschränkungen, wie z. B. einer maximalen Ge-  
schwindigkeit. Mithilfe der Dynamik kann man  
eine Bewegungstrajektorie berechnen, die z. B.  
die Positionen des Fahrzeugs zu bestimmten  
Abtastzeitpunkten beschreibt. Um das Fahr-  
zeug bezüglich eines gewünschten Ziels zu re-  
geln, ist in jedem Zeitschritt eine Stellgrößen-  
rückführung, z. B. in Form der Änderung der  
Beschleunigung, zu berechnen.



**Bild 1: Beispiel mit zwei Fahrzeugen und zugehörigen Prädiktionen und Ziel in einer quantisierten Kreuzung.**

Für die verteilte optimale Regelung mit Zu-  
standsbeschränkungen hat sich in den letzten  
Jahren die Modellprädiktive Regelung (MPC)  
bewährt [1]. Diese Methode basiert auf der  
Lösung eines Optimalsteuerungsproblems,  
das für einen Messwert eine Zielfunktion, ba-  
sierend auf der Prädiktion der Systemdynamik,  
minimiert und daraus eine optimale Steue-  
rung aus Haltegliedern 0-ter Ordnung für den  
offenen Regelkreis generiert. Durch Anwen-  
dung des ersten Steuerelements und anschlie-  
ßende Messung des Zustands ist die Methode  
iterativ anwendbar und stellt eine statische Zu-  
standsrückführung dar.

Die Fahrzeuge können als Multi-Agenten mo-  
delliert werden, die gleiche Eigenschaften,  
aber unterschiedliche Ziele haben. Somit er-  
gibt sich ein verteiltes System, in dem jeder  
Agent für sich lokal optimiert. Der verteilte  
Ansatz ist dabei der zentralen Version vorzu-  
ziehen, da die Reduktion der Komplexität die  
Echtzeitfähigkeit ermöglicht. Für diese Heran-  
gehensweise bietet sich die Methode der Ver-  
teilten Modellprädiktiven Regelung (DMPC) an  
[2], die das klassische MPC auf verteilte Sys-  
teme verallgemeinert.

### Verteilte Modellprädiktive Regelung

In der verteilten Regelung wird das fiktive Ge-  
samtsystem in Teilsysteme zerlegt. Hierbei be-