

## Elektrische Temperierung von intermodalen Transporten temperaturempfindlicher Güter



Peter Bark  
Angelika Treiber



## Vorwort

Der vorliegende Bericht stellt eine Bilanz dar des Projekts *Elektrische Temperierung bei intermodalen Transporten temperaturempfindlicher Waren*. Das Projekt ist von TFK – TransportForsK (TFK) in enger Zusammenarbeit mit Befrachtern, bestehend aus einem Akteur im Konsumgüterhandel, einem Eisenbahnverkehrsunternehmen, einem Güterwagenvermieter sowie Herstellern von rollendem Material beziehungsweise Temperierungsanlagen, durchgeführt worden.

Verfasser dieses Berichts sind Peter Bark und Angelika Treiber.

Das Projekt wurde mit finanzieller Unterstützung der schwedischen Energieverwaltung sowie der derzeitigen Interessenten durchgeführt.

Die Interessenten haben via Arbeitsgruppen vom Ergebnis des Projekts Kenntnis genommen und auch die Möglichkeit gehabt, die Zielrichtung des Projekts zu beeinflussen. Ausserdem haben die Mitglieder der Projektgruppe uns bei Qualitätsmanagement und Inhaltsprüfung des Berichtes unterstützt. Die Projektgruppe bestand in der Demo-Phase aus folgenden Personen:

Mats Abrahamsson	TX Logistik
Peter Bark	TFK
Olle Ek	früher Bombardier Transportation
Kjell Håkansson	Coop Logistik
Peter Popp	Amphenol
Bo Engdahl	Wascosa
Xx	Thermo-King
Angelika Treiber	TFK

Das Ergebnis des Projekts und der Inhalt des Berichts sind darüber hinaus von Prof. em. Evert Andersson, Kungliga Tekniska Högskolan, überprüft worden.

TFK möchte sich hiermit bei den Geldgebern, sonstigen Interessenten und deren Mitarbeitern bedanken, die direkt am Projekt mitgearbeitet haben, wichtige Infos beigetragen haben oder sich auf andere Weise aktiv am Projekt beteiligt haben.

Stockholm im Juni 2018

Peter Bark, Geschäftsführer

# Inhalt

Zusammenfassung.....	1
Summary.....	2
1. Einleitung.....	3
1.1 Hintergrund.....	3
1.2 Problem.....	3
1.3 Elektrisch temperierte Transporte .....	4
1.4 Ziele des Projekts.....	4
2. Methode und Durchführung.....	5
2.1 Beschreibung der Methode.....	5
2.2 Durchführung.....	5
2.3 Zeitplan.....	5
2.4 Frühere Untersuchungen.....	6
2.5 Literaturstudien und Analysen des Umfelds.....	7
2.6 Konzepte in Bezug auf Systeme zur Stromübertragung.....	10
3. Demo und Testbetrieb.....	13
3.1 Versuchssystem für Demo und Tests.....	13
3.2 Intermodale Eisenbahnwagen für Demo- und Testbetrieb.....	15
3.3 Analyseobjekt.....	16
3.4 Messgeräte bei Demo- und Testbetrieb.....	17
3.5 Erhebung der Messdaten.....	17
3.6 Erfahrungen mit dem Betriebs-Handling.....	18
4. Anlaysen.....	19
4.1 Durchgeführter Testbetrieb.....	19
4.2 Lärmemision von temperierten intermodalen Zügen.....	23
5. Elektrische Temperierung intermodaler Züge .....	25
5.1 Ansatz zur elektrischen Temperierung des Coop-Zugs.....	25
5.2 Elektrische Temperierung bei Transporten Narvik – Oslo.....	32
5.3 Ansatz zur Ausrüstung für den Stromtransfer zwischen Waggons.....	36
6. Ergebnisse und Schlussfolgerungen.....	37
6.1 Ansätze.....	37
6.2 Demonstrations- und Testbetrieb.....	37
6.3 Elektrische Temperierung von intermodale Systemzüge.....	38
6.4 Ergebnisse.....	39
6.5 Schlussfolgerungen.....	39
6.6 Weitere Studien.....	40
7. Referenzen .....	41
Anhang .....	43

## Zusammenfassung

Es wurde eine Lösung für die elektrische Temperierung von intermodalen Ladungsträgern bei Bahntransporten entwickelt und an dem intermodalen Schienentransportsystem namens Coop-Zug demonstriert, getestet und evaluiert. In diesem System werden temperaturempfindliche Waren, wie Konsumgüter des täglichen Bedarfs, unter anderem zwischen Schonen und dem Grossraum Stockholm transportiert. Ein Ziel war es, die jeweilige technische Lösung zu testen und Energie-, Umwelt- und Kosteneffekte eines Übergangs von dieselbasierter zu elektrischer Kühlung zu quantifizieren. Eine Herangehensweise bestand darin, die mit Stromaggregaten und Umrichtern ausgerüsteten Eisenbahnwagen bei Bahntransporten auf elektrifizierten Strecken über die Lok und das vorhandene Zugheizungssystem mit Strom von der Fahrleitung zu versorgen. Es wurde Einphasenwechselstrom mit einer Frequenz von 16⅔ Hz auf die Eisenbahnwagen übertragen und dort in Drehstrom von 400 V und 50 Hz umgewandelt, der zur Stromversorgung der Temperierungsaggregate der Ladungsträger benutzt wurde. Acht Ladungsträger in Form von Sattelanhängern (Trailer) mit für Dieselbetrieb bzw. Strombetrieb bestimmten Temperierungsaggregaten waren dabei das Untersuchungsobjekt des Projekts.

