

Moderne Luftversorgungssysteme für Schienenfahrzeuge und adaptive Druckluftversorgung für optimale Effizienz

Schmid, Martin¹, Kipp, Thomas¹, Herden, Marc Oliver¹, Schneider, Jurij²,
Korshunov, Alexey²

¹Knorr-Bremse Systeme für Schienenfahrzeuge GmbH

²Kiepe Electric GmbH

1 Aktuelle Marktsituation und Trends

1.1 Megatrends

Urbanisierung und Ökologiebewusstsein führen zu einem Zuwachs des Personen- und Güterverkehrs auf der Schiene. Auch die Subsysteme der Fahrzeuge werden bezüglich ihrer Nachhaltigkeit hinterfragt. Die Kostenbetrachtung bezieht sich nicht mehr nur auf den Anschaffungspreis, sondern schließt in steigendem Maße den Lebenszyklus mit ein. Bestimmende Faktoren sind unter anderem Energie-, Betriebsmittel- sowie Wartungs- und Überholungskosten. Neuentwicklungen müssen sich an diesen Kriterien messen lassen. Im Folgenden soll gezeigt werden, welchen Beitrag Luftversorgungsanlagen für Schienenfahrzeuge dabei leisten können.

1.2 Aktuelle Trends im Detail

1.2.1 Reduzierung von Lärm

Der aktuelle Lärmschutzbericht der Deutschen Bahn (2018) zeigt, welche hohe Priorität dem Thema Lärmschutz mittlerweile beigemessen wird [Deutsche Bahn: „Maßnahmen zur Lärmreduktion“ unter: <https://ib.deutschebahn.com/ib2018/de/konzernlagebericht/oekologie/massnahmen-zur-laermreduktion/> (abgerufen am 01.07.2019)]. Da Lärm

nicht nur rein durch Infrastrukturmaßnahmen abgemildert, bzw. die Schallausbreitung durch solche Maßnahmen reduziert werden kann, steht außer Frage, dass sich derart ambitionierte Ziele nur durch zusätzliche Innovationen an den Fahrzeugen erreichen lassen.

Lärmbelästigung entsteht jedoch nicht nur bei fahrenden, sondern auch bei abgestellten Fahrzeugen. Deshalb sollen Schallmessungen in Zukunft zusätzlich zu den Messpunkten entlang des Streckennetzes auch an den Abstellgleisen durchgeführt werden. Das Abstellen von Fahrzeugen in der Nacht erfolgt nicht selten in der Nähe von bewohnten Gebieten. Insbesondere werden die Fahrzeuge häufig nicht vollständig abgerüstet. Hilfsgeräte wie Klimaanlage, aber auch Luftversorgungsanlagen zur Deckung von Verbrauch und Leckagen, können anlaufen und zu nicht zu vernachlässigenden Störungen der Anwohner in der Nacht führen.

1.2.2 Reduzierung von Lebenszykluskosten (LCC)

Betreiber von Schienenfahrzeugen haben die sich bietenden Potenziale längst erkannt und verankern Lebenszykluskosten (LCC) zusehends in ihren Ausschreibungen. Bisweilen wird den LCC bereits eine wichtigere Stellung als den reinen Anschaffungskosten der Fahrzeuge beigemessen. Auch die Relevanz der TCO (Total Cost of Ownership) steigt. Hierzu gehören neben Anschaffungs-, Wartungs- und Reparaturkosten auch alle für den Betrieb des Fahrzeugs anfallenden Kosten – beispielsweise für Betriebsmittel und Strom.

1.2.3 Erhöhung der Verfügbarkeit

Verspätungen und Änderungen im Fahrplan sind die Themen, mit denen Betreiber in der Regel am stärksten kämpfen. Schließlich leidet die Kundenzufriedenheit hierunter am meisten. Ein Mittel zur Vermeidung spontaner Ausfälle heißt Zustandsüberwachung oder „Condition Monitoring“. Eine erweiterte Diagnosefähigkeit soll dazu dienen, die Leistungsfähigkeit technischer Systeme über der Zeit zu beobachten, um einen Eingriff schon vor dem Schadensfall zu ermöglichen. Im besten Falle besteht auch die Möglichkeit, in der Fahrzeugarchitektur vorgesehene systemische Redundanzen zu nutzen oder die Fahrweise so anzupassen, dass es zu keinem Einfluss auf den Regelbetrieb kommt.

