



SILVIA SALIS, 10.05.2022

Energieeffizienzverbesserung am Antrieb dank Dreipunktstromrichter

Electrosuisse Bahntagung 2022

Agenda

- Vergleichsmessung am Fahrzeug:
Antrieb mit Dreipunkt (3L)- im Vergleich zum Antrieb mit Zweipunkt (2L)-Stromrichter
- Analyse der Motorseite
- Analyse der Netzseite
- Ausblick
- Zusammenfassung

Vergleichsmessung RhB

STZ (Allegra) – RTZ (Capricorn)



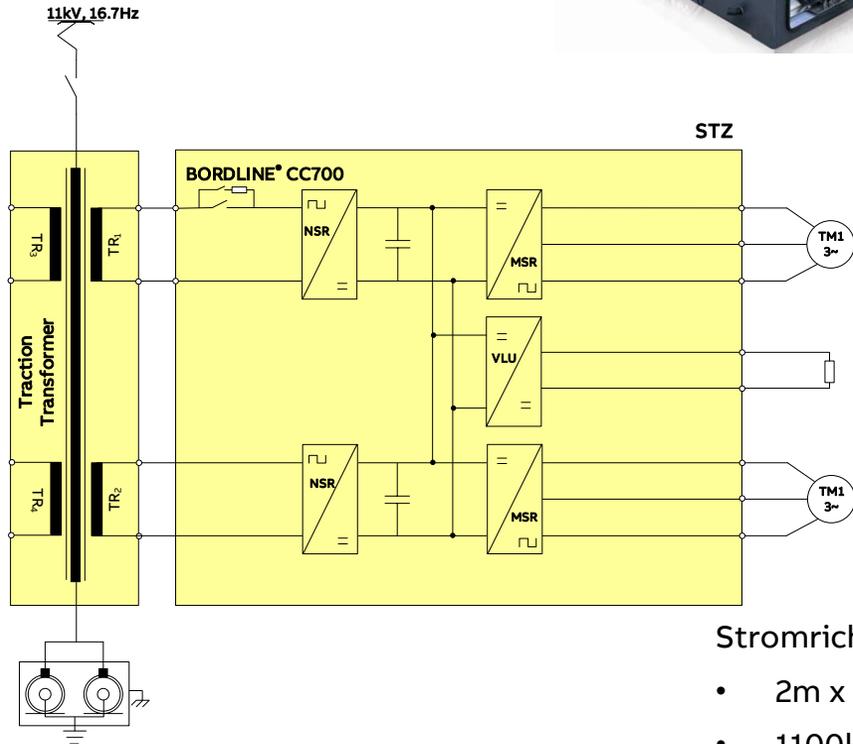
- Spätsommer 2020: Energiemessungen mit STZ und RTZ auf der Strecke Rhäzüns – Schiers
- Extrafahrt mit vergleichbarem Fahrspiel mit Halt an allen Stationen

| | STZ | RTZ |
|----------------------|-------------------------------|--------------------------|
| Baujahr | 2011/2012 | Ab 2019 |
| Achsfolge | Bo'Bo'+ 2'2'+ 2'2'+ 2'2' | Bo'Bo'+ 2'2'+ 2'2'+ 2'2' |
| Max. Leistung am Rad | 1400 kW | 1600 kW |
| Anfahrzugkraft | 140 kN | 142 kN |
| Gewicht (Tara) | 113 t | 119 t |
| Antriebstopologie | 2L, MV Einzelachsenantrieb | 3L, MV Gruppenantrieb |