Elektrische Temperierung hatte zur Folge, dass der Energieverbrauch um über 80 % reduziert wurde und 1,8 l Dieselkraftstoff pro Betriebsstunde und Sattelanhänger eingespart wurden. Der Stromverbrauch bei Kühl- bzw. Tiefkühltemperierung betrug an der Fahrleitung 3,2 kWh pro Betriebsstunde und Sattelanhänger. Mit den im Oktober 2017 aktuellen Preisen für Strom und Dieselkraftstoff ergaben sich Kosteneinsparungen von über 90 %. Darüber hinaus wurde analysiert, welche Wirkung es hat, wenn die Mehrzahl der mit temperaturempfindlichen Waren beladenen und mit dem Coop-Zug beförderten Sattelanhänger elektrisch temperiert wird. Das Ergebnis deutet auf totale Energieeinsparungen von jährlich 2,0 GWh und Kraftstoffeinsparungen von jährlich 250 m<sup>3</sup> hin. Ausserdem konnten die CO<sub>2</sub>-Emissionen um 360-690 t pro Jahr reduziert werden, wobei sich die grösste Minderung beim Übergang von fossilem Diesel zu 100 % regenerativem Strom ergab, wo CO<sub>2</sub>-Emissionen von 690 t/Jahr eliminiert wurden. Die niedrigste Minderung ergab sich bei der Umstellung von Umweltdiesel (B20) auf elektrische Energie entsprechend dem „nordischen Rest-Mix“, wo die Minderung 70 % betrug. Die Effekte einer Einführung von elektrischer Temperierung wurden ausserdem für intermodale Züge auf der Strecke Narvik – Kiruna – Oslo untersucht, die eine Länge von 1 960 km und eine Transportzeit von 27 Stunden hat. Hier könnten Energieeinsparungen von jährlich 6,6 GWh realisiert werden.

Die Anschaffungs- und Instandhaltungskosten von intermodalen Eisenbahnwagen steigen, wenn Stromversorgung und Umrichteranlagen installiert werden. Wenn dies bei verschiedenen Wagenverbänden des Coop-Zugs in das Verhältnis zu den gesunkenen Energiekosten gestellt wird, ergeben sich bei elektrischer Temperierung Nettoeinsparungen von 0,1–1,5 Mio. SEK pro Jahr. Auf der Strecke Narvik–Kiruna–Oslo betragen die Einsparungen 0,5–3,5 Mio. SEK pro Jahr. Ausserdem wurde untersucht, welchen Effekt es hat, wenn Ladungsträger auf 1-2 Eisenbahnwagen, die nur mit Drehstromkabeln für den Stromanschluss von Sattelanhängern ausgerüstet werden, von einem Eisenbahnwagen mit Strom- und Umrichteraggregat mit Strom versorgt werden. Bei zwei Wagen je Anlage stiegen die Einsparungen beim Coop-Zug auf 1,1–2,5 Mio. SEK, und bei drei Wagen je Anlage auf 1,9-2,7 Mio. SEK/Jahr. Auf der Strecke Narvik – Kiruna – Oslo lagen die Einsparungen bei 4,9–7,4 Mio. SEK/Jahr bei zwei Wagen je Anlage, und bei 6,5–8,4 Mio. SEK/Jahr bei drei Wagen je Anlage. Das bedeutet, dass mit einer Anlage zur Stromversorgung von mindestens zwei Eisenbahnwagen eine gute Rentabilität erreicht werden kann.

Die Demonstration ergab, dass das getestete System robust ist und gut funktioniert und gut an das vorhandene System zur Stromversorgung von Eisenbahnwagen bzw. Ladungsträgern – nach Industrienorm – angepasst ist. Die Auswertung zeigte, dass einer vollständigen Implementierung des aktuellen Systems für elektrische Temperierung nichts im Wege steht. Analysen liessen erkennen, dass grosse Einsparungen möglich sind, wenn Sattelanhänger mit Strom anstatt mit Dieselkraftstoff temperiert werden. Mit elektrischer Temperierung verringert sich ausserdem die Umweltbelastung durch intermodale Transporte. Das System ergibt zudem grosse Energiekosteneinsparungen, was aber in Relation zu den höheren Kapitalkosten gesehen werden muss.

Bedeutende Vorteile hat die Einführung von Systemen, die eine elektrische Temperierung ermöglichen, auch bei Transporten auf der Strasse. Bei elektrifizierter Temperierung lassen sich zusätzliche Kosteneffekte erreichen, wenn Dieselmotoren in den Temperierungsaggregaten der Ladungsträger vermieden werden können. Es besteht daher ein Bedarf dafür, in einer Folgeuntersuchung zu untersuchen, welche Möglichkeiten es gibt für die Entwicklung von Lösungen zur elektrischen Temperierung von Ladungsträgern bei Strassen- und Bahntransporten, bei denen Dieselmotoren in den Ladungsträgern vermieden werden.

