

# **Vielfältige Einsatzmöglichkeiten von Antriebssystemen in der elektrischen Energietechnik**

der

Fakultät Elektrotechnik, Informationstechnik und Medientechnik  
der Bergischen Universität Wuppertal

vorgelegte

kumulierte Habilitationsschrift

zur Erlangung der Lehrbefähigung im Fach

**Elektrische Energietechnik**

von

**Dr.-Ing. Ralf Wegener**



## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Zusammenfassung der Forschungsarbeiten</b>	<b>3</b>
2.1 Elektrische Maschinen . . . . .	3
2.2 Windkraft . . . . .	10
2.3 Verkehr . . . . .	18
<b>Chronologisches Verzeichnis der wissenschaftlichen Veröffentlichungen</b>	<b>25</b>



# 1 Einleitung

Während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter zuerst an der Universität Dortmund und dann an der Bergischen Universität Wuppertal konnte ich an einer Vielzahl unterschiedlicher Forschungs- und Entwicklungsprojekte mitarbeiten. Bei einigen, aber bei weitem nicht bei allen, war es möglich die Ergebnisse in einer wissenschaftlichen Publikation zu veröffentlichen. Insbesondere bei den Projekten des Technologietransfers mit Finanzierung aus der privaten Wirtschaft ist das häufig aus Geheimhaltungsgründen nicht möglich. Die Bandbreite der Projekte reicht von der Auslegung elektrischer Maschinen über die Umrichtertechnik und der damit verbundenen Regelung bis hin zu reinen Softwarearbeiten.

In den letzten Jahren ist die elektrische Energieversorgung mehr und mehr in den Fokus der Öffentlichkeit gerückt, die Nutzung regenerativer Energiequellen ist im Bewusstsein der Allgemeinheit angekommen. Windkraftanlagen sind gerade im Norden Deutschlands ein alltägliches Bild und eine private Photovoltaikanlage gehört schon fast zum Standard eines Einfamilienhauses. Diese aktuelle Entwicklung spiegelt sich auch in den Forschungsarbeiten wieder. Zu Beginn meiner Tätigkeit lag der Schwerpunkt eher bei den Antrieben, insbesondere den Linearantrieben und den damit verbundenen Nebengebieten wie der Diagnose von Antriebssystemen. Technologien zur Nutzung regenerativer Energiequellen wie die Windkraft oder die Photovoltaik haben einen immer größer werdenden Anteil der Forschungsarbeit eingenommen. In den letzten Jahren ist der Verkehrssektor mit hybriden Antriebssystemen und die Ladetechnik von Elektrofahrzeugen hinzugekommen.

Seit 2020 ist die Anzahl der Veröffentlichungen zum einen auf Grund zweier längerer Elternzeiten und zeitweiser Teilzeitbeschäftigung und zum anderen auf Grund von Corona deutlich geringer ausgefallen.



## **2 Zusammenfassung der Forschungsarbeiten**

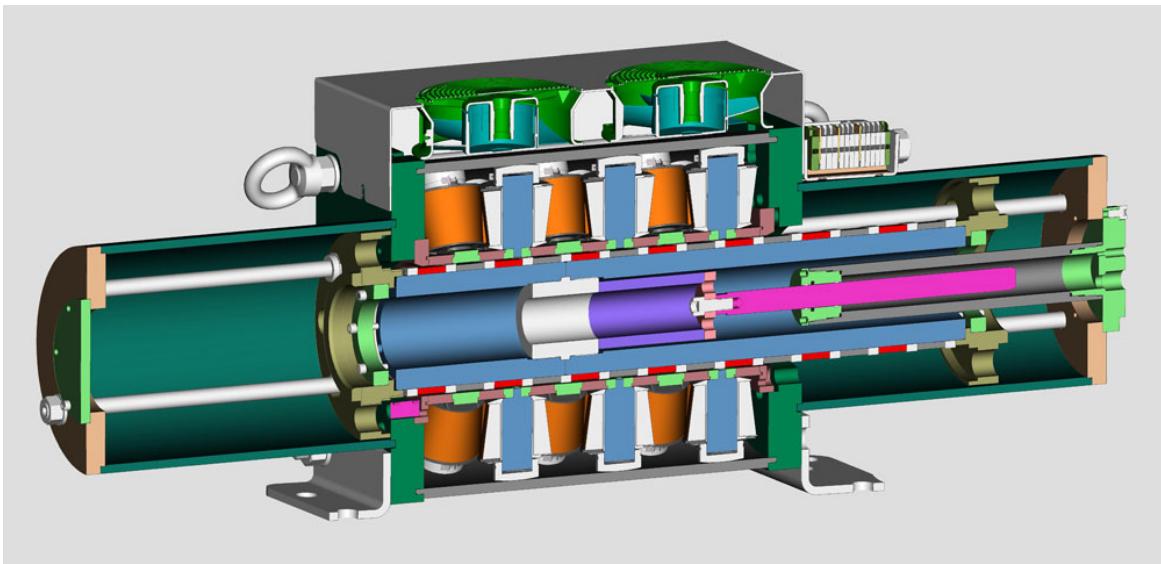
Die veröffentlichten Forschungsarbeiten lassen sich grob in drei Gebiete der Elektrotechnik gliedern. Im Kapitel Elektrische Maschinen wird im Wesentlichen das Thema der Promotion fortgeführt und zum einen weiterführende Anwendungen für den zylindrischen Linearmotor vorgestellt und zum anderen die Grundlagen vertieft. Diese Arbeiten wurden unter anderem durch ZIM-Förderprojekte aber auch durch den Technologietransfer aus der Privatwirtschaft finanziert.

Der Bereich Windkraft ist durch eine langjährige Kooperation mit einem Industrieunternehmen geprägt, für das im Rahmen des Technologietransfers der komplette Netzeinspeisemrichter für eine Windkraftanlage entwickelt wurde. Die Finanzierung erfolgte daher ausschließlich durch Drittmittel.

Im Bereich Verkehr geht es um die Mobilitätswende, was hauptsächlich durch ein großes Forschungsprojekt des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr finanziert und in Zusammenarbeit mit zwei weiteren Lehrstühlen und fünf Industriepartnern durchgeführt wurde.

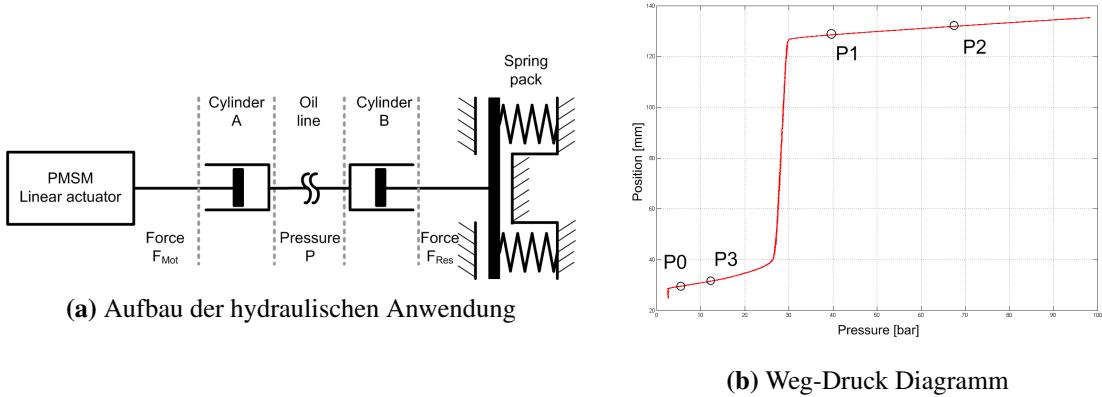
### **2.1 Elektrische Maschinen**

Im Rahmen der Promotion im Jahr 2008 [08DISS, 08IAS] ist der zylindrische Linearmotor mit hohen Kräften in Abbildung 2.1 entstanden, der daraufhin in den folgenden Jahren weiterentwickelt wurde. Er zeichnet sich durch eine im Vergleich zu marktüblichen Linearmotoren hohen Kraft in einer zylindrischen Bauform aus. Außerdem ist er durch seinen nicht gebleichten Aufbau kostengünstig mit Standardmaschinen zu fertigen.



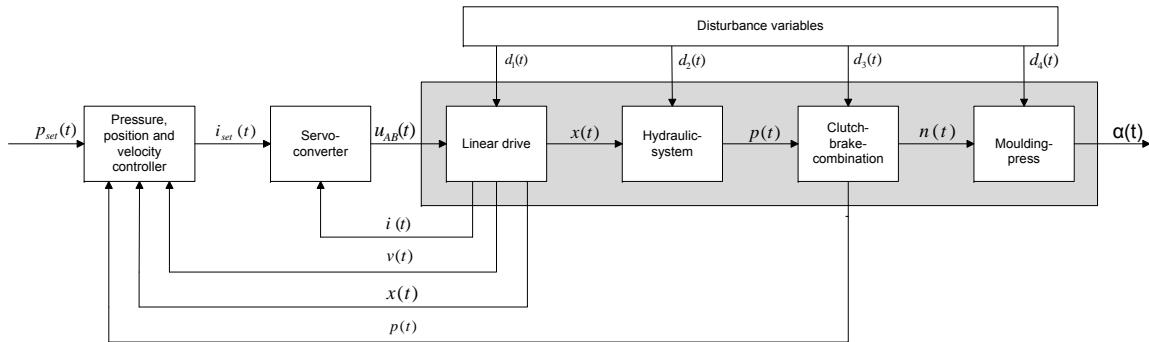
**Abbildung 2.1:** Zylindrischer Linearmotor

In [09IEMDC] wird als Anwendung dieses Linearmotors die Druckregelung einer hydraulischen Kupplungs-Brems-Kombination (KBK) zur Steuerung von Pressen für die Fertigung in der Automobilindustrie vorgestellt. Der Linearmotor erzeugt durch einen innenliegenden Hydraulikzylinder einen Druck, der ansteigend in der KBK den Pressenstößel an das Antriebsschwungrad kuppelt und bei fallendem Druck die Kupplung löst und mit in der KBK vorhandenen Federn den Abtrieb bremst. Der Aufbau ist schematisch in Abbildung 2.2a gezeigt. Durch den Hydraulikdruck kann prinzipiell sowohl die Beschleunigung als auch das Abbremsen des Pressenaktuators gesteuert werden, was jedoch keinem linearen Zusammenhang folgt. Die Nichtlinearitäten ergeben sich zum einen durch die abschnittsweise definierbare Druck-Weg-Kennlinie in Abbildung 2.2b und zum anderen durch Störeffekte, wie zum Beispiel im Öl gelöste Luft. Auch die Temperatur des Hydrauliköls hat einen maßgeblichen Einfluss auf die Kurve.