Vergleichsmessung RhB

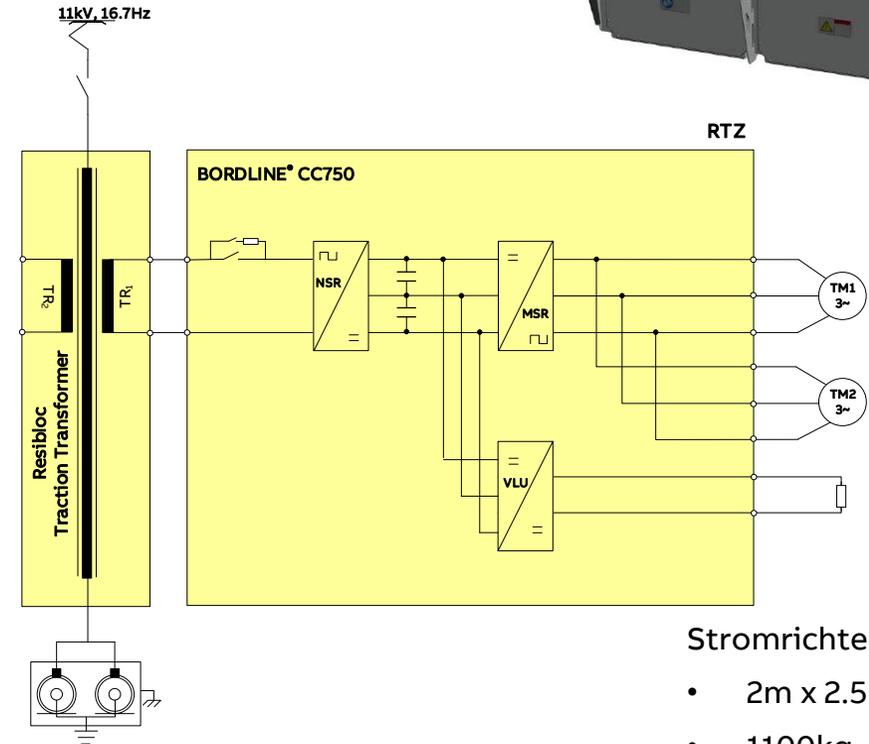
Übersichtsdiagramme

STZ



Stromrichter-masse:
• 2m x 2 m x 0.6m
• 1100kg

RTZ



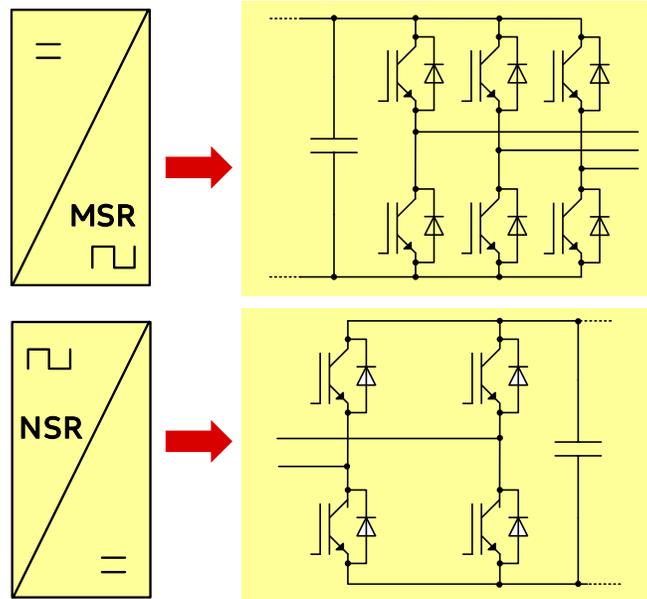
Stromrichter-masse:
• 2m x 2.5m x 0.6m
• 1100kg

Vergleichsmessung RhB

Details Stromrichter



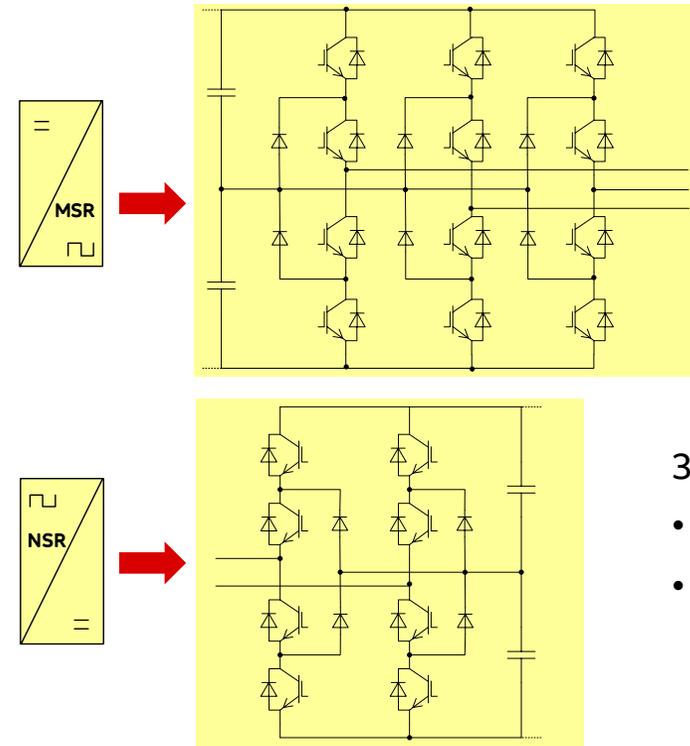
STZ



2L Topologie:

- 1700 V U_{DC}
- 3.3 kV IGBT

RTZ



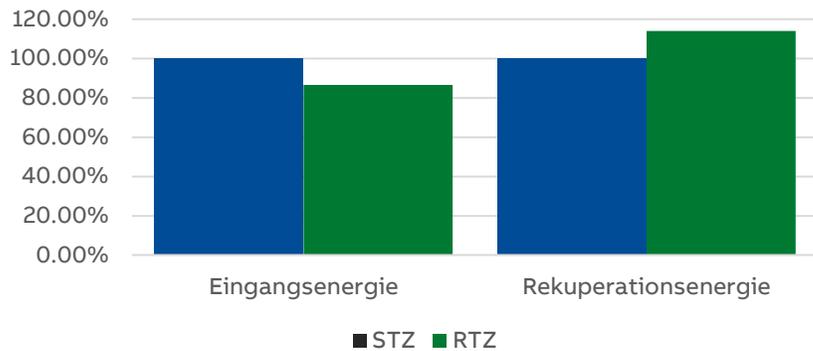
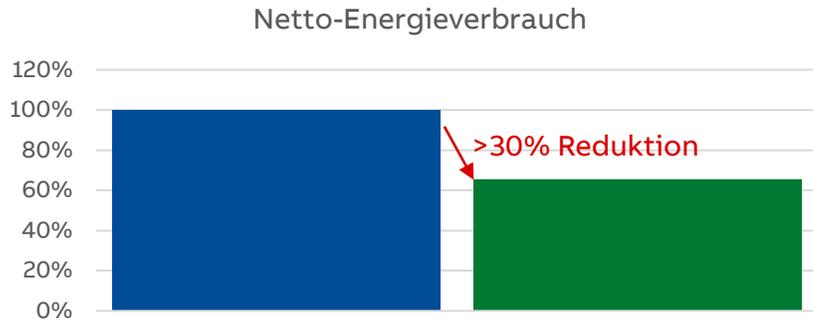
3L Topologie:

- 1900 V U_{DC}
- 1.7 kV IGBT

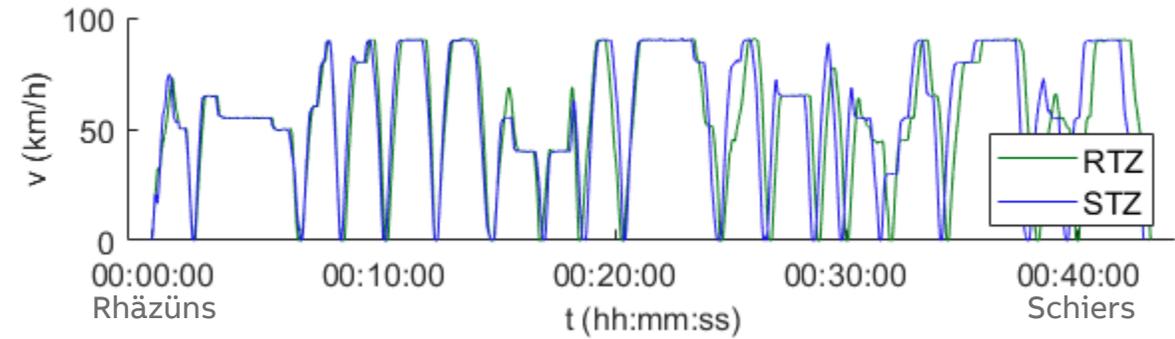
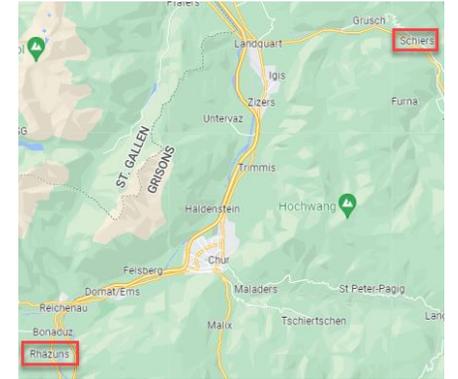
Vergleichsmessung RhB