## Summary

A solution for electric refrigeration of intermodal load units transported by rail has been developed and demonstrated, tested and evaluated in the intermodal rail transport system called the Coop train. In this system temperature-sensitive goods such as groceries, among other things, are transported between Skåne and the Stockholm area. An aim was to test a technical solution, as well as to quantify the energy, environmental and cost impact of switching from diesel to electric tempering. An approach was to supply railway wagons equipped with electric AC/AC power converters in intermodal railway transports, on electrified tracks, by electric power from catenary, or over-head wires, via the locomotives. 1-phase AC with a frequency of  $16\frac{2}{3}$  Hz was transferred to wagons, where it was converted to 3-phase current at 400 V and 50 Hz frequency which supplied the refrigeration units of the load carriers. 8 semi-trailers with refrigeration units intended for diesel alternative electric power were accounted for analysis objects in the project.

Electric refrigeration caused the energy consumption to decrease by over 80 %. Also 1.8 litres of diesel fuel was saved per hour of electric operation and semi-trailer. Electricity consumption for refrigeration was amounted to 3.2 kWh per hour of operation and semi-trailer. With the prices of electricity and diesel fuel that was applied in October 2017, this meant cost a reduction of over 90 %. Further analyzed were effects of electrical refrigeration of the major part of the semi-trailers loaded with temperature-sensitive goods and transported with the Coop train. This indicated the total energy savings of 2.0 GWh/year and fuel savings of 250 m<sup>3</sup>/year. In addition, carbon dioxide emissions could be reduced by 360–690 tonnes/year. The main outcome was obtained at the transition from fossil diesel to 100 % renewable electricity where 690 tonnes/year of carbon dioxide were eliminated. A minimum outcome was obtained during transition from biodiesel (B20) into electrical energy with composition according to the Nordic residualmix, where the decrease was amounted to 70 %. Effects of introducing electric refrigeration was also studied on intermodal trains at the route Narvik–Kiruna–Oslo, which has a length of 1 960 km and a transit time of 27 hours. In this case energy saving of 6.6 GWh/year could be achieved.

Acquisition and maintenance cost of intermodal rail wagons increases if converters are installed. If that for the Coop-train is set in relation to reduced energy costs net savings with electric tempering at the rate of 0.1–1.5 million SEK/year were indicated. On the Narvik – Kiruna – Oslo route savings amounted to 0.5–3.5 million SEK/year. Further the effects of having a railway wagon with converter supplying load carriers on 1–2 additional wagons without such equipment, which may only be supplied with 3-phase wiring for electrical connection of semi-trailers was investigated. With 2 wagons per converter the savings in the Coop-train increased to 1.1–2.5 million SEK/year, and with 3 trailers per equipment increased to 1.9–2.7 million SEK/year. For the Narvik–Kiruna–Oslo route savings of 4.9–7.4 million SEK/year on the 2 wagons per converter and on 6.5–8.4 million SEK/year for 3 wagons per converter could be earned. This meant that the profitability could be created by using a converter to supply at least two wagons.

The demonstration showed that the tested system is robust and works well and is well adapted to the existing systems of electric power supply of railway vehicles and load carriers as the industry standard. The evaluation showed that there are no obstacles for a full-scale implementation of the current system for electric refrigeration. Analyses indicated that significant energy savings were possible when semi-trailers were refrigerated with electricity instead of diesel fuel. Further the environmental impact of intermodal transports are reduced with electric tempering. The system also provides large energy cost savings which however have to be related to capital costs.

Significant benefits exist in introducing systems that allow electrified tempering also at road transports. In addition, cost efficiency can be achieved if diesel engines can be avoided in the load carrier refrigeration units. Therefore there is a need of future studies to examine the possibilities of developing solutions for electrified tempering of load carriers in road and rail transport where the diesel engines on the load carriers, or units, is avoided.

# 1. Einleitung

## 1.1 Hintergrund

Temperaturempfindliche Waren haben oft eine zeitlich begrenzte Haltbarkeit und bestehen vor allem aus Lebensmitteln bzw. Konsumgütern des täglichen Bedarfs, Medikamenten und Rohstoffen für die Herstellung von Lebensmitteln. Für diese Waren sind temperierte Lieferketten, mit einer hochwertigen Temperaturhaltung auf sämtlichen Stufen der Lieferkette ein wichtiger Teil in einem Prozess, der die Erhöhung der zeitlichen Haltbarkeit der Ware bezweckt.

Eine gute Kühlkette bedeutet zudem, dass Haltbarkeit und Expositionszeit der Frischwaren im Laden erhöht werden können und das Zeitfenster, innerhalb dessen die jeweilige Ware beim Endkunden oder Verbraucher konsumierbar ist, grösser wird. Für eine Ware des täglichen Bedarfs werden damit die beiden Zeitfenster grösser, in denen sie im Laden verkauft beziehungsweise vom Endkunden oder Endverbraucher konsumiert werden kann.