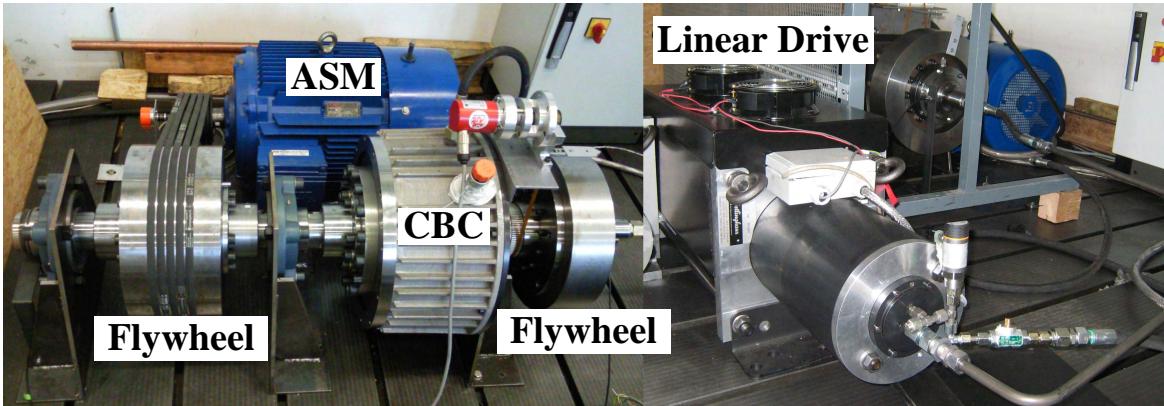
**Abbildung 2.2:** Nichtlineare Ansteuerung der Kupplungs-Brems-Kombination

Die Regelung wird sowohl durch eine Simulation [10ICCT] als auch in der Praxis mit Hilfe eines Testaufbaus [11LDIA] entwickelt. Dazu wird ein Standardumrichter mit einem zusätzlichen Regelkreis erweitert, der als Eingangsgröße den Druck des Hydraulikzylinders übergeordnet zu den schon vorhandenen Positions-, Geschwindigkeits- und Stromreglern ergänzt (siehe Abbildung 2.3).



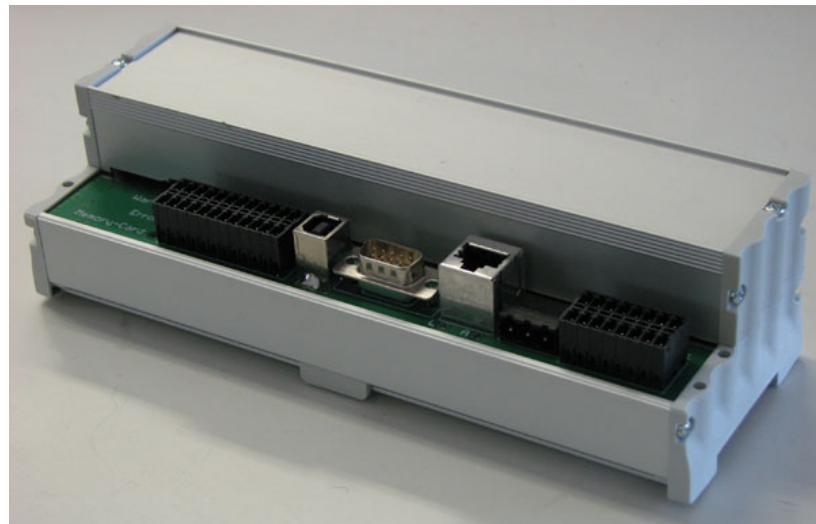
**Abbildung 2.3:** Regelstruktur des Linearmotors in der Anwendung der Pressensteuerung

Für diesen Regler konnten verschiedene Störgrößen identifiziert werden, die teilweise durch im Umrichter abgelegte Tabellen korrigierbar sind. Die Simulationen konnten am Testaufbau im Labor (siehe Abbildung 2.4) und auch in der Praxis an einer realen Presse verifiziert und optimiert werden.



**Abbildung 2.4:** Prüfstand zum testen der Regelung

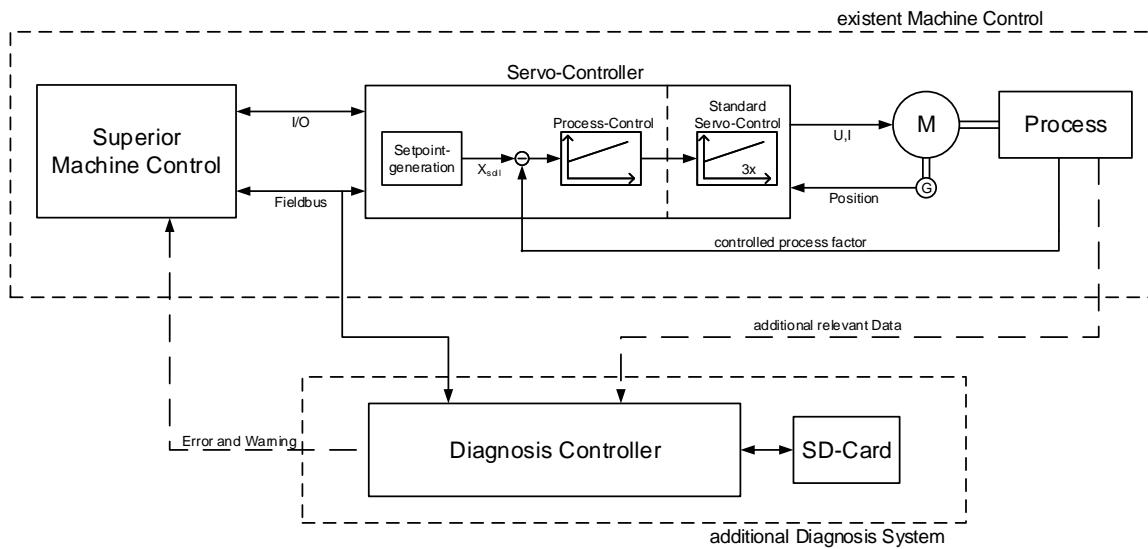
In der oben genannten Anwendung des Linearmotors für Pressen in der Automobilproduktion ist sowohl die Zuverlässigkeit als auch die vorbeugende Wartung ein sehr wichtiges Thema. In [09ISIE] wird ein Diagnosesystem basierend auf einem selbst entwickelten Mikrocontrollerboard vorgestellt, dass über den Feldbus Ethercat mit dem Antriebsumrichter verbunden ist.



**Abbildung 2.5:** Foto des entwickelten Diagnosemoduls

Das Diagnosesystem in Abbildung 2.5 erfasst alle relevanten Messgrößen über den kompletten Pressenzyklus im Regelungstakt des Umrichters und reduziert diese große Menge an Daten zuerst durch statistische Methoden und wendet dann Data Mining auf die gespeicherten Daten an, um relevante Parameter einer möglichen Abnutzung der verschiedenen Bauteile der Presse zu identifizieren. Diese werden dann an die übergeordnete Pressensteuerung gemeldet. Im Schadensfall können die auf einer SD-Karte gespeicherten Daten

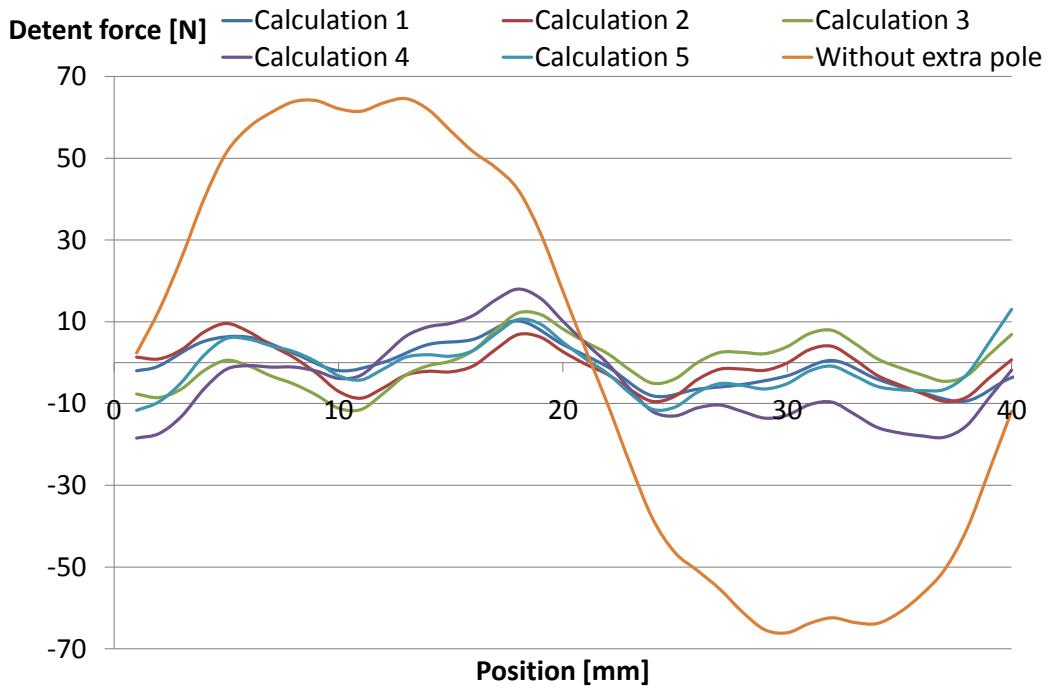
genutzt werden, um eine Fehleranalyse durchzuführen und das System weiter zu optimieren. In Abbildung 2.6 ist das Blockschaltbild des gesamten Aufbaus mit der Diagnose gezeigt.



**Abbildung 2.6:** Blockschaltbild des entwickelten Diagnosemoduls

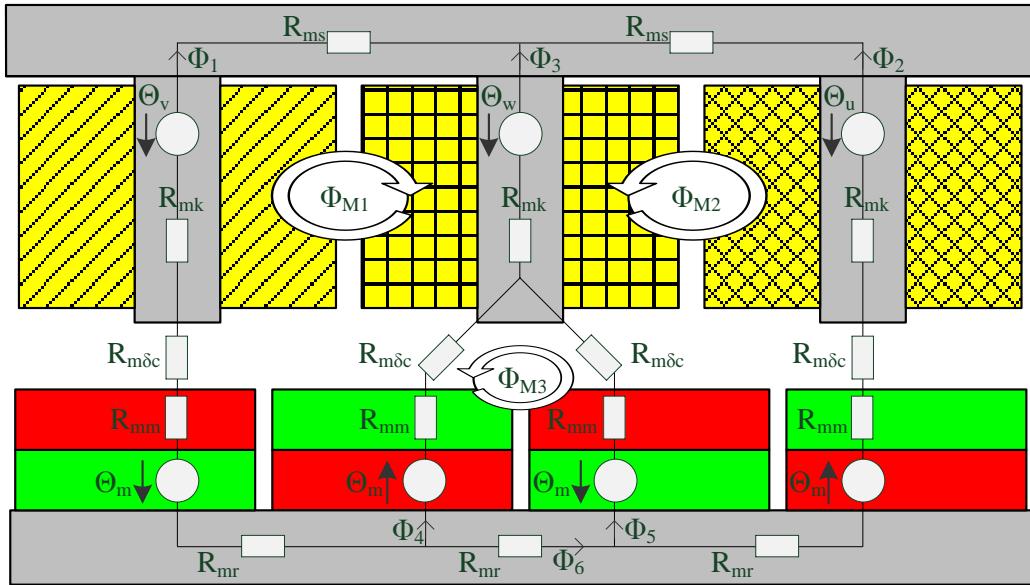
Die Rastkräfte des Linearmotors haben sich zum einen als besonderes Problem bei der Entwicklung der Regelung und zum anderen als ein Sicherheitsproblem in der oben genannten Anwendung herausgestellt. Bei einem Stromausfall oder sonstigem Ausfall des Umrichters muss gewährleistet sein, dass die Bremse aus jeder Ursprungposition allein durch die Federspeicher, sicher aktiviert wird. Sind die Rastkräfte zu hoch, können Sie dies im ungünstigsten Fall verhindern. Durch den Aufbau dieses speziellen Motors mit diskreten konzentrierten Wicklungen und durch die Randeffekte, wenn der Läufer an die Grenzen des Verfahrbereiches stößt, sind bei einer Nutzkraft von 9400 N, Rastkräfte in Höhe von  $\pm 260$  N messbar.