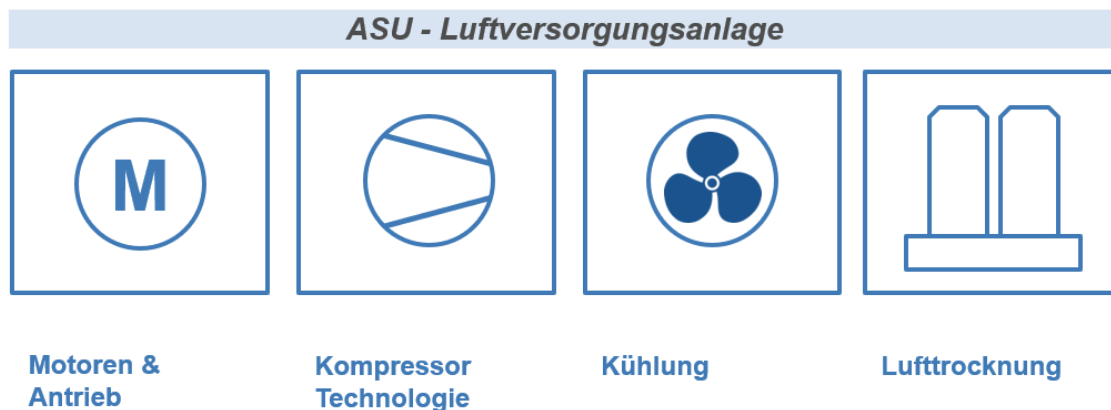
So sind im pneumatischen System des Fahrzeuges häufig schon mehrere Kompressoren integriert, die aber heute noch in sehr starren und nicht auf den jeweiligen Gerätezustand abgestimmten Regimen betrieben werden. Durch die exakte Kenntnis des Komponenten- und Gerätezustandes, kann – zum Beispiel über die Verschleißentwicklung – die steigende Wahrscheinlichkeit von anstehenden Reparaturen vorhersagt werden. Wartungen können somit durchgeführt werden, noch bevor es zum Schaden an der Komponente und in der Folge zum Fahrzeugstillstand kommt. Im Umkehrschluss können Betreiber Wartungsintervalle zur Reduzierung der Betriebskosten anpassen. Hintergrund ist, dass bei von Herstellern angegebenen Wartungsintervallen stets ein Puffer einkalkuliert wird, da die realen Betriebsbedingungen unbekannt sind. Somit geht oft vorhandene wertvolle

Restlebensdauer verloren, beispielsweise, wenn sich die reale Auslastung von Kompressoren nicht homogen entlang des Zugverbands verteilt.

2 Ausgangssituation und Lösungsansätze beim Systemaufbau

Bitte benutzen Sie diese Formatvorlage zum Formatieren Ihres Dokuments und ersetzen diesen Text durch Ihren eigenen.

2.1 Systemaufbau



Konventionelle Druckluftversorgungsanlagen bestehen aus den Hauptkomponenten Kompressor inklusive Elektromotor und einem fest gekoppelten Ventilator zur Kühlung, dem Trockner sowie dem Rahmen zur mechanischen, pneumatischen und elektrischen Integration an die entsprechenden Fahrzeugschnittstellen. Je nach Anforderung wird zusätzlich eine Kapselung zur Schallreduzierung verwendet.

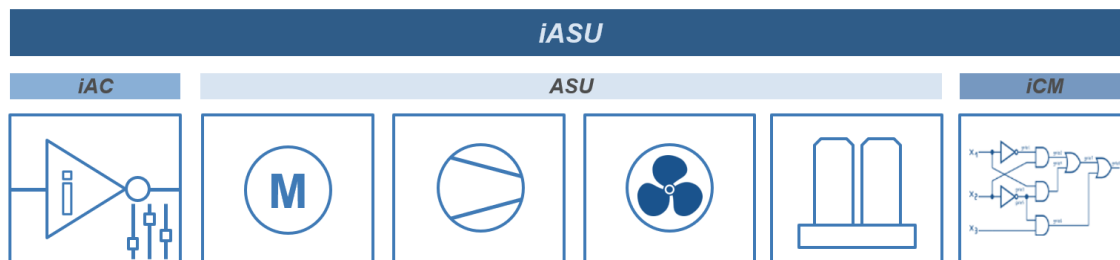
Je nach Anwendungsgebiet und Fahrzeug gibt es unterschiedlichste Formen der Integration: Von einer einfachen Dachanlage über Schallschutzkapseln bis hin zu Gerüsten mit mehreren Kompressoren für Lokomotiven. Des Weiteren sind viele Triebzüge mit mehreren Kompressoren in Zugverband ausgerüstet.



Die intelligente Air Supply Unit (iASU) ergänzt die Systeme um Spannungs- und Frequenzumrichter sowie eine Sensorik zur Überwachung des Anlagenzustands.

Neben den Hauptluftanlagen zur Versorgung des Gesamtfahrzeuges sind viele elektrisch betriebene Fahrzeuge mit Batterie betriebenen Hilfsluftanlagen ausgerüstet, die zum Anheben des Pantographen im drucklosen Fahrzeug dienen. Die beschriebenen Systemelemente sind auch bei Hilfsluftanlagen zu finden. Auch diese Anlagen kann die iASU durch Versorgung des Umrichters aus der Batterie ersetzen.

Weiterhin kann die iASU mit einem elektrisch angetriebenen Lüfter ausgestattet werden, der ebenso über den integrierten iASU-Umrichter angesteuert wird. Diese Anordnung ermöglicht im Gegensatz zu den sonst üblichen, fest an die Kompressordrehzahl gekoppelten Lüftern, eine auf den Betriebszustand abgestimmte variable Kühlluftversorgung des Kompressoraggregats. Diese Anordnung bietet ein erhebliches Potential für die Schallopptimierung.



Folgende Schnittstellen definieren die Systemgrenzen der iASU:

- Mechanische Schnittstellen zur Befestigung der Luftbeschaffungsanlage an das Fahrzeug
- Physische Hüllgrenzen der Anlage
- Signalschnittstelle zum Fahrzeug sowie Ansteuerung der iASU und Diagnose
- Stromversorgung des Hauptluftbetriebs (optional 400V 3AC oder 700VDC)
- Batteriebetriebene Stromversorgung Hilfsluftbetrieb (110VDC)
- Pneumatische Schnittstellen zur Hauptluftversorgung
- Pneumatische Schnittstelle zur Hilfsluftversorgung

Der Frequenzumrichter dient in der iASU als alleinige elektrische Schnittstelle zum Fahrzeug. Die Stromversorgung für den Hauptluftbetrieb ist mit den üblichen Drehstromnetzwerken von Schienenfahrzeugen (typisch 400V 3Phase) kompatibel.