Resultate

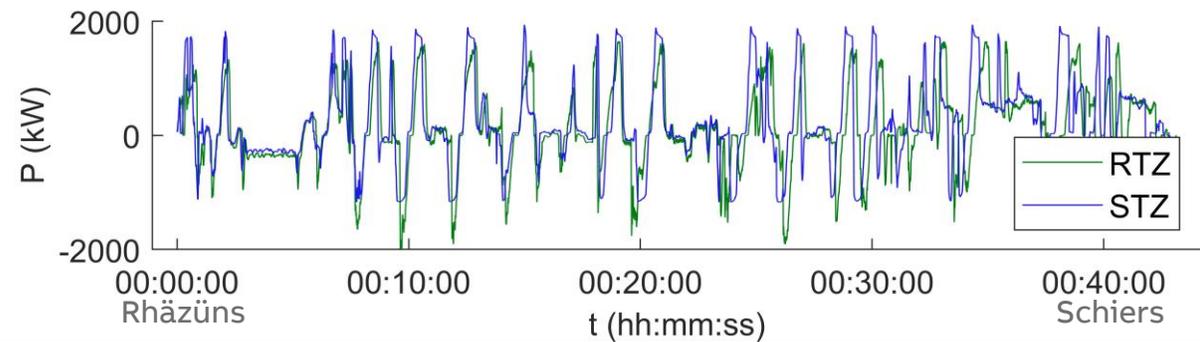
Vergleich Energiebezug



Geschwindigkeitsverlauf Fahrzeuge



Leistung am Netz



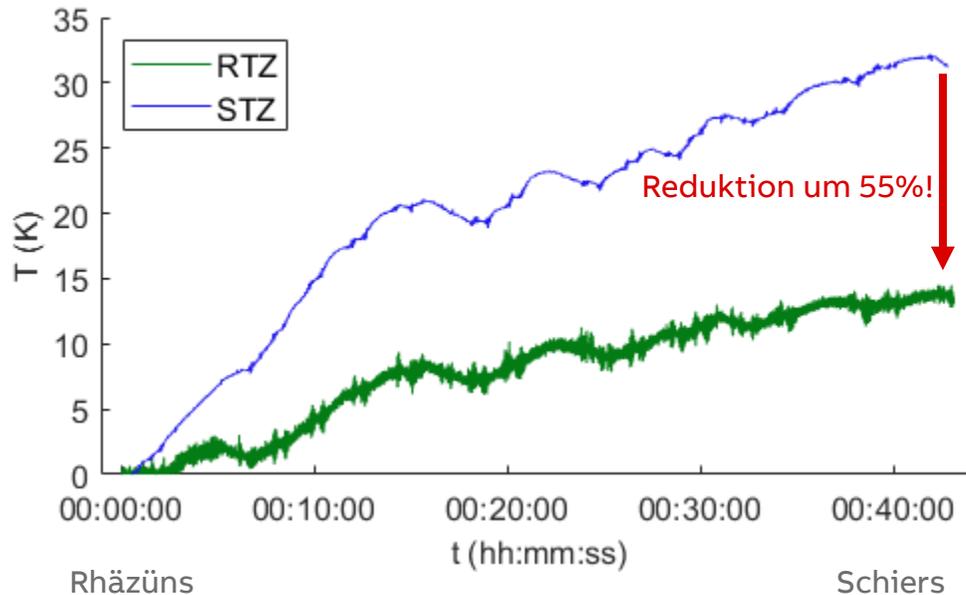


Motorseite

Vergleichsmessung RhB - Motor

Resultate

Verlauf der Motortemperaturerhöhung



Analyse

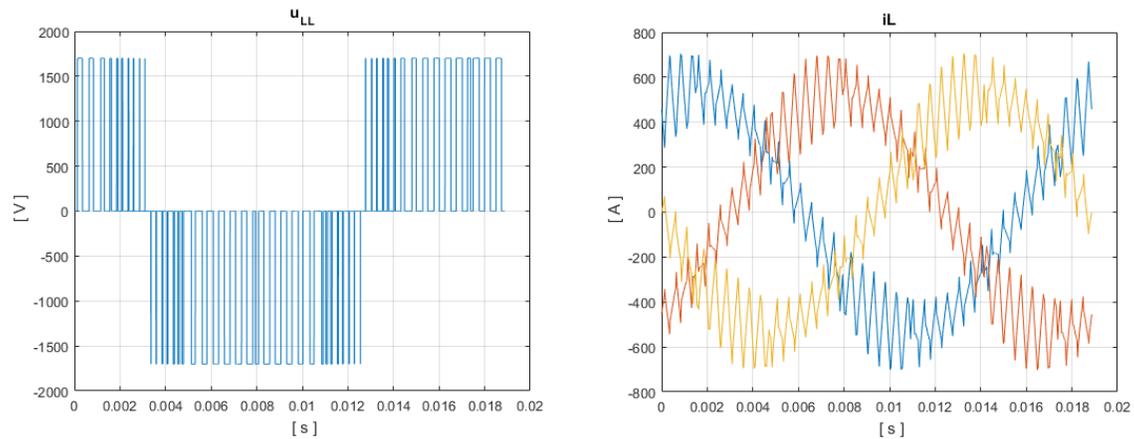
- 55% kleinerer Temperaturanstieg beim RTZ im Vergleich zum STZ
- Ähnliche Anfangstemperatur (ca. 90°C) für beide Fahrzeuge
- Trotz starker Motorlüftung beim STZ resultiert eine stärkere Motorerwärmung

Deutlich höhere Motorerwärmung beim STZ ist ein deutliches Indiz für höhere Verluste!

Vergleichsmessung RhB - Motor

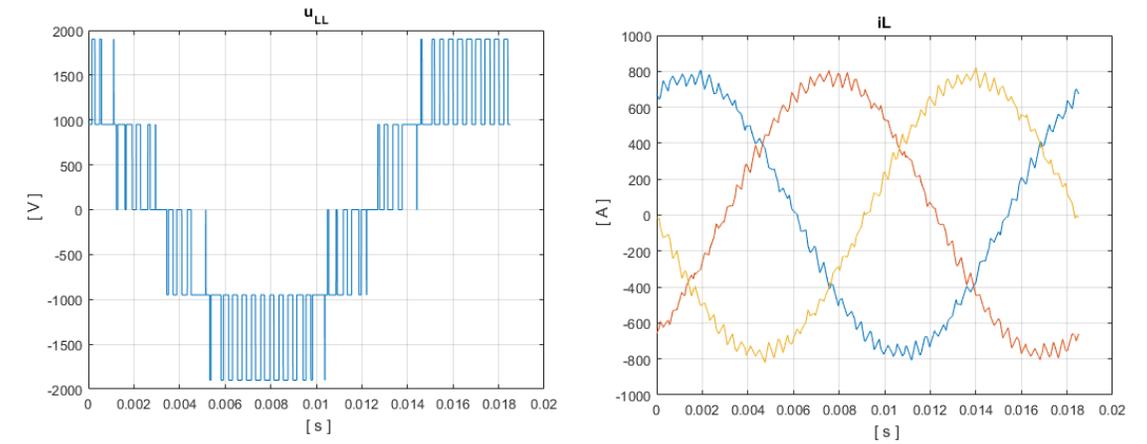
Erklärung der Resultate – Simulation der Verläufe am Leistungspunkt