In [10IECON, 12IES1] werden diese Rastkräfte mit Hilfe der Feldberechnung minimiert, indem zusätzlich zu kleineren Geometrieänderungen Zusatzpole am Ende der Maschine ergänzt werden. Diese werden durch einen generischen Algorithmus so weit optimiert, bis die Rastkräfte durch die Endeffekte der Maschine auf unter 0,6 % der Nutzkraft sinken. Die Ergebnisse sind in Abbildung 2.7 visualisiert.



**Abbildung 2.7:** Rastkräfte ohne und mit zusätzlichen Polen am Ende der Maschine

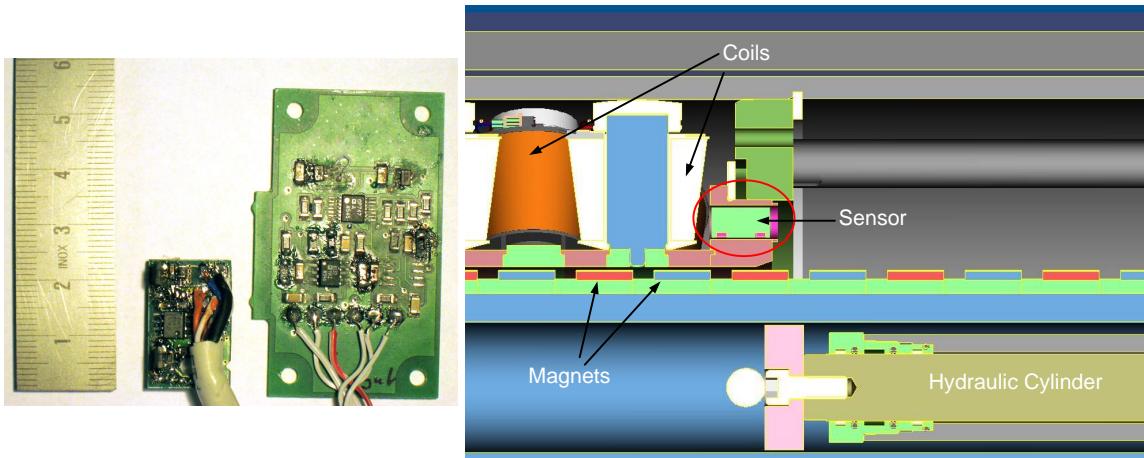
Der gesamte Designprozess des Linearmotors mit dem vereinfachten magnetischen Modell in Abbildung 2.8 wird in [15LDIA] gezeigt. Mit Hilfe dieses Modells können die Messungen des Prototyps einfach analytisch erklärt werden, was für Anpassungen an verschiedene Anwendungen sehr hilfreich ist.



**Abbildung 2.8:** Vereinfachtes magnetisches Modell des Linearmotors.

Eine solche weitere Anwendung ist die Regelung des Winkels der Abtriebswelle von der oben erwähnten Kupplungs-Brems-Kombination. Dazu muss das in Abbildung 2.3 gezeigte Regelschema um einen weiteren Regler mit Rückkopplung des Winkels erweitert werden. Dies wurde in [11AFRI1] durch eine externe Steuerung erreicht, die dem Umrichter im Regelungstakt Positionssollwerte übergibt.

Die Rotorpositionserfassung einer Synchronmaschine erfolgt normalerweise entweder über einen magnetischen Resolver oder einen optischen Inkrementalgeber. Bei Linearmotoren kommen häufig lineare optische Maßstäbe zum Einsatz, die allerdings relativ kostenintensiv und zudem stoßempfindlich sind. In [07PEDS] wird ein magnetischer Positionssensor für einen Linearmotor vorgestellt, der auf dem Hall-Effekt beruht. Der am Anfang des Kapitels vorgestellte Linearmotor verfügt auf dem Rotor über wechselweise magnetisierte Permanentmagnete, die über die Länge des Motors ein mit der Polanzahl mehrfach wechselndes annähernd sinusförmiges Magnetfeld liefern. Der neu entwickelte Sensor erfassst die Stärke dieses Magnetfelds an zwei Positionen und kann daraus die Läuferposition ermitteln. Der Vorteil der vorgeschlagenen gegenüber den konventionellen Lösungen mit einem optischen Maßstab sind die deutlich reduzierten Kosten und der Wegfall eines zusätzlichen mitbewegenden Bauteils. Dieser Sensor wird in [08ICPE] weiter optimiert, so dass beide Hall-Sensoren auf einer kleinen Platine untergebracht werden können (siehe Abbildung 2.9). Das Ausgangssignal ist kompatibel zu einem Sinus/Cosinus-Geber, so dass der Sensor ohne weitere Anpassungen an einen Standardumrichter angeschlossen werden kann.

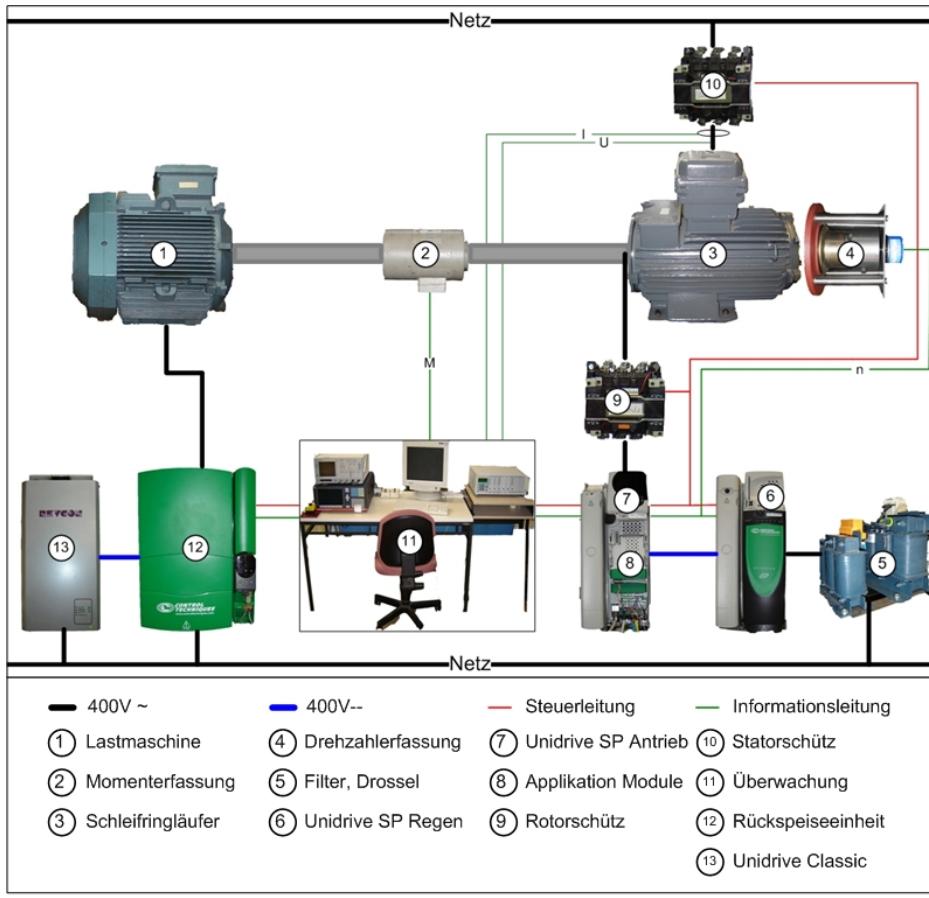


**Abbildung 2.9:** Abmessungen und Einbauort der ersten und zweiten Version des Positionssensors

## 2.2 Windkraft

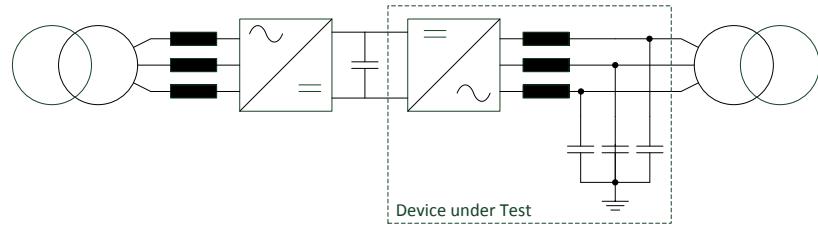
Die Nutzung regenerativer Energiequellen ist in der elektrischen Energietechnik aktuell ein sehr wichtiges Forschungsthema. Dazu gehört zu einem wesentlichen Anteil die Windkraft. In [07IEMDC] wird eine allgemeine Übersicht über die Verwendung von Asynchronmaschinen in der Windkraft gegeben. Die einfache direkt gekoppelte Asynchronmaschine in den Anfangsstufen der elektrischen Nutzung der Windenergie wird immer mehr durch kompliziertere Aufbauten wie die doppelt gespeiste Asynchronmaschine und die Synchronmaschine mit Vollumrichter ersetzt.

Für so eine doppelt gespeiste Asynchronmaschine (DFIG) wird in [06ISIE, 06PESC] ein Prüfstand entwickelt (siehe Abbildung 2.10). Damit wird eine 30 kW Maschine mit Hilfe zweier, über den DC-Kreis verbundenen Standardumrichtern angesteuert. Diese Umrichter stellen das Drehfeld für den Rotor der DFIG in allen vier Quadranten zur Verfügung. Dazu muss die Schlupffrequenz des Rotors aus der gemessenen Wellendrehzahl errechnet und das Drehfeld des Rotors in beide Richtungen bis hinunter zur Drehzahl 0 geregelt werden, was Standardumrichter in der Regel nicht beherrschen. Dies wurde mit zwei programmierbaren Applikationskarten in den Umrichtern gelöst, ohne dass eine externe Steuerung hinzugefügt werden musste.