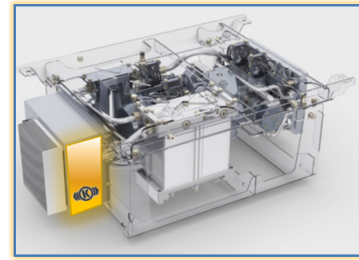
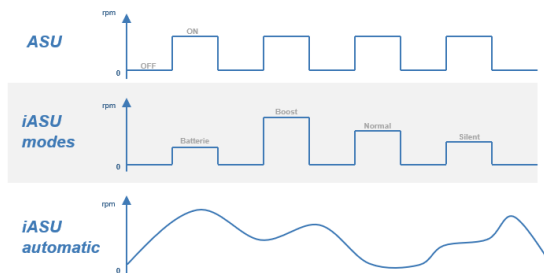
Optional lässt sich der Umrichter auch direkt mit einer stabilisierten 700VDC-Spannung speisen. Somit kann die iASU auch ohne weitere Adaption in DC-Bordnetzen betrieben werden.

Für den kurzzeitigen Betrieb des Kompressors aus der Batterie steht ein 110VDC-Spannungsanschluss zur Verfügung.

Mechanisch integriert wird der Umrichter in einem gemeinsamen Rahmen mit den anderen Subsystemkomponenten. Die iASU erfordert beim Fahrzeugintegrator keine zusätzlichen mechanischen Schnittstellen.

Intelligent Air Control: Core Feature – Adaptable Air Flow

iAC: central control device of the Air Supply Unit



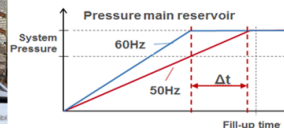
Intelligent Air Control (iAC):

- The main function of the Intelligent Air Control is to control the speed of the compressor
- The speed control enables the adaptation to the different operation modes of the vehicle
- The defined modes with best customer benefits are: **Battery Mode** for start up with battery power, **Boost Mode** for first fill up and **Silent Mode** for energy and noise optimization
- Additionally iAC enables the **soft start** of the compressor

Battery Mode



BOOST Mode



SILENT Mode



Sämtliche Steuersignale aus dem Fahrzeug werden über eine binäre 3bit-Ansteuerung realisiert. Damit lassen sich bis zu acht verschiedene Betriebsmodi abbilden. Ein vorhandenes viertes Bit ermöglicht eine etwaige Zwangseinschaltung in Notsituationen, etwa im Falle eines Fahrzeugbrands im Tunnel oder auf einer Brücke. Der Umrichter selbst ist mit einer von einem speziellen Tool bereitgestellten umfangreichen Diagnosemöglichkeit ausgestattet. Für den Betrieb der Diagnose genügt eine einfache Ethernet-Schnittstelle.

2.2 Systemauslegung

Die grundsätzliche Auslegung eines Luftversorgungssystems für Schienenfahrzeuge erfolgt üblicherweise anhand von zwei Kriterien:

- Füllzeitvorgaben eines komplett drucklosen Fahrzeugs (z.B. nach der Wartung)
- Luftbedarf der pneumatischen Verbraucher im Betrieb

Um im Fahrzeugbetrieb eine garantierte maximale Aufrüstzeit definieren zu können, spezifizieren die Hersteller in aller Regel die Auffüllzeiten eines drucklosen Fahrzeugs inklusive aller Vorratsbehälter. Gleichzeitig muss sichergestellt sein, dass Vorratsbehälter und Kompressoren den maximal anzunehmenden Luftbedarf jederzeit decken können und um einen Druckabfall unter festgelegte Minimalwerte und die damit verbundene Betriebsstörungen zu vermeiden. In vielen Fällen bestimmen die Füllzeitvorgaben die erforderliche Mindestlieferleistung und damit die Baugröße des Kompressors. Diese Luftbedarfsauslegung erfolgt für die jeweiligen Fahrzeugplattformen meist einheitlich, damit baugleiche Kompressoren projektübergreifend verwendbar sind.

Der tatsächliche Luftbedarf der Verbraucher ist erheblich von den Betriebsmodi und den Einsatzgebieten abhängig (Aufrüstbedarf, Leckage-Ausgleich im Abstellmodus, schwankender Passagierbetrieb sowie Beladung des Fahrzeugs, Geschwindigkeit, Bremsvorgänge, Streckentopographie). Selbst innerhalb der gleichen Fahrzeugplattform kann es somit zu einem sehr inhomogenen Betriebsverhalten der Luftversorgungsanlage kommen.

Diesen oftmals sehr unterschiedlichen Betriebsanforderungen steht eine sehr einfache Steuerlogik der Druckluftversorgungsanlagen gegenüber, die über eine einfache Druckmessung realisiert wird. Bei vielen Betreibern hat sich ein Einschaltdruck von 8,5bar und ein Abschaltdruck von 10bar¹⁷ etabliert. Unabhängig vom Betriebsmodus des Fahrzeugs und vom tatsächlichen Luftverbrauch gibt es also nur zwei Betriebszustände der Luftversorgung: Volle Lieferleistung, oder keine Lieferleistung.