STZ Spannungs- und Stromverläufe (2L-Stromrichter)



- THD des Motorstroms: ca. 20%

RTZ Spannungs- und Stromverläufe (3L-Stromrichter)

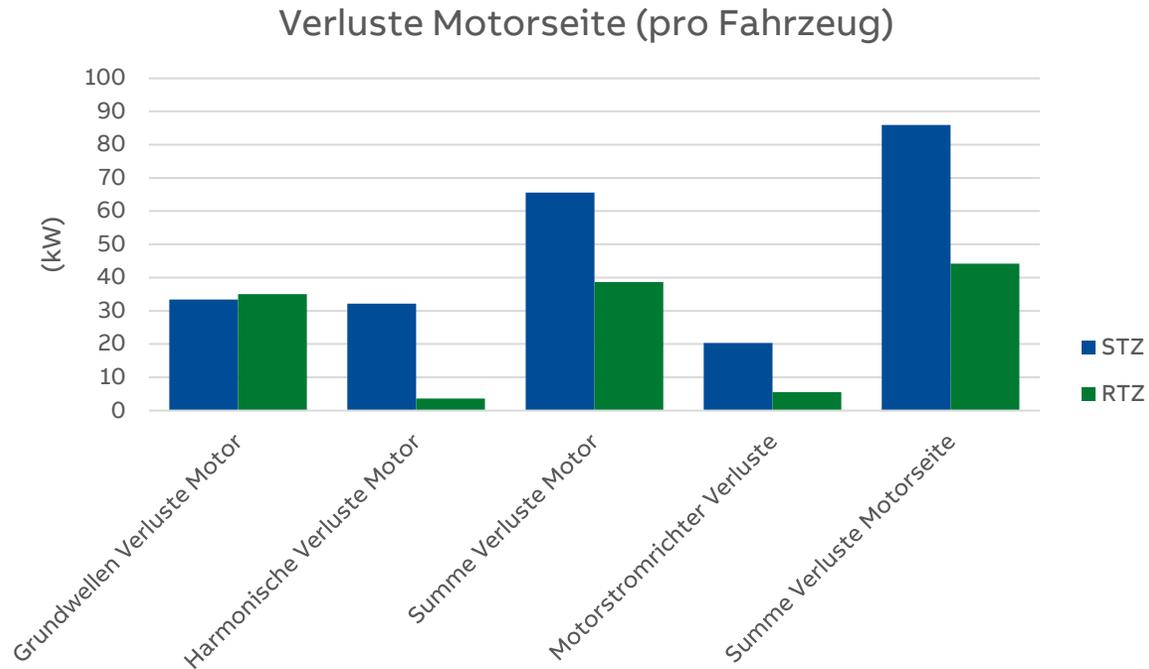


- THD des Motorstroms: ca. 5%

Deutlich sinusförmigen Strom- und Spannungsverläufen am Motor beim 3L-Stromrichter!

Vergleichsmessung RhB - Motorseite

Bestätigung mit Rechnung



- Rechnung gemittelt über das ZV Diagramm, ohne Bewertung via Lastzyklus
- Vergleichbare Grundwellenverluste am Motor
- 10x tiefere harmonische Verluste im Motor beim RTZ
→ Dank motorfreundlicher Spannungsform des 3L-Stromrichters
- Hohe Verluste am Motorstromrichter beim STZ
→ Motorfreundlichere Taktung war nicht möglich

Dank dem 3L-Motorstromrichters vom RTZ werden die Motorverluste im Vergleich zum STZ fast halbiert!

Zusammenfassung Motorseite

Generell: 2L im Vergleich zum 3L

Verhalten am Motor:

- Prinzipiell: Trade-off zwischen hohen Motorverlusten (Harmonische Verluste) und hohen Stromrichterverlusten (hohe Schaltfrequenz)
→ Bei Betrieb mit dem 3L-Stromrichter resultieren aber 30-50% reduzierte Motorverluste trotz tieferer Stromrichterverluste!
- Hohe Stromrichterverluste beim 2L-Stromrichter limitieren maximale Schaltfrequenz – Motorfreundliches Verhalten ist nicht möglich
- Ein Motor kommt bei Betrieb am 3L-Stromrichter später an seine thermische Grenzen:
→ Höhere Performance oder kleiner dimensionierte ist Kühlung möglich!
- Der halbierte Spannungsschritt beim 3L-Stromrichter reduziert die Belastung der Isolation am Motor, reduziert Lagerströme und führt zu tieferen Common-Mode Spannungen.