**Abbildung 2.10:** Prüfstand für eine doppelt gespeiste Asynchronmaschine mit 30 kW Leistung.

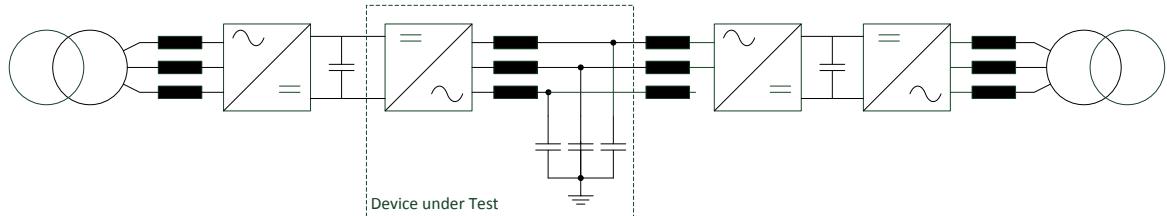
Ein Prüfstand mit kleiner Leistung in einer Laborumgebung kann für die Entwicklung von Software für die Umrichter genutzt werden, die Hardware der Umrichter kann damit jedoch nicht getestet werden. Aus diesem Grund wird in [11AFRI2] ein Prüfstand für den Test von Windkraftumrichtern mit voller Leistung gezeigt. Dieser wurde bei einem Industrikunden im Rahmen des Technologietransfers aufgebaut, da die dafür benötigte hohe Anschlussleistung erst einige Jahre später an der Universität Wuppertal zur Verfügung stand.



**Abbildung 2.11:** Blockschaltbild des Prüfstandes zum Test des Netzumrichters

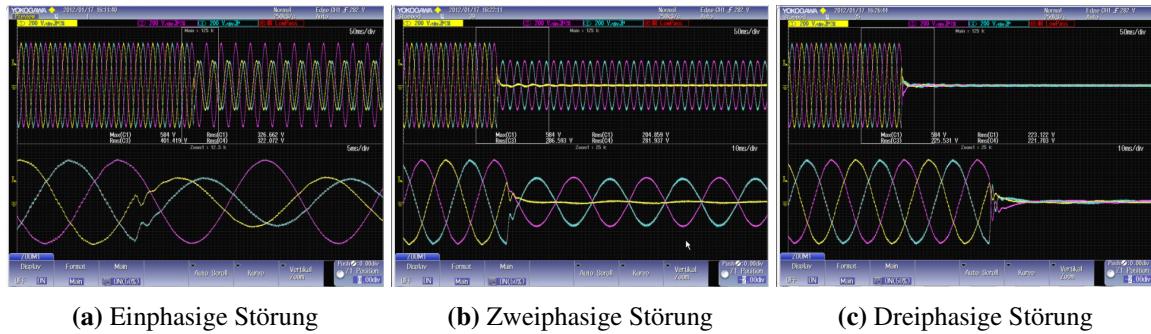
Mit dem aufgebauten Prüfstand in Abbildung 2.11 können 2 MW Netzeinspeisewechselrichter mit voller Leistung als Hardware in the Loop getestet werden, so dass sowohl die Hardware zum Beispiel thermisch qualifiziert wird, als auch die Software der Umrichter umfassend getestet werden kann. Die komplette Umrichtersoftware zur Netzeinspeisung wird im Rahmen dieses Projektes neu entwickelt.

Es stellt sich schnell heraus, dass die Netzeinspeisung in ein gestörtes Netz eines der Hauptprobleme bei der Umrichterentwicklung für die Netzeinspeisung darstellt. Dies kann mit dem bisherigen Prüfstand jedoch nicht simuliert werden, da der Wechselrichter über einen Filter starr ans Netz gekoppelt ist. In [12IES2] wird daher ein Netzsimulator vorgestellt, der auf der Netzseite dem Prüflingsumrichter vorgeschaltet wird (siehe Abbildung 2.12).



**Abbildung 2.12:** Blockschaltbild des Prüfstandes zum Test des Netzumrichters an einer Netznachbildung

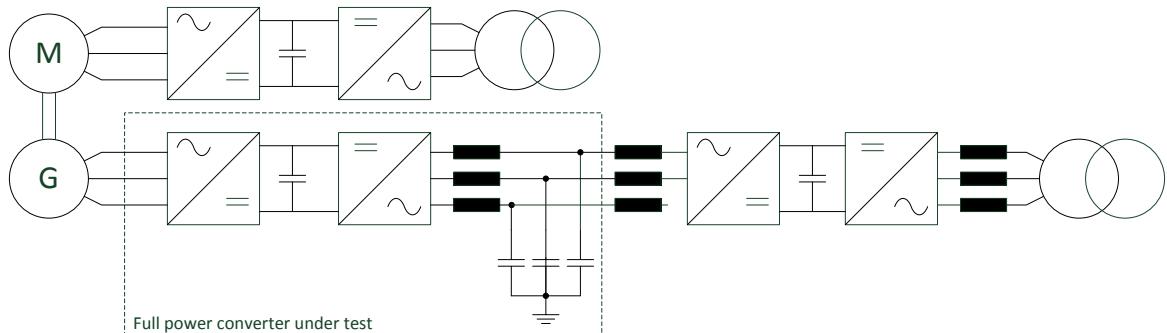
Mit diesem Aufbau können verschiedene ein-, zwei- oder dreiphasige Störungen im Netz simuliert und die Software in dem Netzeinspeisenumrichter entsprechend getestet werden. Diese Labortests mit dem realen Umrichter sind sowohl für die Entwicklung als auch für die Qualitätssicherung essentiell.



**Abbildung 2.13:** Spannungsverläufe des Netzsimulators bei einer simulierten Störung auf der Primärseite des Transformators

In Abbildung 2.13 werden Kurzschlüsse einer oder mehrerer Phasen zur Erde gezeigt. Es sind aber auch Spannungseinbrüche mit einer frei wählbaren Spannung simulierbar. Die Netzfrequenz ist ebenfalls einstellbar, um zum einen die Abschaltbedingungen bei einer Frequenz außerhalb des Toleranzbandes zu testen und zum anderen zum Beispiel ein amerikanisches Netz zu simulieren.

Um auch die Generatorseite des Vollumrichters testen zu können, wird der Prüfstand noch einmal, wie in Abbildung 2.14 gezeigt, erweitert. Dazu wird ein Maschinensatz mit ebenfalls 2 MW Leistung hinzugefügt, der antriebsseitig mit einem Vollumrichter betrieben wird.



**Abbildung 2.14:** Blockschaltbild des Prüfstandes zum Test des kompletten Windkraftumrichters

Die Generatorseite des Umrichters besteht häufig aus einer passiven Gleichrichtung, was diesen Teil viel einfacher gegenüber der Netzseite macht.

In [13EPE] wird der oben beschriebene Prüfstand benutzt, um die von den Netzanschlussbedingungen geforderten „Low Voltage Ride Through (LVRT)“ Fähigkeiten des entwickelten Windkraftumrichters zu verifizieren. Diese Fähigkeiten müssen normalerweise an einer realen Windkraftanlage zertifiziert werden, was mit hohen Kosten verbunden ist. Daher

muss bei einer Neuentwicklung die Software vor der Zertifizierung entsprechend im Labor getestet werden. An einer realen Anlage ist dies z.B. auf Grund der Beschränkungen des Netzbetreibers häufig nicht möglich. Mit dem vorgestellten Prüfstand konnten erfolgreich Vorzertifizierungen und Abnahmeprüfungen mit dem TÜV durchgeführt werden.



**Abbildung 2.15:** Fertig aufgebauter 2 MVA Windkraftumrichter

Die Regelung der Netzeinspeisesoftware wird mit Proportional-Resonanten (PR) Reglern anstatt mit den normalerweise benutzten Proportional-Integralen (PI) Reglern realisiert. In [12ICIT] werden die Vorteile einer solchen Regelstruktur, wie sie auch in Abbildung 2.16 gezeigt ist, erläutert.

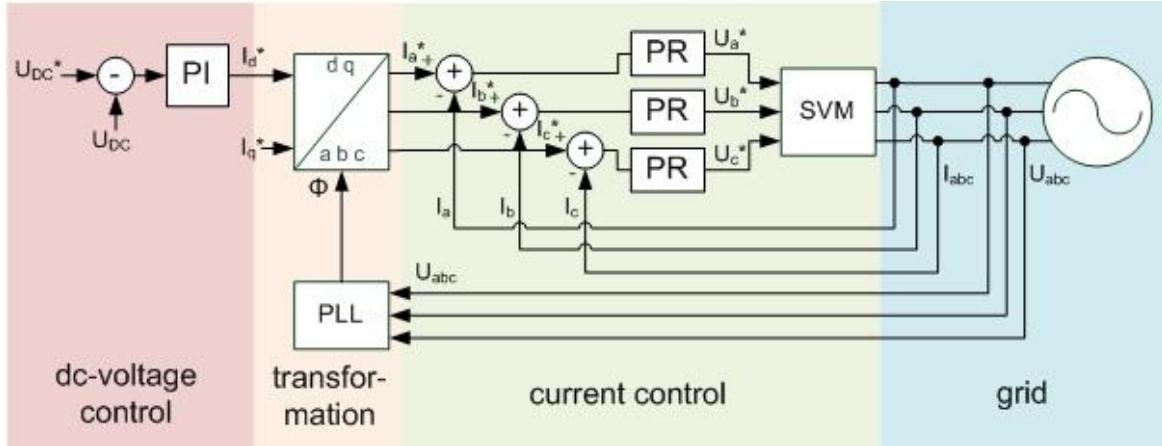


Abbildung 2.16: Kontrollstruktur der Regelung mit PR-Reglern.

Die drei benutzten PR-Regler befinden sich direkt vor der Raumzeigermodulation (SVM) und können so die optimalerweise sinusförmigen Motorströme ohne jegliche Transformation ausregeln. Dadurch lassen sich insbesondere die niederfrequenten Harmonischen deutlich besser unterdrücken als mit einem PI-Regler, der bekanntlich nur Gleichgrößen regeln kann und dadurch eine vorherige Transformation in das d/q-System erforderlich macht. Es werden, wie in Abbildung 2.17 gezeigt, für jede auszuregelnde Harmonische ein resonanter Block in den Regler eingefügt.