In Fahrzeugen mit mehreren Kompressoren wie zum Beispiel in mehrteiligen Regionaltriebzügen wird oftmals ein Kompressormanagement realisiert: Die Steuerung startet die verschiedenen Kompressoren mit unterschiedlich gestaffelten Einschaltdrücken und wechselnder Reihenfolge im Sinne einer gleichmäßigen Auslastung. Die grundsätzliche Steuerlogik („Ein“ / „Aus“) bleibt bestehen – und kann zu einer Reihe von Problemstellungen führen:

- Überdimensionierung der Luftversorgungsanlage aufgrund von einzuhaltenden Füllzeiten
- Belastung von Motor und Versorgungssystem durch häufige Starts
- Erhöhte Korrosion und Verschleiß durch zu kurze Laufzeiten der Anlage
- Durch häufiges Abschalten und Trocknerentlüftung sinkt die volumetrische Gesamteffizienz
- Hoher Energiebedarf durch die stets volle Leistung – und daraus folgend: Hohe Geräuscentwicklung auch bei niedrigem Druckluftbedarf

2.3 Optimierter Betrieb bei wechselnden Fahrzeugbetriebsmodi

Durch die Integration des Umrichters und die dadurch ermöglichte Variabilität lässt sich der Betrieb der Luftversorgungsanlage sehr flexibel an den Fahrzeugbetrieb anpassen. Dieses ist besonders wichtig, da in den verschiedenen Fahrzeugbetriebsmodi sehr unterschiedliche Optimierungsziele erreicht werden sollen (vgl. Bild unten).

¹⁷ Jürgen Janicki, Horst Reinhard, Michael Rüffer. *DB-Fachbuch Schienenfahrzeugtechnik*. 3. Auflage. Berlin: Bahn Fachverlag GmbH 2012, S. 278.

Functional Matrix (1/2)

Option	Feature	LCC	Weight
 BATTERY MODE	Ability to use standard compressor as auxiliary compressor		
 BOOST MODE	Faster fill up time		
 SILENT MODE	Reduced noise level		
 CONDITION MONITORING	Monitoring of health status		



Knorr-Bremse Group

2.3.1 Aufrüsten – „Battery“ und „Boost Mode“

Bei elektrisch betriebenen Fahrzeugen wird der Kontakt zur Oberleitung über den pneumatisch anzuhebenden Pantographen hergestellt. Nach längerer Abstellzeit oder nach einer Wartung kommt es vor, dass sämtliche Behälter im Fahrzeug drucklos sind und der Stromabnehmer nicht pneumatisch angehoben werden kann. In diesem Fall kommt nach heutigem Stand der Technik der batteriebetriebene Hilfsluftkompressor zum Einsatz.

Der in der iASU verbaute Umrichter ermöglicht in diesem Fall den Betrieb der Hauptluftkompressor-anlage mit Batteriespannung. Der durch den Umrichter reduzierte Anlaufstrom und eine reduzierte Drehzahl des Kompressors sorgen dafür, dass die Fahrzeugbatterie nicht überlastet wird. Die Notwendigkeit einer Hilfsluftkompressoranlage entfällt damit vollständig. Zusammen mit dem Entfall des zugeordneten Lufttrockners entstehen für Fahrzeugbauer und Betreiber Vorteile in Bezug auf reduzierte Systemkomplexität, Platzbedarf und Wartungskosten.

Ist der Kontakt des Pantographen zur Oberleitung hergestellt, wechselt die iASU in den Auffüll- oder Boost-Modus. Der Boost-Modus ermöglicht kurzzeitig höhere Liefermengen, die iASU erhöht die Kompressordrehzahl über die von der Netzfrequenz des Fahrzeugs vorgegebene Nominaldrehzahl hinaus. Damit steigt proportional auch die Liefertleistung der Anlage. Womit auch ein kleinerer Kompressor den seltenen hohen Luftbedarf abdecken kann. Auch dadurch entsteht im Gesamtsystem ein Vorteil in Bezug auf Ge-

wicht, Wartungsaufwand und Systemkomplexität. Somit lassen sich entweder die Auffüllzeiten des Fahrzeugs optimieren oder es lässt sich eine Überdimensionierung der Gesamtanlage mit ihren Nachteilen in Bezug auf Verschleiß verhindern.

2.3.2 Energie- und schalloptimierter Abstellbetrieb – „Silent Mode“

Bei aufgerüstet abgestellten Zügen kommt es auch im Stand zu Minimalverbräuchen der Druckluft, verursacht beispielsweise durch Sandungsanlagen (Trocknung), Pantographen oder Leckagen. Fällt der Behälterdruck unter einen definierten Wert, schaltet sich der Kompressor üblicherweise mit der Regeldrehzahl ein.

Gerade in Wohngebieten führt dies nachts zu erheblicher Lärmbelastung, die zusehends zu Klagen aus der Anwohnerschaft führen. Der „Silent Mode“ der iASU verhindert dies, indem er durch die reduzierte Kompressordrehzahl und Adaption der Lüfterdrehzahl an die realen Kühlungsbedürfnisse eine deutliche Reduzierung der Geräuschbelastung sorgt. Zudem kann auf eine Schallkapsel verzichtet werden, was Systemkomplexität und Gewicht reduziert sowie die Zugänglichkeit für die Wartung erleichtert.

2.4 Nutzung des Umrichters als „zentrale Intelligenz“

Wie jede speicherprogrammierbare Steuerung verfügt der Umrichter über eine hohe Flexibilität bezüglich seiner logischen Funktionen. Dieses macht sich die Knorr-Bremse Gruppe bei der iASU zunutze und setzt den Umrichter – neben seiner eigentlichen Aufgabe, der Umwandlung einer Versorgungsspannung in eine bestimmte Ausgangsspannung und Frequenz – als „zentrale Intelligenz“ der Luftversorgungsanlage ein. Entsprechend werden die Ein- und Ausgänge der elektronischen Steuerung für die Funktionalität innerhalb der Luftbeschaffungsanlage genutzt und ausgewertet.