Bei Alltagsprodukten und Lebensmitteln unterscheidet man üblicherweise folgende vier Hauptkategorien, je nach Anforderungen bezüglich der Temperierung während Transport und Verteilung (Bark et al, 2014):

- Kolonialwaren, auch Trockenware und Non-Food genannt (frostfrei, das heisst über 0 °C, aber am besten nicht über +20 °C)
- Obst und Gemüse (+8°C)
- Kühlwaren, auch Frischwaren genannt (+ 2 °C)
- Tiefkühlwaren (- 25°C).

Ferner gibt es im Verteilungssystem der Lebensmittelbranche Produkte mit hohen Ansprüchen an die Temperaturkontrolle, wie z. B. Arzneimittel (Håkansson, 2018). Das muss vor dem Hintergrund von höheren Anforderungen bezüglich korrekter Temperaturhaltung während der gesamten Transportkette gesehen werden. Durch eine korrekte Temperierung auf der gesamten Transportkette lässt sich die Menge der inkuranten Waren, die wegen zu grosser Temperaturabweichungen, d. h. zu hoher oder zu niedriger Temperatur, entsorgt werden müssen, verringern.

Temperierte Transporte sind ausserdem ein wesentlicher Teil der Lebensmittelversorgung und erfüllen damit eine wichtige gesellschaftliche Funktion. Es ist daher von grosser Bedeutung, dass die diesbezüglichen Transportlösungen transport- und energieeffizient sind und – kurzfristig und langfristig – ökonomisch und ökologisch nachhaltig sind.

Die drei grössten Handelsunternehmen für Konsumgüter des täglichen Bedarfs und Lebensmittelgrossisten in Schweden, wie Coop, Dagab und ICA, haben im Zeitraum 2008 - 2010 jährlich ca. 3,2 Mio. Tonnen Alltagsprodukte gehandhabt und befördert, das heisst 80 % des gesamten diesbezüglichen Warenflusses in Schweden (Jensen *et al.*, 2011). Davon bestand die Hälfte aus temperierten Waren (Kühlwaren/Tiefkühlwaren sowie Frischwaren), was bedeutet, dass der gesamte Warenfluss dieser temperierten Waren in Schweden im betreffenden Zeitraum auf 2 Mio. Tonnen pro Jahr geschätzt werden kann (Bark *et al.*, 2017).

Im Vergleich dazu betrug die Gesamtmenge intermodaler Güter 2015 in Schweden 10,2 Mio. Tonnen, wovon ungefähr 60 % innerhalb Schwedens transportiert wurden (Bark *et al.*, 2017). Im gleichen Jahr (2015) wurden insgesamt 65 Mio. t Güter mit der Eisenbahn befördert. Ferner wurden in diesem Jahr in Schweden 417 Mio. t Güter mit Lastwagen mit schwedischer Zulassung transportiert. Der Auslandsverkehr mit Lastwagen mit schwedischer Zulassung belief sich auf 6 Mio. Tonnen, wovon der Hauptteil (4 Mio. t) auf Transporte zwischen Schweden und Norwegen entfiel. In Norwegen betragen die innerstaatlichen Warentransporte per Eisenbahn 10,6 Mio. Tonnen im Jahr 2015, während die grenzüberschreitenden Transporte sich auf 11,0 Mio. Tonnen beliefen.

## 1.2 Problem

Transporte von temperaturempfindlichen Gütern, die Temperierung benötigen, sind mit einem höheren Energieverbrauch und grösserer Umweltbelastung verbunden als Transporte von anderen Gütern. Das ist deshalb so, weil sowohl beim eigentlichen Transport als auch bei der Temperierung der Güter Energie verbraucht wird.

Frühere Untersuchungen haben gezeigt, dass Temperierung teuer und mit einer erheblichen Umweltbelastung verbunden ist, vor allem durch die CO<sub>2</sub>-Emissionen der dieselgetriebenen Verbrennungsmotoren, mit denen die derzeitigen Temperierungsaggregate ausgerüstet sind, und die bei Strassentransporten überwiegend, und gegebenenfalls auch bei Bahntransporten, für den Antrieb der Aggregate genutzt werden. Bei Strassentransporten temperaturempfindlicher Güter kann die Temperierung für ungefähr 16 % der Gesamtemissionen an Treibhausgasen dieser Transportform verantwortlich gemacht werden (Skoglund *et al.*, 2010).

### 1.3 Elektrisch temperierte Transporte

Da die Bahntransporte, die ein Glied in einer intermodalen Transportkette darstellen, meistens mit Elektrolokomotiven auf elektrifizierten Strecken durchgeführt werden, stammt wohl ein grosser Teil der CO<sub>2</sub>-Emissionen von den Temperierungsaggregaten. Wenn intermodale Ladungsträger aufgestellt sind, können die Aggregate oft mit Strom aus dem allgemeinen Stromnetz betrieben werden. Bisher wurden die Aggregate jedoch vor allem mit Dieselmotoren betrieben, auch dann, wenn intermodale Ladungsträger auf elektrifizierten Strecken transportiert werden.