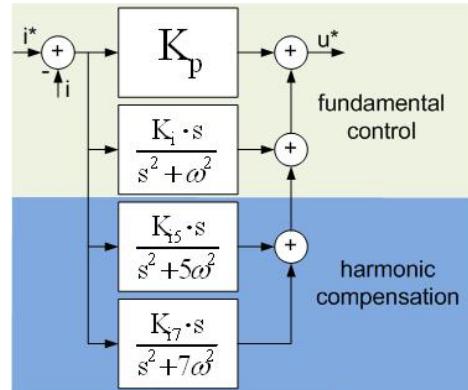
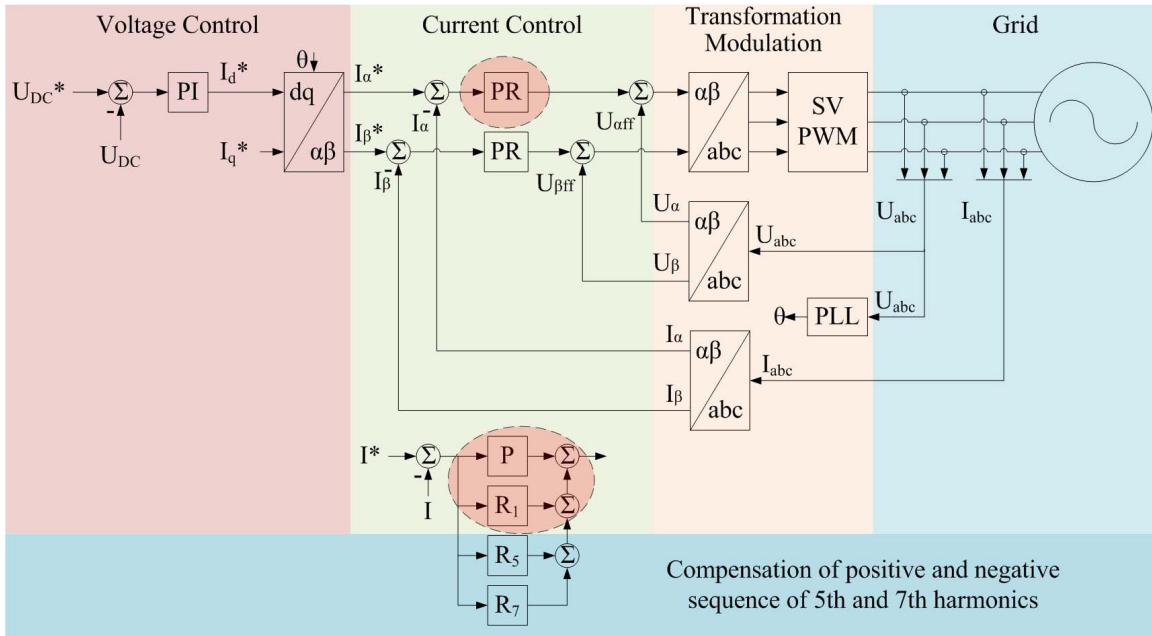


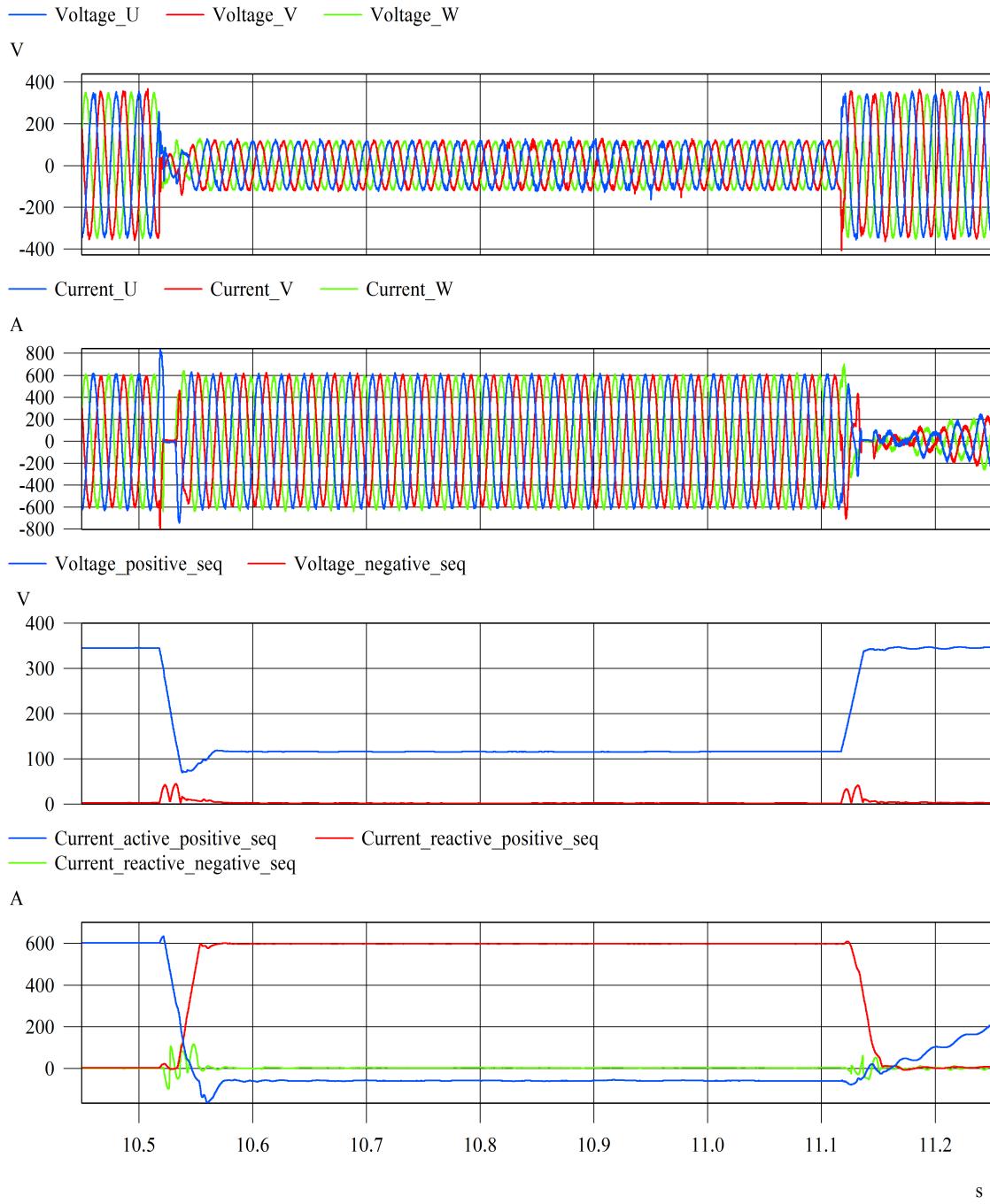
Abbildung 2.17: Einfügen von resonanten Blöcken in den PR-Regler zur Eliminierung von Harmonischen (hier der 5. und 7. Harmonischen).

Dieses Regelschema wird in [14IECON] zu Abbildung 2.18 weiterentwickelt. Die PR-Reglern wandern vom UVW-System in das  $\alpha/\beta$ -System, was den Vorteil hat, dass nur noch zwei Regler statt drei benötigt werden. Die Transformation von UVW nach  $\alpha/\beta$  ist gegenüber einem Regler viel einfacher und effizienter zu implementieren.



**Abbildung 2.18:** Komplettes Regelschema der Netzeinspeisung mit PR-Reglern im  $\alpha/\beta$ -System.

[13AFRI] beschäftigt sich mit der Erkennung verschiedener Fehlerfälle durch einen verallgemeinerten Integrator zweiter Ordnung (SOGI). Diese Erkennung muss sehr schnell und gleichzeitig robust sein. Für das LVRT nach deutscher Norm ist es notwendig, im Fehlerfall innerhalb von 50 ms eine Blindleistung von bis zu 100 % der Anlagennennleistung in das Netz einzuspeisen. Je nach Fehlerfall muss diese zusätzlich eingespeiste Blindleistung symmetrisch oder asymmetrisch sein. Insbesondere die asymmetrische Blindleistung stellt die Umrichterhardware vor besondere Herausforderungen in der Umsetzung der Regelung. In [13ICIT] wird daher auf die Besonderheiten eingegangen und ein Lösungsvorschlag präsentiert.



**Abbildung 2.19:** 3-phägiger Spannungseinbruch auf 25 % für 600 ms.

Die erfolgreiche Vorzertifizierung mit dem oben beschriebenen Netzsimulator im Labor wird in [15ISIE] beschrieben. In Abbildung 2.19 ist der Ablauf der Blindleistungseinspeisung gut zu sehen. Im Fehlermoment schaltet der Umrichter sofort auf Grund eines Über-

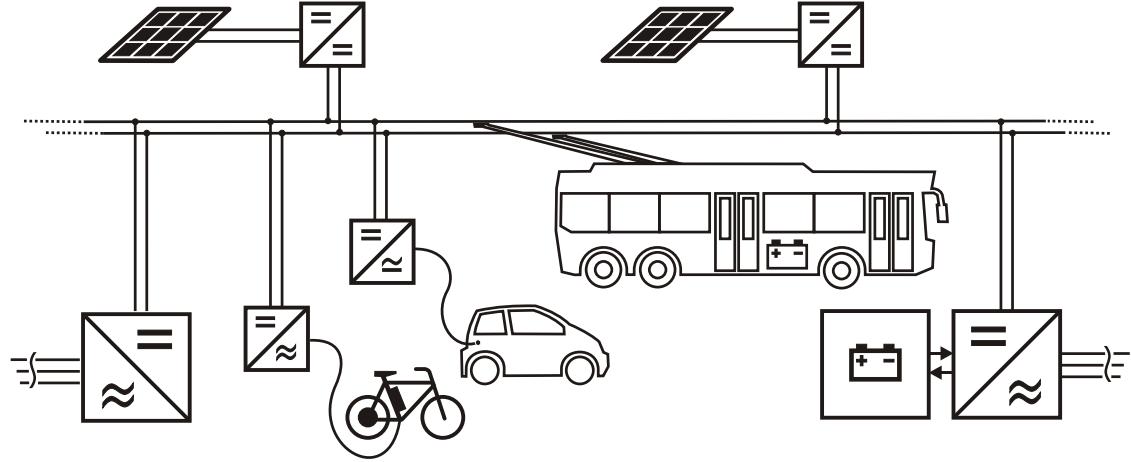
stroms ab, erkennt aber nach ca. 10 ms den LVRT-Fall und beginnt mit der Blindstromeinspeisung in Höhe von den geforderten 100 % des Nennstroms. Der Netzsimulator erhöht daraufhin die positive transformierte Netzspannung und simuliert damit das Verhalten eines realen Netzes. Nach Ende des Fehlers beendet der Umrichter die Blindleistungseinspeisung und erhöht die Wirkleistung wieder nach der vorgeschriebenen Rampe.

Während sich die bisherigen Veröffentlichungen mit der Synchronmaschine beschäftigt haben, wird in [17AFRI] und [17PEDS] die LVRT-Fähigkeit von einer doppelt gespeisten Asynchronmaschine (DFIG) gezeigt. Normalerweise verfügt diese Maschine über eine sogenannte „Crowbar“, die im Falle eines Fehlers den Rotor kurzschließt. Ansonsten könnte durch die starr mit dem Netz verbundene Statorseite ein zu hoher Strom in den Rotor induziert werden, was zu einer Zerstörung führen würde. Dabei benötigt die Maschine Blindstrom, was den meisten Grid-Codes widerspricht. Der hier gezeigte Ansatz ersetzt diese Crowbar durch eine schnelle Entmagnetisierung der Maschine, was eine Blindleistungseinspeisung und die Erfüllung des Netzeinspeisebedingungen ermöglicht.