2.4.1 Monitoring des Anlagenzustands und Speicherung der Daten

Die Kombination von iASU und Condition Monitoring wertet das Condition Monitoring zum intelligent Condition Monitoring „iCM“ auf. Dieses ist in der Lage, sämtliche relevanten Betriebsgrößen zu erfassen und auszuwerten. Zusätzliche lassen sich die wesentlichen Zustands- und Betriebsdaten über einen längeren Zeitraum speichern und beispielsweise für Trendanalysen auswerten.

Functional Matrix (2/2)

Option	Feature	Option	Feature
 iAD	Intelligent Air Dryer	 Soft Start	Reduce inrush current to 1x nominal current
 Condition Monitoring 1	Monit. of temp., air delivery and dryer switch over	 DC Supply	Ability to supply iASU with DC voltage (stabilized)
 Motor Temp. Supervision	Diagnostic of potential motor issues	 Condition Monitoring Full	CM as base for CBM Full scope
 Free Parametric Mode	Free setting of parameter and I/O for test and commissioning	 Data-logging	Ability to analyse events in the past – pot. failure root causes
		 IOT - Stay in Touch	Stay in touch with product improved communication

 Knorr-Bremse Group

2.4.2 Diagnosemöglichkeiten und Regelung der Anlage

Die aufgenommenen Daten werden einerseits dazu genutzt, Schäden zu erkennen. Zusätzlich bieten sie aber auch die Möglichkeit, Verschleißzustände zu detektieren und dadurch den Schritt hin zur zustandsbasierten Wartung – dem „Condition Based Maintenance“ – zu gehen. Über die Veränderung der Messwerte und deren Analyse mit Hilfe von Algorithmen können Hinweise auf potenzielle Fehler gegeben werden, noch bevor diese tatsächlich auftreten. Als Vorwarnung mit dem Ziel einer vorausschauenden Instandsetzung – „Predictive Maintenance“ – kann das System den Betreiber auf drohende Leistungsabfälle oder gar den Ausfall einer Komponente hinweisen. Der Betreiber kann sie proaktiv bei nächster Gelegenheit instandsetzen.

Über die Diagnosemöglichkeit hinaus lassen sich die aufgenommenen Daten auch zur Regelung des Luftbeschaffungssystems selbst verwenden – etwa um es in einem verschleißoptimiertem Betriebspunkt zu betreiben. Beispielsweise kann die Steuerung die Drehzahl des Kompressors so regeln, dass die Komponenten bei einem kalten Kompressor möglichst schnell auf Betriebstemperatur gebracht werden oder bei längerem Betrieb im idealen Betriebspunkt gefahren wird. Letzteres vermeidet eine Ölemulsifikation bei ölgeschmierten Kompressoren beziehungsweise eine Kondensatbildung bei ölfreien Kompressoren.

Im Gegensatz zu den heute üblichen direkt gekoppelten Lüftern bietet die Regelbarkeit des elektrischen Lüfters in der iASU vielfältige weitere Möglichkeiten. So kann der Lüfter zum Beispiel erst zeitversetzt gestartet, länger oder mit unterschiedlichen Drehzahlen betrieben werden.

KB Sfs • CoC AS**intelligent CONDITION MONITORING**

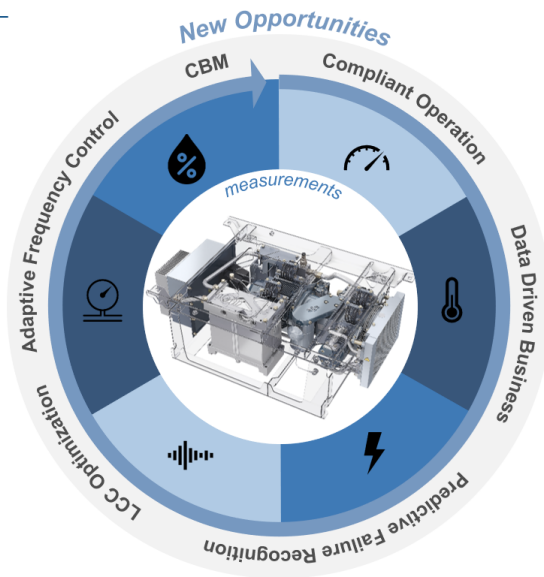
In the combination with iASU, CM becomes intelligent condition monitoring (iCM).

With the permanent monitoring of important values, the iAC regulates every single module, based on thresholds and defined algorithms, for an optimized Operation.

- Condition Monitoring is key sensing network for the iASU intelligence
- The iASU detects much more values then using only sensor measurements as single inputs

Measured Values for iCM

- | | |
|------------------|-------------------|
| ▪ Rotation speed | ▪ Pressure |
| ▪ Temperature | ▪ Delivery volume |
| ▪ Voltage | ▪ Frequency |
| ▪ Current | ▪ Torque |
| ▪ Power | |



2.5 Weitere Vorteile im Gesamtsystem

Elektrische Asynchronmotoren stellen beim Kompressorantrieb den Stand der Technik dar. Gespeist von einem starren 50 Hz-Bordnetz können sich hohe Anlaufströme ergeben, die ein Vielfaches des Nennstroms erreichen. Dies erfordert eine entsprechende thermische und elektrische Dimensionierung der Halbleiter im Bordnetzumrichter. Der Einsatz eines dezentralen iASU-Umrichters mit U/f-Regelung ermöglicht einen „soften“ Motorstart mit deutlich reduzierten Anlaufströmen, denen kleiner ausgelegte Halbleiter genügen. Dies reduziert wiederum Kosten und Systemkomplexität auf Fahrzeugseite. Die benötigte Anlaufenergie stellt zudem der Zwischenkreis des Umrichters zur Verfügung, sodass die Rückwirkung auf das Bordnetz vernachlässigbar wird.