Frühere Untersuchungen haben gezeigt, dass die Aggregate bei Schienentransporten, nach der Entwicklung neuer technischer Lösungen, mit Strom betrieben werden könnten, der via Lok von der Oberleitung der Strecke eingespeist wird. Es ist davon auszugehen, dass die elektrische Temperierung bei intermodalen Schienentransporten von Konsumgütern des täglichen Bedarfs die mit der Temperierung verbundenen Energiekosten und CO<sub>2</sub>-Emissionen um 20 % reduziert. Ein Grund dafür, dass Diesel verwendet wird, ist, dass der einphasige Wechselstrom der Fahrleitung, der eine Spannung von 16 kV und eine Frequenz von 16 $\frac{2}{3}$  Hz hat, bisher nicht rationell bzw. kosteneffizient in Dreiphasenwechselstrom von 400 V Spannung und 50 Hz, mit dem ein Grossteil der Temperierungsaggregate betrieben werden kann, umgewandelt werden konnte. Ausserdem war es schwierig, die betreffende elektrische Energie auf rationelle Weise auf die Ladungsträger in einem intermodalen Zug zu übertragen.

Bei den meisten Elektrolokomotiven, die auf dem schwedischen und norwegischen Bahnnetz zum Einsatz kommen, kann die Spannung der Fahrleitung, das heisst 16 kV mit einer Frequenz von 16 $\frac{2}{3}$  Hz, auf 1 kV heruntertransformiert werden, die danach im Zug als Zugheizungsstrom zur Verfügung steht. Auch gibt es technische Normen für die Verteilung der Heizspannung innerhalb des Zugs und für die Form der Kabel und Kupplungen zwischen den Eisenbahnwagen.

Elektrisch betriebene Temperierung lässt sich realisieren, indem die Heizspannung, mit Hilfe von Technik, die in den intermodalen Wagen installiert wird, in Strom der gewünschten Form umgewandelt wird. Dies erfordert spezielle Anlagen/Umrichter, um die einphasige Heizspannung, die von der Lokomotive stammt, in den gewünschten Drehstrom von 400 V 50 Hz umzuwandeln.

Um die Umstellung auf Elektrobetrieb und die erforderlichen Investitionen rechtfertigen zu können, ist es wichtig, dass die daraus resultierenden wirtschaftlichen und umweltbezogenen Vorteile quantifiziert werden. Das wirtschaftliche, energetische und umweltspezifische Potential von elektrisch betriebener Temperierung resultiert aus den Effekten, die sich aus einer geringeren Verwendung von Dieselmotoren zugunsten einer vermehrten Nutzung von elektrischer Energie ergeben.

### 1.4 Ziele des Projekts

Das Projekt verfolgte das Ziel, ein System zur elektrischen Temperierung von intermodalen Transporten temperaturempfindlicher Güter, insbesondere Konsumartikeln des täglichen Bedarfs, vorzuführen und auszuwerten. Ein weiteres Ziel bestand darin, das Bewusstsein und Wissen in Bezug auf die Umweltfolgen zu erhöhen, die mit der Temperierung von Alltagsprodukten bei intermodalen Transporten verbunden sind.

Ferner zielte das Projekt darauf ab, Barrieren vor allem technischer Natur abzubauen, die einer Einführung elektrisch betriebener Temperierungssysteme im Wege stehen.

Mit einer Demonstrations- und Testprozedur sollte quantifiziert werden, wie gross die verbrauchte Energiemenge ist und wie hoch die Emissionen sind, die bei temperierten modalen Transporten entstehen. Ferner ging es darum, ein klareres Bild der Energienutzung in der intermodalen Transportkette zu erhalten. Ein weiteres Ziel bestand darin, den Energieverbrauch und die Umwelteffekte einer Umstellung auf elektrische Temperierung bei Bahntransport von intermodalen Ladungsträgern zu analysieren und quantifizieren.

## 2. Methode und Durchführung

### 2.1 Beschreibung der Methode

Das Projekt kann als ein iterativer Entwicklungsprozess betrachtet werden, wo zwei Hauptalternativen für die elektrische Temperierung von intermodalen Ladungsträgern bei Bahntransport betrachtet wurden. Später wurde dann für die weitere Projektarbeit eine Lösung ausgewählt. In Zusammenarbeit mit einem Waggoneigentümer, einem Waggonhersteller und einem Hersteller von Umrichteranlagen wurde eine Test- und Demonstrationsanlage in Form von speziell ausgerüsteten Eisenbahnwagen konzipiert. Die Auswertung fand unter normalen Betriebsbedingungen statt und die Analyse basierte auf den hierbei gesammelten Daten.

### 2.2 Durchführung

Im Rahmen des Projekts wurden zwei zum Transport von Sattelanhängern (Trailern) bestimmte Eisenbahnwagen mit Umrichter- und Umwandlungstechnik sowie Verkabelung und Anschlüssen ausgerüstet. Die Wagen wurden in den intermodalen Zügen eingesetzt, die für Coop Logistik Produkte des täglichen Bedarfs zwischen Malmö und einem in Bro in der Nähe von Stockholm gelegenen Distributionszentrum transportieren.