Für die Regelung einer Asynchronmaschine ist die genaue Kenntnis der Maschinenparameter essentiell. In [16ICIT] werden die verschiedenen bekannten Verfahren zur Parameteridentifikation von Asynchronmaschinen untersucht und gegenübergestellt.

## 2.3 Verkehr

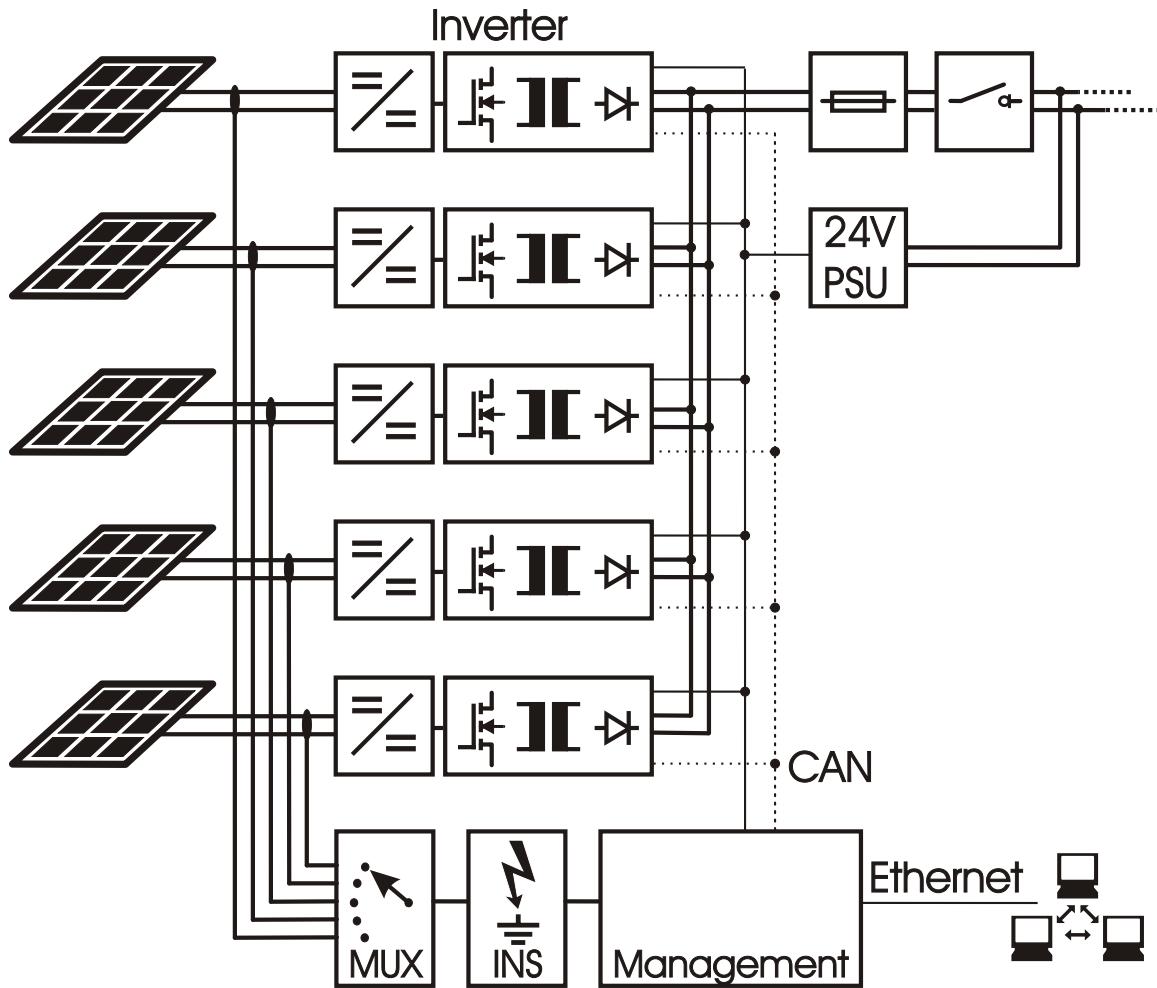
Die Verkehrswende zur Dekarbonisierung sowohl des öffentlichen Personennahverkehrs als auch des Individualverkehrs durch Ersetzen des Benzin- bzw. Dieselmotors durch einen Elektromotor mit Akku ist in den letzten Jahren ebenfalls ein wesentliches Thema der elektrischen Energietechnik gewesen. In diesem Bereich sind einige Arbeiten hauptsächlich im vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr geförderten Projekt „Mit dem Batterie-Oberleitungs-Bus (BOB) und der intelligenten Ladeinfrastruktur zum emissionsfreien ÖPNV“ veröffentlicht worden. In dem Projekt geht es um die Ertüchtigung der Infrastruktur der in Solingen neu angeschafften Batterie-Oberleitungsbusse, die das vorhandene, aber in die Jahre gekommene, Oberleitungsnetz nutzen. Dabei sollen, wie in Abbildung 2.20 gezeigt, regenerative Energiequellen, wie zum Beispiel Solarenergie, direkt in die Oberleitung eingespeist werden, Überschüsse in Batterien gespeichert und über ein neues bidirektionales Unterwerk an das öffentliche Versorgungsnetz abgegeben werden. Außerdem sollen entlang der Oberleitung Ladesäulen für PKW angebunden werden. Die Oberleitung soll also nicht mehr ausschließlich zur Versorgung der Busse, sondern zusätzlich auch als alternatives Netz zur Stützung des allgemeinen Energieversorgungsnetzes dienen.



**Abbildung 2.20:** Aufgaben der Oberleitung im BOB-Projekt

In [18ICPE] wird die direkte Einspeisung von Photovoltaik in das Gleichspannungs-Oberleitungsnetz gezeigt. Dazu wird ein hocheffizienter galvanisch getrennter Silizium-Carbid DC/DC-Wandler vorgestellt. Er besteht aus mehreren 10 kW Modulen, die jeweils über einen eigenen Maximum-Power-Point (MPP) Tracker verfügen (siehe Abbildung 2.21).

Die zentrale Management-Einheit sorgt für den Datenaustausch mit der Leitwarte und kann bei Bedarf die PV-Leistung drosseln, wenn diese nicht abgenommen werden kann. Außerdem ist noch eine 24 V Hilfsspannungsversorgung und eine Isolationsmesseinrichtung entwickelt worden. Der Wirkungsgrad dieser direkten Einspeisung in die Oberleitung ist mit gemessenen 98,6 % deutlich höher, als der herkömmliche Weg mit Standard PV-Umrichtern die Leistung ins Niederspannungsnetz einzuspeisen und dann über das Unterwerk aus dem Mittelspannungsnetz eine Gleichspannung für die Oberleitung zu erzeugen, was mehrfache Wandlungsverluste mit einem Gesamtwirkungsgrad von maximal 90 % bedeutet.



**Abbildung 2.21:** Struktur des Einspeiseumrichters für Photovoltaik in das Oberleitungsnetz.

Vorausgesetzt es gäbe in direkter Nähe der Oberleitung genügend Photovoltaikanlagen, könnte diese Technologie einen relevanten Schritt zur Energieeinsparung und Dekarbonisierung im Sektor Verkehr leisten. Um zu untersuchen, ob das theoretisch machbar wäre, wird in [19PVSC] das Potential für PV-Anlagen in Solingen in einem Abstand von bis zu 300 m zur Oberleitung ermittelt. Dazu wird vorwiegend nach freien Hallendächern der Industrie gesucht, die technisch recht einfach mit Solaranlagen ausgerüstet werden könnten. Es wird gezeigt, dass alleine bei Nutzung dieser wenigen Hallen mit einer Flachdachmontage bereits 18,8 Mio. kWh pro Jahr erzeugt werden könnten, wobei die heute in Betrieb befindlichen Oberleitungsbusse ca. 8 Mio. kWh pro Jahr benötigen.

Um die Versorgung der Oberleitung mit 100 % regenerativ erzeugter Energie sicherzustellen, muss photovoltaisch erzeugte elektrische Energie für die Nachtstunden zwischenge-

speichert werden. Der Energiebedarf nachts durch die geringere Anzahl in Betrieb befindlicher Busse deutlich geringer als am Tag, was die benötigte Speichermenge reduziert. Um einen solchen Speicher aufzubauen, wird in [19TECE] die Integration von sogenannten „Second Life“ Batterien in das Oberleitungsnetz vorgestellt. Diese Batterien wurden in ihrem ersten Leben als Antriebsbatterien in den Bussen verwendet, sind aber durch Degradation zu schlecht für den fahrenden Bus geworden. Sie haben jedoch noch genügend Energieinhalt um viele Jahre stationär in den Unterwerken überschüssige PV-Energie zu speichern. Die Anbindung dieser Batterien an das Oberleitungsnetz erfolgt mit einem neu entwickelten Silizium-Carbid DC/DC-Wandler in Buck/Boost-Struktur.