Durch frequenzvariable Spannungsversorgung ist die iASU ohne bauliche Änderungen der wesentlichen Komponenten der Luftversorgungsanlage mit unterschiedlichen Systemen kompatibel, da keine auf die jeweilige Fahrzeugstromversorgung angepassten Teilmodule integriert werden müssen. Durch variable Einstellbarkeit der Liefermenge über den iASU-eigenen Umrichter ist die Luftversorgungsanlage zudem flexibler einsetzbar als eine konventionelle, immer nur eine bestimmte Liefermenge abdeckende, Luftversorgungsanlage.

3 Umrichtertechnologie

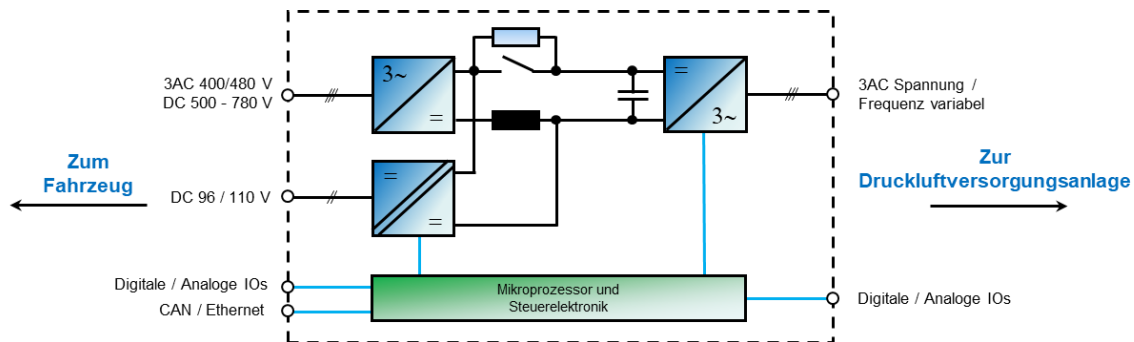
Die zentrale elektrische Schnittstelle zwischen dem Versorgungsbordnetz sowie der Fahrzeugsteuerung und der Luftversorgungsanlage iASU bildet der Umrichter.

Unter Berücksichtigung der gängigen Standards der Bahnindustrie wie zum Beispiel der elektrischen Kompatibilität nach EN 50155, der elektromagnetischen Verträglichkeit nach DIN EN 50121-3-2, der Schock- und Vibrationsfestigkeit nach IEC 61373 stehen bei der Entwicklung des Umrichters der iASU verschiedene andere Aspekte im Vordergrund:

- Schalloptimiertes elektrisches Design des Umrichters
- Verzicht auf einen Umrichter eigenen Lüfter und Kühlung durch freie Konvektion
- Minimaler Wartungsaufwand innerhalb der Lebensdauer
- Kompakter Aufbau
- Skalierbarkeit in der Leistung: 14 kVA- und 26 kVA-Leistungsklassen
- Zusätzliche Skalierbarkeit in der Ausstattung je Leistungsklasse

3.1 Elektrische Ausführung

Die nachfolgende Abbildung stellt das Blockdiagramm des Umrichters schematisch dar.



Das Blockdiagramm zeigt folgende Komponenten bzw. funktionale Einheiten:

- 3AC-Gleichrichter mit Versorgung durch 3AC/DC-Bordnetz
- 3AC-Wechselrichter zur Bereitstellung von variabler Spannung und Frequenz für die Motorsteuerung der Druckluftversorgungsanlage
- DC/DC-Steller für den zeitbegrenzten Kompressorbetrieb aus der Fahrzeugbatterie zum Ersatz des Hilfsluftkompressors
- Komponenten des Zwischenkreises
- Umrichter-Kontrolleinheit

3.1.1 3AC-Gleichrichter

Die Grundaufgabe der Eingangsschaltung ist die Gleichrichtung der Eingangsspannung zur Bildung eines Zwischenkreises. Zwei grundsätzliche Topologien kommen dabei in Frage, die aktive oder passive Gleichrichterschaltung.

Die aktive Gleichrichterschaltung bietet zwar die Vorteile der regelbaren Zwischenkreisspannung und eines niedrigen Klirrfaktors des Eingangsstromes, scheitert aber bei der Auswahl der Topologie aufgrund von einigen Nachteilen, die in wesentlich höheren Kosten, Gewicht und Volumen des Umrichters resultieren. So entstehen – abgesehen von der aufwendigeren Steuerung – bei aktiv schaltenden Halbleitern Verluste durch die nötige leistungsfähigere Kühlung. Zur Begrenzung des Rippelstroms und dessen Entkopplung vom Bordnetzsinusfilter ist eine komplexe Eingangsfilterstruktur nötig. Die Entscheidung fällt daher für den passiven Gleichrichter.