Während der Tests erfolgte eine regelmässige Überwachung und Evaluierung, unter anderem des Energieverbrauchs der Temperierungsaggregate bei Strom- bzw. Dieselpetrieb. Zudem wurde die Temperaturhaltung in den betreffenden Ladungsträgern kontrolliert. Ziel war es, eine vermutete Verringerung des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen zu quantifizieren. Ausserdem ging es darum, die wirtschaftlichen Effekte einer geringeren Dieselnutzung hinsichtlich geringerer Kraftstoffkosten und höherer Stromkosten zu erfassen.

### 2.3 Zeitplan

Das Projekt bestand aus folgenden Etappen:

#### 1. *Literaturstudien und Analyse des Umfelds*

Bisherige Untersuchungen wurden gesichtet und inventarisiert.

#### 2. *Systemlayout für die elektrische Temperierung bei intermodalem Bahntransport*

In Zusammenarbeit mit Projektbeteiligten wurden Konzepte entwickelt, wie ein nachhaltiges System zur elektrischen Temperierung von intermodalen Ladungsträgern konzipiert werden kann.

#### 3. *Planung und Durchführung des Demonstrations- und Versuchsbetriebs*

In Zusammenarbeit mit den Projektbeteiligten wurde der Demonstrations- und Versuchsbetrieb geplant und durchgeführt, in dessen Rahmen Messdaten erhoben wurden.

#### 4. *Erhebung von Messdaten*

Es wurden Messdaten erhoben von Ladungsträgern, die mit Messgeräten und Datenschreibern ausgerüstet waren. Zudem wurde bei diesen Ladungsträgern der Dieselmotorkraftstoffverbrauch überwacht.

#### 5. *Analysen*

Anhand der gesammelten Daten wurde der Energieverbrauch bei elektrischer Temperierung analysiert und mit dem Energieverbrauch bei dieselpasierter Temperierung verglichen. Ausserdem wurden die Umweltfolgen und wirtschaftlichen Effekte eines Umstiegs auf elektrische Temperierung kalkuliert.

#### 6. *Fazit*

Anhand der Erfahrungen des Versuchsbetriebs und gestützt auf die Analysedaten wurden Schlüsse gezogen und ein Fazit formuliert. Auch wurde ein Szenario erstellt in Bezug auf die Auswirkungen eines vollmasstäblichen Betriebs.

#### 7. *Bericht*

Das Ergebnis wurde in einem von TFK herausgegebenen Abschlussbericht zusammengefasst und darüber hinaus den Geldgebern des Projekts und sonstigen Beteiligten zugeschickt.

## 2.4 Frühere Studien

TFK hat auf diesem Gebiet schon ein paar Untersuchungen durchgeführt, auf die bei diesem Demonstrationsprojekt zurückgegriffen werden kann.

### 2.4.1 Nachhaltige temperierte Transporte

In der einleitenden Untersuchung *Nachhaltige temperierte Transporte* sind die Auswirkungen von temperierten Transporten unter Qualitäts-, Kosten- und Umweltaspekten untersucht worden (Skoglund *et al.*, 2010). Dabei ging es unter anderem darum, die verschiedenen technischen Lösungen für temperierte Transporte auf Strasse und Schiene im Hinblick auf Umweltbelastung und Energieverbrauch zu analysieren. Ausserdem sollten mit temperierten Landtransporten verbundene Nachhaltigkeitsprobleme unter Qualitäts-, Umwelt- und Kostenaspekten beleuchtet werden.

Die Untersuchung zeigte, dass Warentransporte, bei denen eine Temperaturregelung im Laderaum des Fahrzeugs erforderlich ist, d. h. Kühlung oder gegebenenfalls Heizung, einen erheblichen Anteil am Transportaufkommen in Schweden und weltweit haben. Veränderte Verbrauchergewohnheiten mit einer steigenden Nachfrage nach frischen und tiefgefrorenen Waren haben den Anteil temperierter Transporte weiter erhöht. Neben dem höheren Warenvolumen und grösseren Transportentfernungen trägt auch die Temperierung zu den Emissionen bei.

Ferner stellte sich heraus, dass direkte Strassentransporte die dominierende Transportform bei landgestützten temperierten Transporten sind. Temperierte Bahntransporte kommen in begrenztem Umfang vor und dann vor allem als intermodale Lösungen. Ferner ergab die Untersuchung, dass das Bewusstsein für die Umweltauswirkungen von temperierten Transporten niedrig und die Forschung auf diesem Gebiet begrenzt war.

Weiter stellte sich heraus, dass das Dieselaggregat die dominierende Technik für die Temperierung bei Strassentransporten ist. Ausschlaggebend für diese Wahl waren in erster Linie Qualität und Betriebssicherheit, gefolgt von den Kosten. Erst an dritter Stelle kamen Umweltaspekte. Obwohl ein erheblicher Anteil der Gesamtemissionen der temperierten Fahrzeuge auf dieselgetriebene Temperierungsaggregate entfällt, gibt es keine Vorschriften zur Regulierung dieser Emissionen.