Zusammenfassung Motorseite

Generell: 2L im Vergleich zum 3L

Halbleiter:

- Ähnliche total verbaute Chipfläche beim 2L- und 3L-Stromrichter
- Chipfläche aufgeteilt auf mehr Halbleitermodule = feinere Granularität
Diese feinere Granularität erlaubt die intelligentere Anordnung in Form eines Multilevel-Stromrichter (3L-Stromrichter)
- Mit einem Multilevel-Stromrichter kann eine sinusförmigere Spannung erzeugt werden als mit einem 2L-Stromrichter
- Der Betrieb als Multilevel-Stromrichter erfordert aber eine höhere Komplexität in der Ansteuerung
- Die Halbleitermodule des 3L-Stromrichters sind von einer tieferen Spannungsklasse als beim 2L-Stromrichter
→ Technologische Fortschritte bei den Halbleitern werden zuerst bei den tieferen Spannungsklassen eingeführt

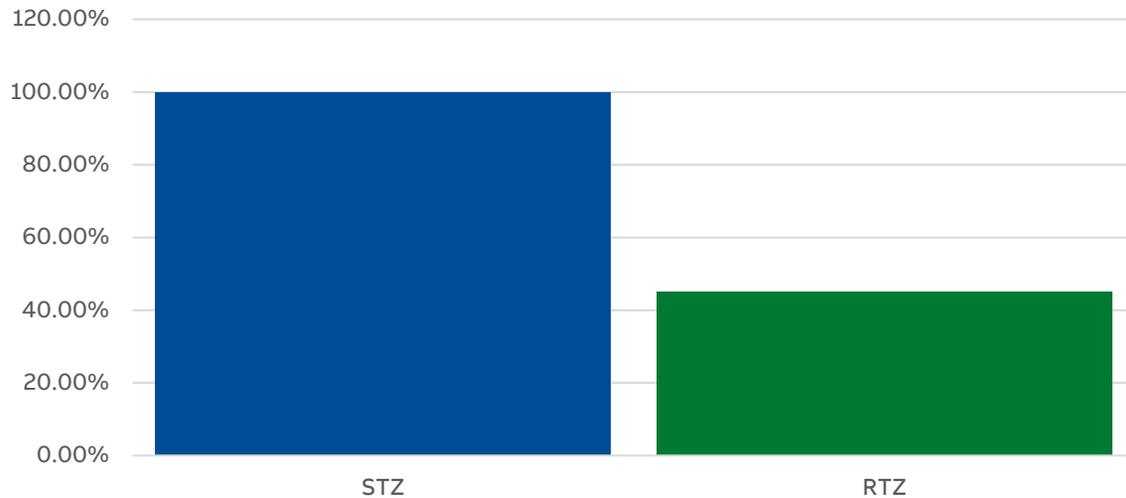


Netzseite

Vergleichsmessung RhB - Transformatorverluste

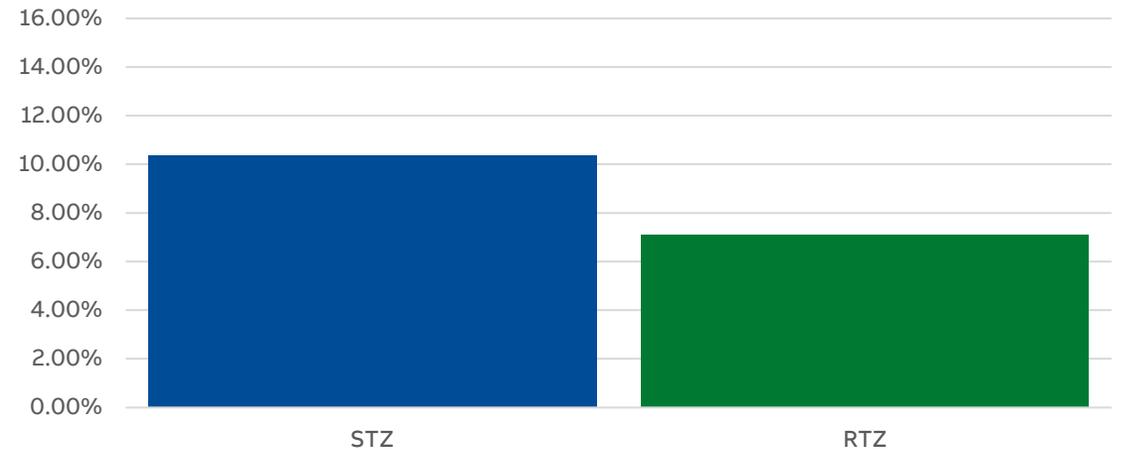
- Transformatorverluste berechnet auf Basis der gemessenen Netzleistung und den Datenblattwerten

kumulierte Transformatorverluste



- Transformatorverluste haben einen substantziellen Anteil am Gesamtenergieverbrauch