3.1.2 3AC-Wechselrichter

Ein 3-phasiger Wechselrichter stellt die 3AC-Ausgangsspannung bereit. Die Motorisolation ist für den Betrieb mit Pulswechselspannung ausgelegt, wodurch ein Sinusfilter bzw. du/dt -Filter am Umrichterausgang entfällt. Um die Kundenanforderung bezüglich der Schallemissionen des Umrichters zu erfüllen, ist der Wechselrichter für eine Schaltfrequenz von 8 kHz ausgelegt.

3.1.3 Optionaler DC/DC-Steller mit galvanischer Trennung

Ein optionaler mittelfrequenter DC/DC-Steller mit galvanischer Trennung sorgt dafür, dass beim Aufrüsten der Fahrzeuge die Druckluftversorgungsanlage zeitbegrenzt aus der Fahrzeugbatterie versorgt werden kann.

3.1.4 Komponenten des Zwischenkreises

Die Komponenten des Zwischenkreises übernehmen folgende Aufgaben:

- Ladeschaltung: Kontrollierte Aufladung des Zwischenkreiskondensators beim Zuschalten der Bordnetzspannung
- Drossel: Begrenzung des Oberwellenstromes durch passive Gleichrichtung
- Zwischenkreiskondensator: Kommutierungskreis und Energiespeicher

3.1.5 Mikroprozessor und Steuerelektronik

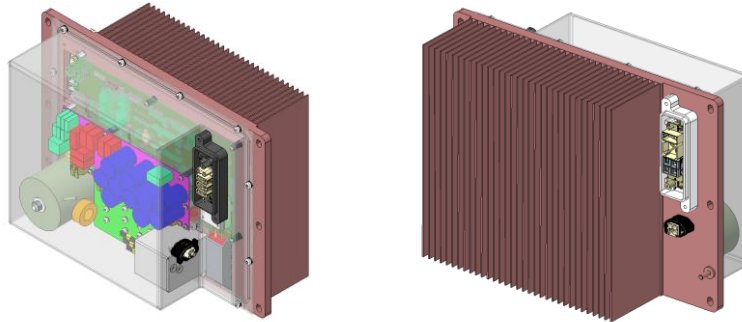
Bezogen auf den Umrichter übernimmt der Mikroprozessor inkl. Steuerelektronik folgende Aufgaben:

- Steuerung und Regelung des Umrichters
- Überwachung des sicheren Betriebszustandes
- Kommunikation mit dem Diagnosetool

Die Versorgungsspannung der Steuerelektronik entspricht der Batteriespannung des Fahrzeuges. Bedingt durch Bauart der Fahrzeuge, Einsatzbedingungen sowie historische Entwicklung reichen die Spannungen von 24 bis 110 VDC. Zur Minimierung der Typenvielfalt ist der Umrichter der iASU mit einem mit allen gängigen Batteriespannungen kompatiblen Breitbereichsnetzteil ausgerüstet.

3.2 Mechanische Ausführung

Die nachstehende Abbildung zeigt beispielhaft die mechanische Ausführung des Umrichters:



In dem ausgearbeiteten Konzept übernimmt der Kühler des Umrichters die Rolle eines Trägers, auf dem alle Komponenten platziert werden. Der Träger wird abschließend mit einer Haube verschlossen. Der Einbau in eine Druckluftversorgungsanlage erfolgt haubenseitig mit den vertikal angeordneten Kühlrippen nach außen und Schraubenbefestigungen am Kühlkörperumfang. Die fahrzeugseitigen Schnittstellen sind in den Kühlkörper integriert, die Integration der anlagenseitigen Schnittstellen erfolgt in die Haube. Die variable Kühlleistung (für 14 kVA und 26 kVA Module) erreicht die Konstruktion durch die Länge der Kühlrippen. An Kühlkörperumfang und Befestigungspunkten sind keine Anpassungen nötig.

3.3 Schnittstellen

Neben der Energieversorgung der Druckluftversorgungsanlage gehören folgende Aufgaben zu den Primäraufgaben des Umrichters:

- Steuerung und Überwachung der Luftversorgungsanlage
- Kommunikation mit Fahrzeugsteuerung
- Diagnose des Betriebszustandes der Anlage

Zur Erfüllung dieser Anforderungen stehen dem Umrichter folgende Schnittstellen zur Verfügung:

Binäre Ein- und Ausgänge: Die binären Ein- und Ausgänge sind unterteilt in die Leistungsklassen von einigen Watt bis zu 120 W und dienen zur Kommunikation mit dem Fahrzeug und der Steuerung der Druckluftversorgungsanlage. Die Arbeitsspannung von Ein- und Ausgängen liegt entsprechend den möglichen Fahrzeugbatteriespannungen im Bereich von 24 bis 110 V.

Analoge Eingänge: Diverse in die Druckluftversorgungsanlage integrierte Sensoren dienen in Form von analogen Eingängen der Steuerung und Überwachung des Systems. Der Umrichter stellt für die Sensoren die Versorgungsspannung zur Verfügung und erfasst den Zustand der Anlage auf Basis der gelieferten Sensorwerte. Abhängig vom Betriebsmodus lassen sie sich auch für die Regelung des Systems verwenden. Bei der Messung nichtplausibler Werte wechselt sie im Sinne einer möglichst umfangreichen Verfügbarkeit in einen speziellen Notbetriebsmodus.

Eingänge für NTC- und PTC-Temperatursensoren: Die Überwachung der temperaturkritischen Komponenten ermittelt den Belastungsgrad des Systems. Einen weiteren Einsatz finden die Temperatursensoren bei der Steuerung der Heizung für den Lufttrockner.