Die Wärmedämmfähigkeit hat grosse Bedeutung für Energieeffizienz und damit die Umweltauswirkungen eines temperierten Transports. Ein anderer Faktor, der erhebliche Umweltauswirkungen hat, ist Leckage des im Temperierungsaggregat verwendeten Kühlmediums. Zudem wird das Temperierungsaggregat in einer Umgebung verwendet, wo Erschütterungen und Stösse normal sind, was das Leckagerisiko erhöht. Die verwendeten Kühlmittel sind potenziell klimaschädlich, was bedeutet, dass sie einen grossen Einfluss auf den Treibhauseffekt haben.

Schätzungsweise 4 % der gesamten Kohlendioxidemissionen in Schweden durch temperierte Strassentransporte sind auf Leckage von Kühlmedien zurückzuführen, während der Kraftstoffverbrauch des Temperierungsaggregats für 12 % der Emissionen verantwortlich ist. Daraus folgt, dass 16 % der Emissionen eines temperierten Fahrzeugs von der Temperierung herrühren während 84 % vom Fahrzeugantrieb stammen. Somit entsprechen die Emissionen von der Temperierung ca. einem Sechstel der Gesamtemissionen eines temperierten Fahrzeugs auf der Strasse.

In der Untersuchung wurden verschiedene Alternativen zu dieselgetriebener Temperierung aufgezeigt. Hier zeigte sich, dass ein erheblicher Teil der Aggregate, die meistens von Dieselmotoren angetrieben wurden, auch mit Dreiphasenwechselstrom von 400 V angetrieben werden könnten. Elektrischer Antrieb kam vor allem dann zum Einsatz, wenn Ladungsträger an den grossen Terminals aufgestellt waren.

Da intermodale Eisenbahntransporte auf elektrifizierten Strecken hauptsächlich mit Elektrolokomotiven durchgeführt werden, war eine Schlussfolgerung, dass etwaige Möglichkeiten, bei denen das Temperierungsaggregat mit Strom von der Lokomotive anstatt mit Diesel versorgt wird, das Potential haben dürften, die Umweltbeeinträchtigung durch die Temperierung auf dem Bahnabschnitt einer intermodalen Transportkette zu verringern.

### 2.4.2 Nachhaltige intermodale temperierte Transporte

Ziel der Untersuchung war es, Voraussetzungen für eine Erhöhung des Anteils und der Menge an temperierten Gütern zu schaffen, die in intermodalen Systemen transportiert werden (Ahlberg *et al.*, 2013). Erreicht werden sollte das mit Hilfe nachhaltiger und kosteneffizienter Temperierungssysteme, die auf Weise mit Energie versorgt werden, die umweltfreundlicher und unter Qualitäts- und Kostenaspekten besser ist als das bisher der Fall war.

Da die für Transporte von Verbrauchsgütern des täglichen Bedarfs verwendeten Temperierungsaggregate hauptsächlich von Dieselmotoren angetrieben wurden und es meistens die Möglichkeit gab, diese Aggregate mit Strom zu betreiben, wurden die Möglichkeiten und Effekte einer Umstellung auf Elektrobetrieb auf Teilen einer intermodalen Transportkette untersucht. Die Möglichkeit eines elektrischen Betriebs war auch deshalb von besonderem Interesse, da die Ladungsträger mit Eisenbahnwagen transportiert werden oder darauf stehen, die sich unter der Oberleitung der Bahnstrecke befinden.

Die Untersuchungen ergaben, dass es in Schweden und anderen Teilen Europas keinen festen Standard für die Verteilung des vom Aggregat verwendeten Drehstroms von 400 V 50 Hz über einen Zugsatz gibt. Ferner wurden einige existierende, nicht standardisierte technische Lösungen und Anlagen auf Arbeits- und Güterzügen in Skandinavien untersucht. Ein Problem war jedoch, dass die Übertragungskapazität in allen Fällen zu niedrig war, verglichen mit dem Bedarf. Eine Schlussfolgerung daraus war, dass eine technische Lösung zur Stromversorgung von elektrisch temperierten Ladungsträgern entwickelt werden muss und neue Normen für die technische Ausrüstung, beispielsweise Kabel, Kontakte etc., eingeführt werden müssen.

Anhand der gesammelten Fakten wurde der Energieverbrauch für einen Ladungsträger, bestehend aus einem Sattelanhänger mit Tiefkühlwaren an einem Sommertag, auf ca. 2,7 kWh pro Stunde geschätzt, vorausgesetzt, dass Türen und Luken geschlossen bleiben. Die Dämmfähigkeit der Ladungsträger nimmt mit zunehmendem Alter und Verschleiss ab und man geht davon aus, dass der Energieverbrauch nach etwa 9 Jahren um 50 % höher ist. Bei sogenanntem Pull-down-Betrieb, wo die Temperatur im Ladungsträger gesenkt wird, ist der Leistungsbedarf grösser. Dabei wurde die Annahme zugrunde gelegt, dass die maximale Leistung in Anspruch genommen wird, bis die Güter die gewünschte Temperatur erreicht haben. Der hohe Leistungsbedarf und das Risiko, dass sich der Leistungsbedarf der einzelnen Ladungsträger überschneidet, führte dazu, dass in der Untersuchung ein maximaler Leistungsbedarf von 10 kW pro Ladungsträger veranschlagt wurde. Für einen Vollzug von 630 m Länge und 36 Ladungsträgern wurde somit ein maximaler Leistungsbedarf von 360 kW ermittelt. Die Empfehlung lautete folglich, das Stromübertragungssystem eines Zugsatzes für diesen Leistungsbedarf zu dimensionieren.