Anteil Transformatorverluste am Gesamtenergieverbrauch

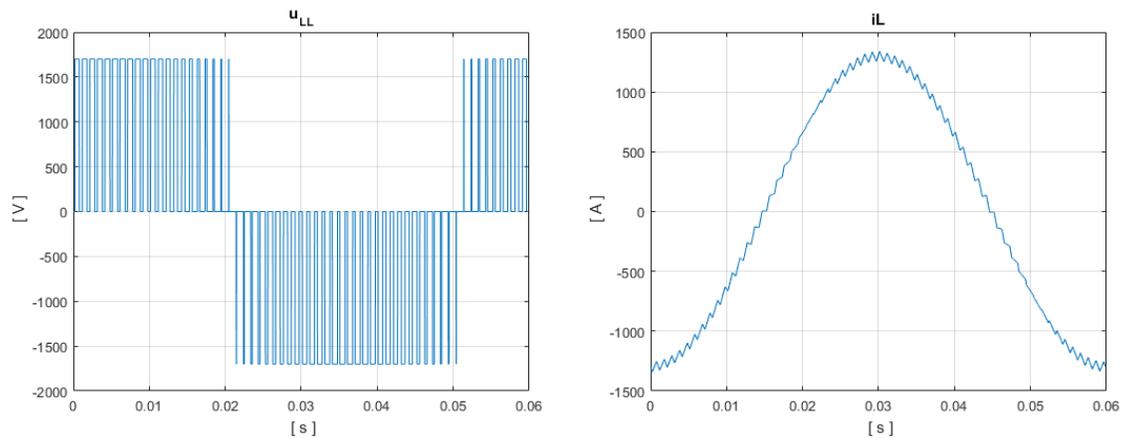


Über 50% reduzierte Transformatorverluste beim RTZ

Vergleichsmessung RhB - Transformator

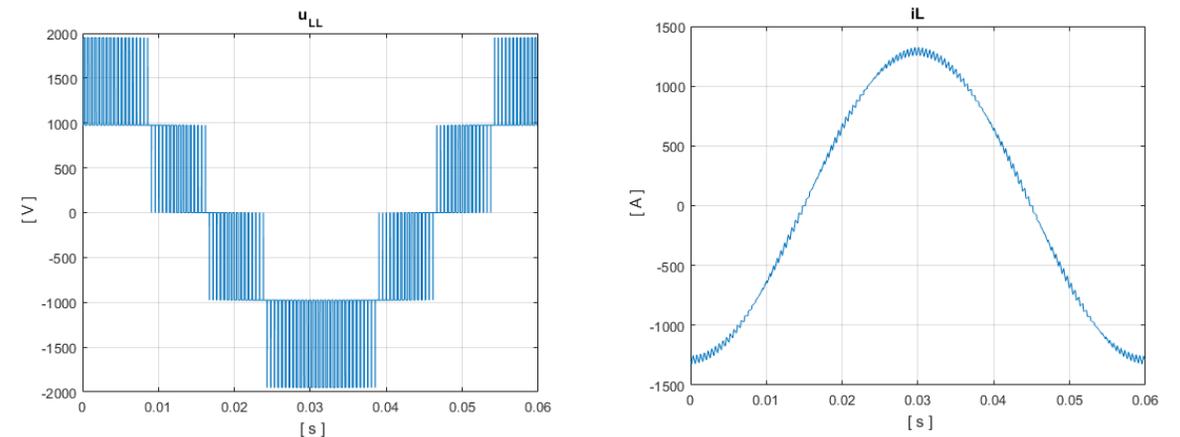
Erklärung der Resultate – Simulation der Verläufe

STZ Spannungs- und Stromverläufe (2L-Stromrichter)



- THD des Sekundärstroms: ca. 2.5%
- Kurzschlussspannung: ca. 21%

RTZ Spannungs- und Stromverläufe (3L-Stromrichter)



- THD des Sekundärstroms: ca. 2%
- Kurzschlussspannung: ca. 7 %

Dank dem weicheren Trafo erreicht der 2L-Netzstromrichter eine ähnliche Stromqualität wie der 3L-Netzstromrichter.

Zusammenfassung Netzseite

Generell: 2L im Vergleich zum 3L

- Dank intelligenterer Verwendung der verbauten Chips kann mit dem 3L-Stromrichter im Vergleich zum 2L-Stromrichter eine sinusförmigere Stromrichterspannung erzeugt werden
- Netzfreundlichere Stromformen trotz tieferer Stromrichterschaltfrequenz und tieferer Transformator-Kurzschlussspannung beim 3L Stromrichter
→ Resultierendes Störströme am Netz sind mit dem 3L Netzstromrichter deutlich reduziert
- Transformator: Höhere Verluste bei höherer Kurzschlussspannung da $R \propto L_s$
→ Beim STZ im Vergleich zum RTZ sind dies Faktor 1.5 - 2x höhere Verluste!
- Transformator: 3L-Netzstromrichter erlauben den Einsatz von Trockentransformatoren
→ Damit entfällt der Unterhalt des Ölkreises des Öltransformators und der Einsatz einer (verlustbehafteten) Ölpumpe entfällt