CAN-Schnittstelle: Diese optionale Schnittstelle dient zum Informationsaustausch mit anderen Geräten und/oder der Fahrzeugsteuerung ist jedoch nicht zwingend für den Betrieb notwendig.

Als Diagnosezugang dient eine Ethernet-Schnittstelle. Um im Bedarfsfall jeder denkbaren Anforderung gerecht zu werden, ist eine Adapterkarte zur Erweiterung der Schnittstellen zum Fahrzeug vorgesehen.

3.4 Parametrierung und Diagnostizierbarkeit

Die Software des Umrichters ist parametrierbar ausgeführt, um sie unabhängig von der Konfiguration der Druckluftversorgungsanlage verwenden und pflegen zu können. Der Umrichter verfügt über einen erweiterbaren Fehlerspeicher, der relevante Umrichter- und Systemfehler selbstständig speichert und über ein Diagnosetool mit folgenden Features abgerufen werden kann:

- In-time-Überwachung der Betriebsgrößen des Umrichters
- In-time-Überwachung der Betriebsgrößen der Druckluftversorgungsanlage
- Auslesen des Fehlerspeichers
- Auslesen der anlagenbezogenen Daten, wie zum Beispiel der Seriennummer

4 Ausblick

Mit dem vorgestellten Konzept der iASU – der „intelligent Air Supply Unit“ – können die wesentlichen Anforderungen an moderne Luftversorgungsanlagen abgebildet werden. Den Fahrzeugbauern und insbesondere den Fahrzeugbetreibern bringt das innovative Design viele Vorteile:

- Schallreduktion durch Anpassung des Kompressorbetriebs an den Betriebsmodus des Fahrzeuges
- Gewichtsreduktion und Verringerung der Systemkomplexität auf Fahrzeugseite in der elektrischen Ausrüstung und durch Wegfall der Hilfsluftversorgungsanlage

- Erhöhung der Fahrzeugverfügbarkeit durch Diagnosefähigkeit und Überwachung wesentlicher Betriebsparameter der Luftversorgungsanlage

Parallel wird sich die kontinuierliche Weiterentwicklung bezüglich „Condition Based Maintenance“ und „Predictive Maintenance“ bei gleichzeitig zunehmender Standardisierung fortsetzen. Der Funktions- und Leistungsumfang kann durch die Flexibilität des iASU-Konzepts an neue Anforderungen angepasst werden, gleichzeitig aber auch die Variantenvielfalt insbesondere auf Subsystemebene im überschaubaren Rahmen gehalten werden. Die Anpassung an unterschiedliche Einbaufälle im Fahrzeug (Unterflur, Inneneinbau, Dachaufbau) ist ebenso möglich wie die Integration unterschiedlicher Kompressorarten.

Autoren



Korshunov, Alexey

Dr. Alexey Korshunov, Studium Elektrotechnik und Promotion an der Technischen Universität Wladiwostok (Russland). Seit 2004 arbeitete er im Bereich Entwicklung Bordnetzumrichter bei der Siemens AG. Von 2009 bis 2017 Leiter Systemtechnik bei Vossloh Kiepe Main Line Technology GmbH und Vossloh Kiepe GmbH. Seit 2018 leitet er die Entwicklung der Leistungselektronik bei Kiepe Electric GmbH.



Schneider, Jurij

Jurij Schneider, Studium Elektrotechnik an der RWTH Aachen. Von 2011 bis 2015 arbeitete er im Bereich Systemtechnik bei Vossloh Kiepe Main Line Technology GmbH und Vossloh Kiepe GmbH. Seit 2015 ist er im Bereich Entwicklung der Leistungselektronik bei Kiepe Electric GmbH tätig.



Schmid, Martin

Martin Schmid, Studium zum Wirtschaftsingenieur an der Hochschule Rosenheim. Seit neun Jahren ist er bei der Knorr-Bremse SfS GmbH tätig. Die ersten 7 Jahre als Projektleiter und Systemingenieur im Bereich Bremssteuerung. Seit 2 Jahre als Projektleiter Innovation für das Projekt „intelligent Air Supply Unit“ im Bereich Air Supply.



Winkler, Michael

Michael Winkler, Master Abschluss in Mechanical Engineering an der Hochschule Reutlingen und Master in Technique and Technology an der St. Petersburg State Polytechnical University. Seit 2011 bei der Knorr-Bremse SfS GmbH tätig im Bereich Air Supply und seit Mitte 2018 verantwortlich für das Produkt Management von Air Supply.



Kipp, Thomas

Dr. Thomas Kipp, Studium Maschinenwesen an der Technischen Universität München und Promotion im Bereich Produktentwicklung an der Technischen Universität Hamburg-Harburg. Seit 2013 bei der Knorr-Bremse SfS GmbH tätig im Bereich Air Supply und seit April 2017 verantwortlich für die Innovations- und Komponenten-entwicklung im CoC Air Supply.



Herden, Marc-Oliver

Dipl.-Ing. Marc-Oliver Herden, Maschinenbaustudium an der Universität Hannover. Seit zwanzig Jahren ist er bei der Knorr-Bremse SfS GmbH tätig. Von 1998 bis 2003 Projektierung und Vertrieb von Brems-systemen für Schienen-fahrzeuge bei der Knorr-Bremse SfS; seit 2003 Leiter der System-entwicklung im Center of Competence für Brems-steuerungen. Seit Januar 2018 hat er die Leitung des Bereiches Air Supply (R/AS) der Knorr-Bremse Systeme für Schienenfahrzeuge GmbH übernommen.