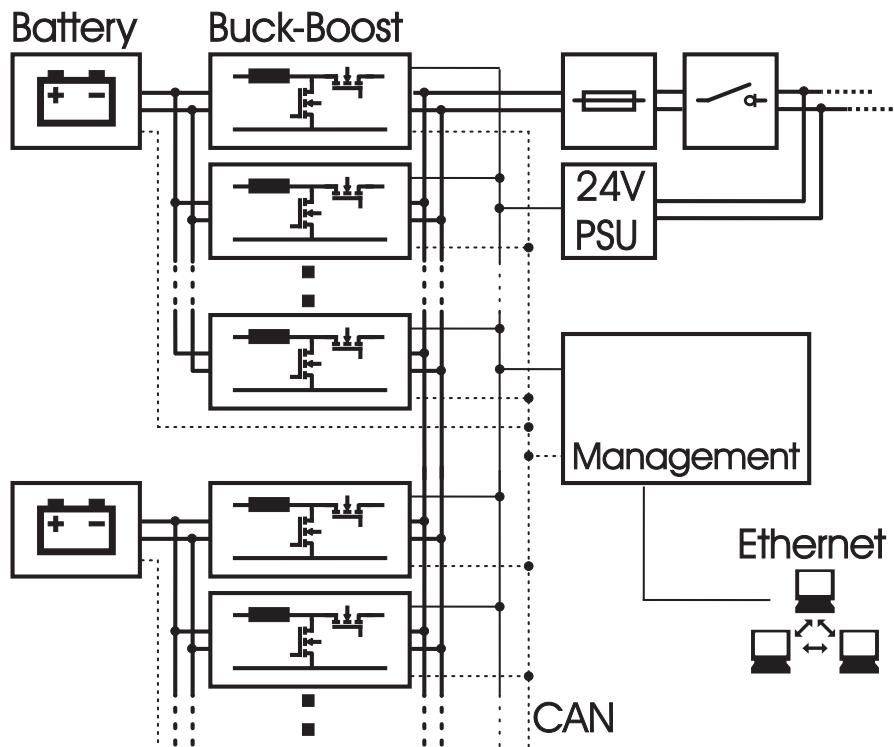
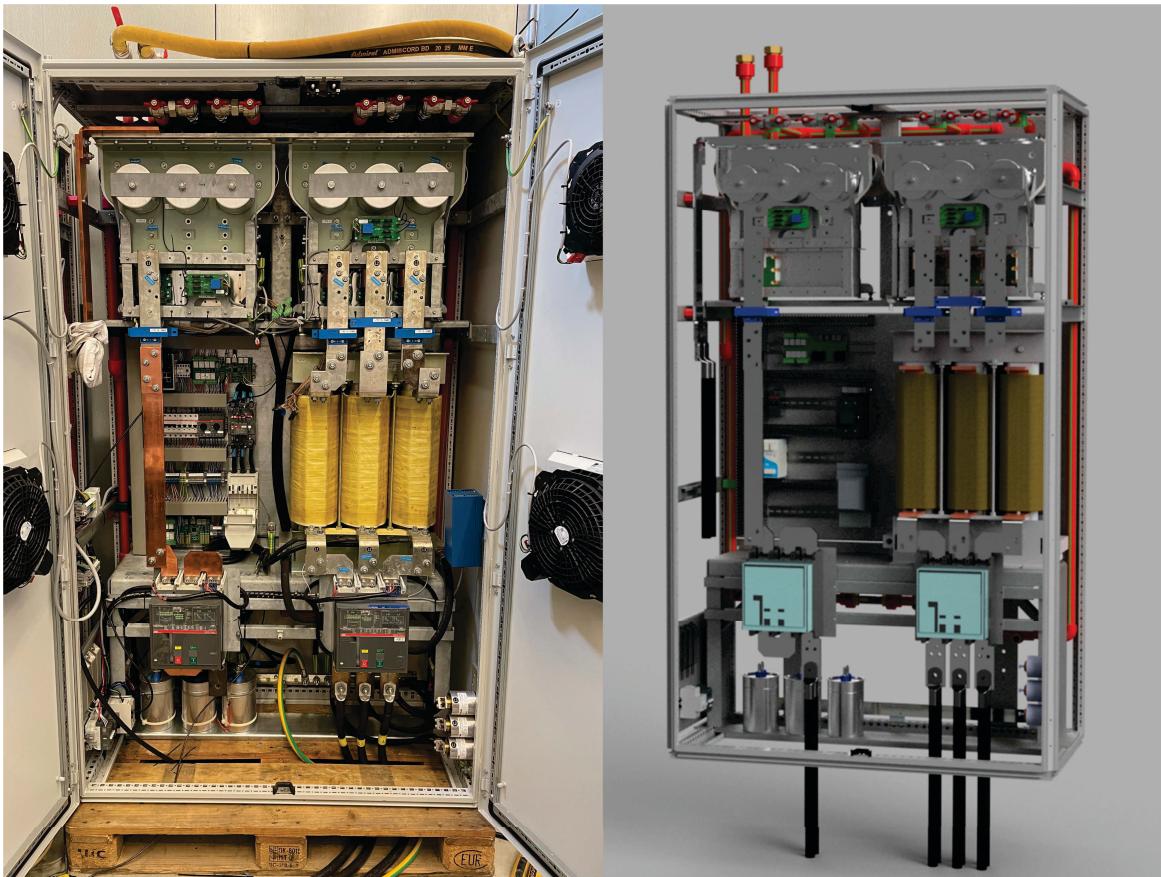


Abbildung 2.22: Struktur der Batterieanbindung an das Oberleitungsnetz

Jede Batterie wird mit einem oder mehreren parallelgeschalteten Wählern direkt mit der Oberleitung verbunden. Die Wandler werden über eine zentrale Lastflussregelung gesteuert, die optimalerweise die Position der Busse und damit den benötigten Energiebedarf an den einzelnen Positionen der Unterwerke kennt. So könnte auch die maximale Anschlussleistung der Unterwerke reduziert werden, was der Netzstabilität des übergeordneten Versorgungsnetzes zugutekommt und Kosten für den Verkehrsbetrieb senkt.

Die Unterwerke, die bisher über passive Gleichrichter die alleinige Versorgung der Oberleitung sicherstellen, müssen im Rahmen des Projektes bidirektional werden, unter anderem,

um die Spannung auf der Leitung konstant zu halten. Sie müssen die zeitweise zu erwartende überschüssige Photovoltaikleistung und ggfs. Bremsenergie der Busse in das Energieversorgungsnetz abführen und Versorgungslücken ausgleichen. Dazu wird ein bidirektonaler Umrichter mit einer Leistung von ca. 1 MW entwickelt und in Solingen in einem Unterwerk eingebaut und getestet. In [21PVSC] wird das Gesamtsystem mit den neu entwickelten bidirektonalen Unterwerken vorgestellt.

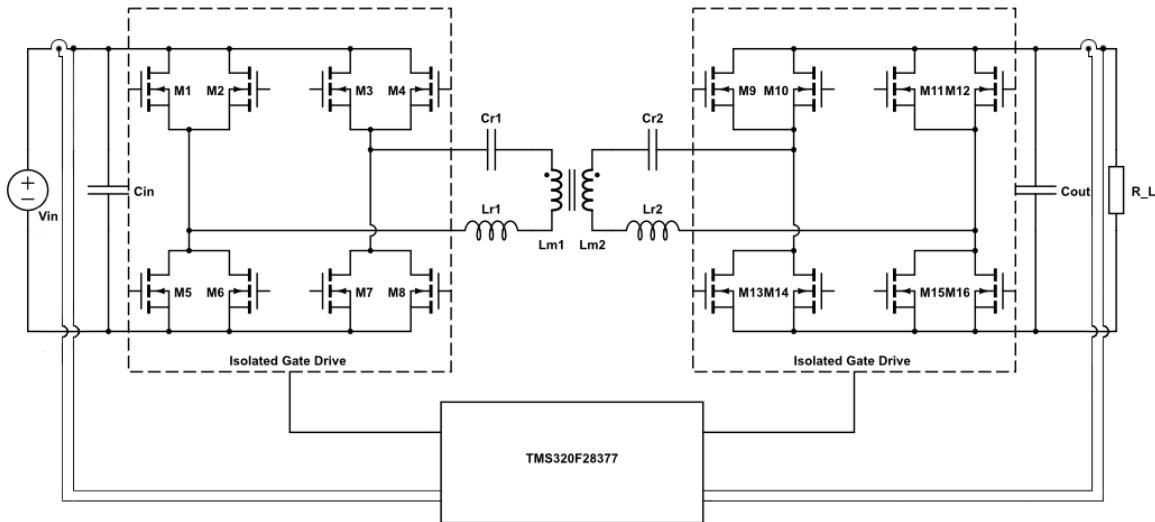


**Abbildung 2.23:** Unterwerksumrichter (rechts 3D-Modell) zur bidirektonalen Versorgung der Oberleitung in Solingen.

Das System ist damit in der Lage die vorhandene Oberleitungsinfrastruktur auch für andere Anwendungen zu öffnen, da die Spannungshöhe und die zur Verfügung stehende Leistung erstmals geregelt werden können.

Neben dem öffentlichen Personennahverkehr, der in Solingen durch die Oberleitungsinfrastruktur relativ einfach elektrifiziert werden kann, soll auch der Individualverkehr elektrifiziert werden. Dazu werden eine Vielzahl an Ladestationen benötigt, für die ebenfalls die vorhandene Oberleitungsstruktur verwendet werden kann. In [19ISIE] wird ein zu diesem

Zweck entwickelter DC/DC-Wandler vorgestellt, der eine Schnellladung über den Combined Charging Standard (CCS) ermöglicht.

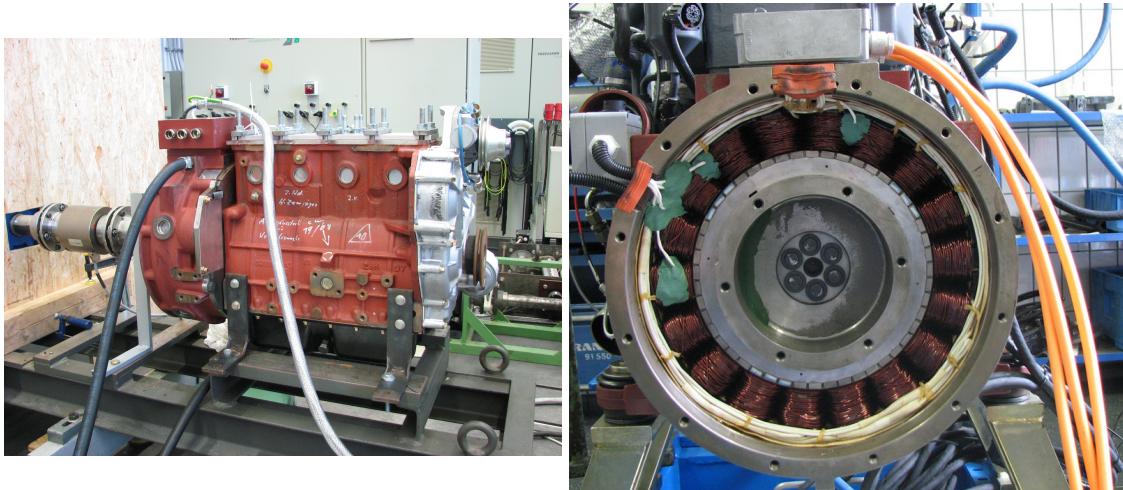


**Abbildung 2.24:** Aufbau des DC/DC-Wandlers zur CCS-Ladung von Fahrzeugen

Der Wandler ist in der sogenannten CLLC-Struktur aufgebaut, was einem Kondensator und einer Induktivität in Verbindung mit dem Trafo jeweils auf der Primär- und Sekundärseite entspricht, die resonant abgestimmt sind. Der aufgebaute Wandler hat eine Leistung von 12,5 kW wobei an einer Ladestation mehrere Wandler parallel geschaltet werden können, um die Ladeleistung an den dortigen Bedarf anzupassen.

Zusätzlich zu den Wählern wird noch ein Ladecontroller benötigt, der die Kommunikation mit dem Fahrzeug übernimmt. Dieser modulare Aufbau bietet gegenüber einer monolithisch aufgebauten Ladestation den Vorteil, dass über eine Schaltmatrix die vorhandene Leistung auf mehrere Fahrzeuge intelligent aufgeteilt werden kann, was in [21MDPI] gezeigt wird. Hier werden vier der oben erwähnten Wandler über eine Schaltmatrix mit vier Ladepunkten verbunden, so dass sowohl jedes der vier Fahrzeuge alleine mit der gesamten Leistung von 50 kW aber auch alle gleichzeitig mit nur einem Wandler, also jeweils 12,5 kW geladen werden können. Um diese Flexibilität auszunutzen, ist ein Lastmanagementsystem entstanden, dass sowohl die Ladecharakteristik des angeschlossenen Autos, als auch Präferenzen des Nutzers berücksichtigt, um die vorhandene Ladeleistung „gerecht“ aufzuteilen.