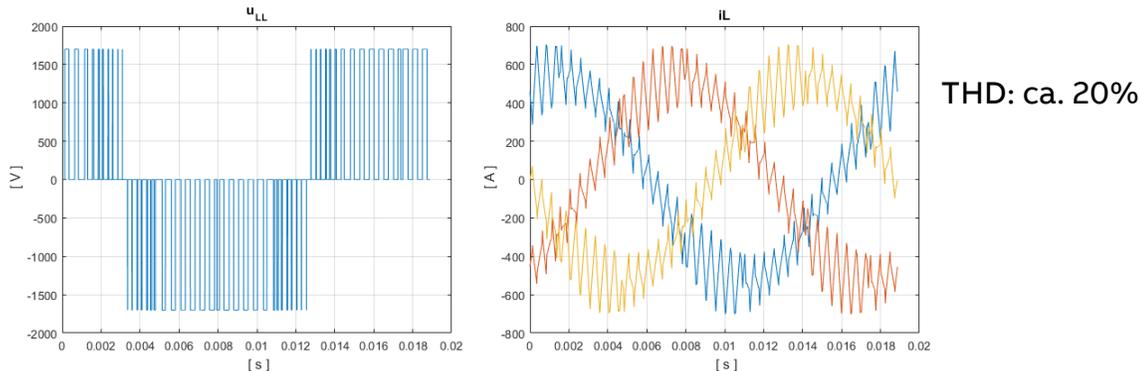


Ausblick und Zusammenfassung

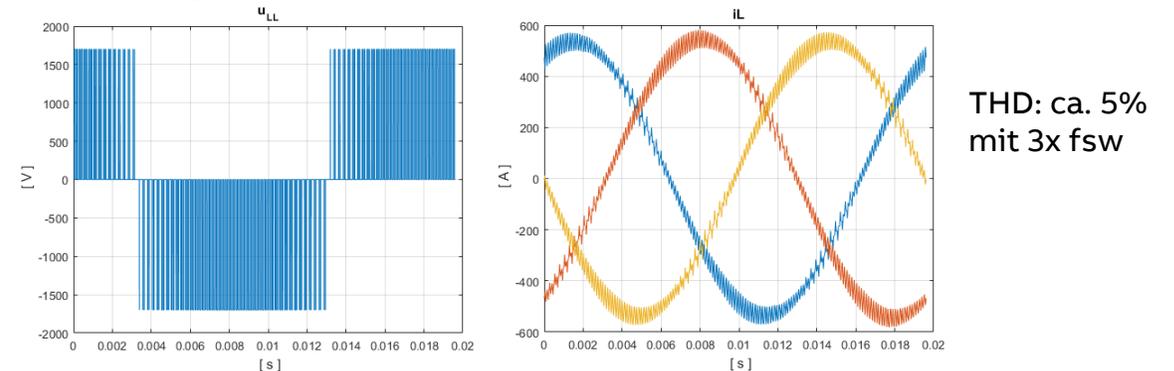
Ausblick: 2L mit SiC

- Dank tieferen Stromrichterverluste mit SiC Halbleitern ist die erhöhte Taktfrequenz mit dem 2L möglich, mit welcher ähnliche Stromformen erzeugt werden können wie mit dem 3L Stromrichter

STZ Spannungs- und Stromverläufe (2L-Stromrichter)



Spannungs- und Stromverläufe SiC-2L-Stromrichter



- Dank der nun umsetzbaren Taktfrequenz, kann auch mit dem 2L-Stromrichter ein Transformator mit tiefer Kurzschlussspannung eingesetzt werden
- Aber: Die hohe Komplexität und die hohe Anzahl Halbleiter des 3L-Stromrichters wird bei einem Wechsel auf SiC 2L-Stromrichter durch aktuell hohe Halbleiterkosten und limitierte Zuverlässigkeit ersetzt

Zusammenfassung

- Praktisches Beispiel am Vergleich vom RTZ zum STZ bei der RhB zeigt eine Energieeinsparung von 30% am gemessenen Lastzyklus dank dem Einsatz eines modernen 3L-Stromrichters
- Der 3L-Stromrichter spart Energie am Motor durch (massiv) tiefere harmonische Verluste
- Der 3L-Stromrichter reduziert die Stromrichterverluste durch die Verwendung von fortschrittlicheren Halbleitern mit tieferer Spannungsklasse im Vergleich zum 2L-Stromrichter
- Der 3L-Stromrichter reduziert die Transformatorverluste und das Transformatorgewicht, da es ein Transformator design mit weniger Kurzschlussspannung ermöglicht
- Der 3L-Stromrichter reduziert die netzseitigen Störströme und führt so zu einer besseren EMV-Verträglichkeit

Diese Dokumente sind ausschliesslich für die Teilnehmenden dieser Veranstaltung bestimmt.
Aus urheberrechtlichen Gründen wird keine andere Verbreitung der Dokumente oder von Auszügen erlaubt.
Die Urheberrechte verbleiben dabei beim jeweiligen Autor.

ABB