Ein weiteres Verkehrsprojekt ist in [10ICIT2] gezeigt. Darin wird ein Hybridmotor für eine Baumaschine und der Versuchsaufbau zur Vermessung dieser Maschine gezeigt (siehe Abbildung 2.25).



**Abbildung 2.25:** Hybridantriebssystem bestehend aus einem Dieselmotor und einer permanent erregten Synchronmaschine für einen Radlader

Der Radlader verfügt über einen 60 kW Dieselmotor, der mit einer 30 kW permanent erregten Synchronmaschine ergänzt wird. Die Regelung des Elektromotors erfolgt durch einen stark modifizierten Industriemotor, der von der Motorsteuerung über das CAN-Protokoll angesteuert wird. Dabei wird der Dieselmotor in seinem energetisch günstigsten Punkt gehalten, die überschüssige Energie in eine Batterie gespeichert und bei Lastspitzen wieder abgerufen.

# Chronologisches Verzeichnis der wissenschaftlichen Veröffentlichungen

- [04IPE] R. Lach, S. Soter, R. Wegener  
*Experimental determination of systemeigenfrequencies on electrical drives*  
11th International Power Electronics and Motion Control Conferences – EPE-PEMC 2004, Riga, Latvia, 2004
- [05IEMDC] S. Soter, R. Wegener, J. Dopheide, B. Kiffer  
*Low Cost Vector Control for Permanent-Magnet-Synchronmotor with only one DC-Link current Sensor for Pumping Application*  
International Electrical Machines and Drives Conference – IEMDC, San Antonio, Texas, USA, 2005
- [06ISIE] R. Wegener, S. Soter, T. Rösmann  
*Facility Employing Standard Converters for Testing DFIG Wind Generators up to 30kW*  
International Symposium on Industrial Electronics – ISIE, Montreal, Kanada, 2006
- [06PCIM] R. Wegener, S. Soter, C. Deipenbrock  
*Sensorless Determination of the Exact Rotor Position of a Blocked Permanent Magnet Machine*  
Power Conversion Intelligent Motion Conference – PCIM China, Shanghai, China, 2006
- [06PESC] R. Wegener, S. Soter, T. Rösmann  
*Operation of Double Fed Induction Generators with Unmodified Low Cost Standard Converters*  
37th IEEE Power Electronics Specialists Conference – PESC, Jeju, Korea, 2006
- [07IEMDC] S. Soter, R. Wegener  
*Development of Induction Machines in Wind Power*  
IEEE International Electrical Machines and Drives Conference (IEMDC), Antalya, Türkei, 2007
- [07PEDS] R. Wegener, F. Senicar, C. Junge, S. Soter  
*Low Cost Position Sensor for Permanent Magnet Linear Drive*  
Seventh International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS), Bangkok, Thailand, 2007

- [08DISS] R. Wegener  
*Zylindrischer Linearmotor mit konzentrierten Wicklungen für hohe Kräfte*  
 Promotion an der Universität Dortmund, 2008
- [08IAS] R. Wegener, S. Gruber, K. Nötzold, F. Senicar, C. Junge, S. Soter  
*Development and Test of a High Force Tubular Linear Drive Concept with Discrete Wound Coils for Industrial Applications*  
 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Edmonton, Kanada, 2008
- [08ICPE] R. Wegener, S. Gruber, K. Nötzold, S. Soter  
*Optimization of a Low-Cost Position Sensor for a Permanent Magnet Linear Drive*  
 Power Conversion Intelligent Motion Power Quality (PCIM China), Shanghai, China, 2008
- [09IEMDC] C. Junge, F. Senicar, R. Wegener, S. Soter  
*Pressure Control of a Nonlinear System with a Linear-PMSM and a Standard Inverter*  
 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC), Miami, USA, 2009
- [09ISIE] R. Wegener, S. Gruber, S. Soter  
*Development of a Low Cost Embedded Diagnosis System for Servo Controlled Drives including Data Mining Technologies*  
 International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Seoul, Korea, 2009
- [10ICIT1] K. Nötzold, A. Uphues, R. Wegener, S. Soter  
*Highly Integrated Inverter with Multiturn Encoder and Software-based PFC for Low Cost Applications*  
 International Conference on Industrial Technology, Vina del Mar / Valparaiso, Chile, 2010
- [10ICIT2] A. Bartsch, S. Gruber, R. Wegener, S. Soter  
*Testbench for Electrical Drive Systems in Hybrid Applications*  
 International Conference on Industrial Technology, Vina del Mar / Valparaiso, Chile, 2010
- [10IECON] S. Gruber, C. Junge, R. Wegener, S. Soter  
*Reduction of Detent Force Caused by the End Effect of a High Thrust Tubular PMLSM Using a Genetic Algorithm and FEM*  
 IECON 36th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Glendale, USA, 2010

- [10ICCT] C. Junge, J. Gallep, R. Wegener, S. Soter  
*Simulation and Verification of an Eccentric Press System Actuated by Hydraulic-Clutch-Brake-Combination controlled by a Linear Drive*  
 IEEE R8 International Conference on Computational Technologies in Electrical and Electronics Engineering (SIBIRCON), Irkutsk Listvyanka, Russland, 2010
- [11AFRI1] C. Junge, T. Ruhland, S. Gruber, R. Wegener, S. Soter  
*Controlled Input-Output-Shaft Synchronisation by a Linear Drive actuated Hydraulic Clutch-Brake-Combination*  
 IEEE Region 8 AFRICON, Livingstone, Zambia, 2011
- [11AFRI2] R. Wegener, K. Nötzold, A. Uphues, R. Griessel, S. Soter  
*Test Bench for Multi-MW Grid Side Wind Power Converter*  
 IEEE Region 8 AFRICON, Livingstone, Zambia, 2011
- [11LDIA] S. Gruber, C. Junge, R. Wegener, S. Soter  
*Overview of a special Developed Linear Drive Concept with integrated Hydraulic Cylinder für Clutch-Brake-Combinations in Eccentric Presses*  
 International Symposium on Linear Drives for Industry Applications (LDIA), Eindhoven, Niederlande, 2011
- [12ICIT] A. Uphues, K. Nötzold, R. Wegener, S. Soter  
*PR-Controller in a 2MW Grid Side Windpower Converter*  
 IEEE International Conference of industrial Technology (ICIT), Athen, Griechenland, 2012
- [12IES1] S. Gruber, R. Wegener, S. Soter  
*Detent Force Reduction of a Tubular Linear Drive by Using a Genetic Algorithm and FEM - Verification of Simulation Results*  
 38th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), Montreal, Canada, 2012
- [12IES2] A. Uphues, K. Nötzold, R. Wegener, S. Soter, R. Griessel  
*Inverter based Voltage Sag Generator with PR-controller*  
 38th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), Montreal, Canada, 2012
- [13EPE] A. Uphues, K. Nötzold, R. Wegener, K. Fink, M. Bragard, R. Griessel, S. Soter  
*Inverter based test setup for LVRT verification of a full-scale 2 MW wind power converter*  
 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), Lille, Frankreich, 2013

- [13ICIT] A. Uphues, K. Nötzold, R. Wegener, S. Soter, R. Griessel  
*Support of grid voltages with asymmetrical reactive currents in case of grid errors*  
 International Conference on Industrial Technology, Cape Town, South Africa, 2013
- [13AFRI] A. Uphues, K. Nötzold, R. Wegener, S. Soter  
*SOGI based grid fault detection for feeding asymmetrical reactive currents to fulfill LVRT requirements*  
 IEEE Africon, Ile Maurice Pointe-Aux-Piments, Mauritius, 2013
- [13PAT] K. Nötzold, M. Bragard, K. Fink, R. Griessel, R. Wegener  
*Cascaded H-Bridge Converter with transformer based cell power balancing in each voltage level*  
 Europäische Patentanmeldung Nr. EP 2 760 122 A1, 2013
- [14IECON] A. Uphues, K. Nötzold, R. Wegener, S. Soter  
*Frequency adaptive PR-controller for compensation of current harmonics*  
 40th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society (IECON), Dallas, USA, 2014
- [15ISIE] A. Uphues, K. Nötzold, R. Griessel, R. Wegener, S. Soter  
*Overview of LVRT-capability pre-evaluation with an inverter based test bench*  
 International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Buzios / Rio de Janeiro, Brasilien, 2015
- [15LDIA] S. Gruber, R. Wegener, S. Soter  
*Design Process for High Force Tubular Linear Drive with DiscreteWound Coils*  
 The 10th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications, Aachen, Germany, 2015
- [16ICIT] A. Uphues, K. Nötzold, R. Wegener, S. Soter  
*Comparison of parameter identification approaches with linearised process models based on RLS for induction machines with P>100kW*  
 International Conference on Industrial Technology (ICIT), Taipei, Taiwan, 2016
- [17PAT] K. Nötzold, M. Bragard, K. Fink, R. Griessel, R. Wegener  
*Bypassed Cascaded Cell Converter*  
 US-Patent Nr. US9553526B2, erteilt 2017
- [17AFRI] A. Uphues, K. Nötzold, R. Wegener, S. Soter  
*Crowbar-less ride through of asymmetrical grid faults with DFIG based WECS*  
 IEEE Africon, Kapstadt, Südafrika, 2017

- [17PEDS] A. Uphues, K. Nötzold, R. Wegener, S. Soter  
*DFIGs virtual resistance demagnetization for crowbar less LVRT*  
 12th IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS), Honolulu, USA, 2017
- [18ICPE] S. Kratz, B. Krüger, R. Wegener, S. Soter  
*Integration of Photovoltaics into a Smart Trolley System Based on SiC-Technology*  
 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon), Kuala Lumpur, Malaysia, 2018
- [19ISIE] T. Schneider, S. Kratz, R. Wegener, S. Soter  
*Symmetrical Bidirectional CLLC-Converter with Simplified Synchronous Rectification for EV-Charging in Isolated DC Power Grids*  
 28th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Vancouver, Kanada, 2019
- [19TECE] S. Kratz, P. Hanses, B. Krüger, R. Wegener, S. Soter  
*Integration of second life batteries into a smart overhead contact system based on SiC-Technology*  
 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Michigan, USA, 2019
- [19PVSC] S. Kratz, B. Krüger, R. Wegener, S. Soter  
*Power Supply of a Short-Range Public Transportation System Based on Photovoltaics - Potential Analysis and Implementation*  
 IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Chicago, USA, 2019
- [21PVSC] S. Kratz, B. Krüger, R. Wegener, S. Soter  
*Expansion of a Trolleybus Infrastructure towards a 100% Renewable Energy Usage*  
 IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2021
- [21MDPI] M. Weisbach, T. Schneider, D. Maune, H. Fechtner, U. Spaeth, R. Wegener, S. Soter, B. Schmuelling  
*Intelligent Multi-Vehicle DC/DC Charging Station powered by a Trolley Bus Catenary Grid*  
 Energies Journal, MDPI, 2021