Gestützt auf die Informationen über den Dieselvebrauch für die Temperierung der Ladungsträger in Coop's intermodaler Transportlösung im Zweijahreszeitraum wurde untersucht, welche Voraussetzungen vorliegen müssen, um mit Elektrobetrieb die Energiekosten für die Temperierung und die Kohlendioxidemissionen zu verringern. Die Analyse wies darauf hin, dass die Kohlendioxidemissionen und Energiekosten um ca. 20 % gesenkt werden können, was in der Praxis einer Kosteneinsparung von 1,1 Mio. Kronen und einer Verringerung der Kohlendioxidemissionen von knapp 300 t entspricht.

Ferner wurden die Effekte quantifiziert, wenn alle diese Transporte für Coop, ICA und Dagab, bezogen auf die Strecken Schonen – Grossraum Stockholm beziehungsweise Göteborg – Stockholm, mit einem intermodalen System durchgeführt werden, bei dem die Ladungsträger während des Bahntransports elektrisch temperiert werden. Dabei wurde eine Verringerung der Energiekosten um 3,2 beziehungsweise 2,0 Mio. Kronen ermittelt. Die Kohlendioxidemissionen würden um knapp 850 t beziehungsweise 425 t sinken, was 2,5 % der gesamten Kohlendioxidemissionen entspricht, die in Schweden 2009 auf temperierte Transporte entfielen. Nicht berücksichtigt wurden bei diesen Berechnungen die Investitionskosten für die Entwicklung und Installierung von neuen elektrischen Systemen in den Zügen.

Zusammenfassend ergab sich, dass bei temperierten Transporten der Betrieb von Temperiergeräten mit elektrischer Energie anstatt mit Dieselmotoren über ein erhebliches ökonomisches und ökologisches Potential verfügt. Weitere Untersuchungen auf diesem Gebiet mit dem Ziel einer Demonstration der elektrischen Temperierung bei Eisenbahntransporten wurden daher für wünschenswert erachtet.

## **2.5 Literaturstudien und Analysen des Umfelds**

### **2.5.1 Stromversorgung via Fahrleitung – Spectrum**

Im Rahmen des EU-Projekts SPECTRUM (Solutions and Processes to Enhance the Competitiveness of Transports by Rail in Unexploited Markets) wurden die Voraussetzungen für eine Erhöhung der Anzahl von intermodalen Transporten von zeitkritischen, hochwertigen Gütern mit geringer Dichte untersucht, international oft als *Time Sensitive Low Density High Value goods* (TSLDHV) bezeichnet. Diese Güter machen 12 % des gesamten Warentransportmarktes innerhalb der EU und der Schweiz aus (Shoemaker *et al.*, 2012). Die Menge an TSLDHV, die über Entfernungen von mehr als 200 km transportiert wurde, belief sich 2009 auf 1,9 Milliarden Tonnen.

Ein Ziel des SPECTRUM-Projekts war die Entwicklung eines intermodalen Transportsystems für diese Art von Gütern, was unter anderem neue technische Systeme beinhaltet (UNEW, 2015). Ein Ziel des Projekts war die Erstellung eines Konzepts für einen zukünftigen intermodalen Güterzug, der unter anderem in Bezug auf Geschwindigkeit, Beschleunigung und Bremsvermögen ähnliche Eigenschaften haben sollte wie ein Personenzug, damit vor allem tagsüber die Möglichkeit besteht, auf dem Schienennetz, das in erheblichem Masse für den interregionalen Personenverkehr genutzt wird, Trassen bereitzustellen. Ein weiteres Ziel des Projekts bestand darin, das betreffende Zugkonzept mit einem System auszurüsten, das bei intermodalen Ladungsträgern für temperaturempfindliche Güter die Stromversorgung der Temperierungsaggregate ermöglicht.

Das Stromversorgungssystem, das entwickelt wurde, sollte in erheblichem Umfang auf geltenden Normen für die Stromübertragung zwischen Eisenbahnwagen basieren (Jönsson *et al.*, 2015). Das erarbeitete Konzept ging davon aus, dass die intermodalen Eisenbahnwagen mit Umrichtern ausgerüstet werden, die durch standardisierte Heizleitungen (Train lines) mit Strom von der Lokomotive versorgt werden. Der Strom wurde nach Umwandlung auf vier Ladungsträger auf die jeweiligen Wagen verteilt (siehe Abb. 2.1). Die Heizleitungen verlaufen auf beiden Seiten des Wagens, weiter zum nächsten Wagen. Das System ist redundant und verfügt über einen 32-kW-Stromrichter auf jeder Wagenseite. Jeder Umrichter würde damit zwei Ladungsträger mit Drehstrom von 400 V 50 Hz versorgen. Wenn ein Umrichter ausfällt, können alle vier Ladungsträger Strom von dem Umrichter erhalten, der noch funktioniert.

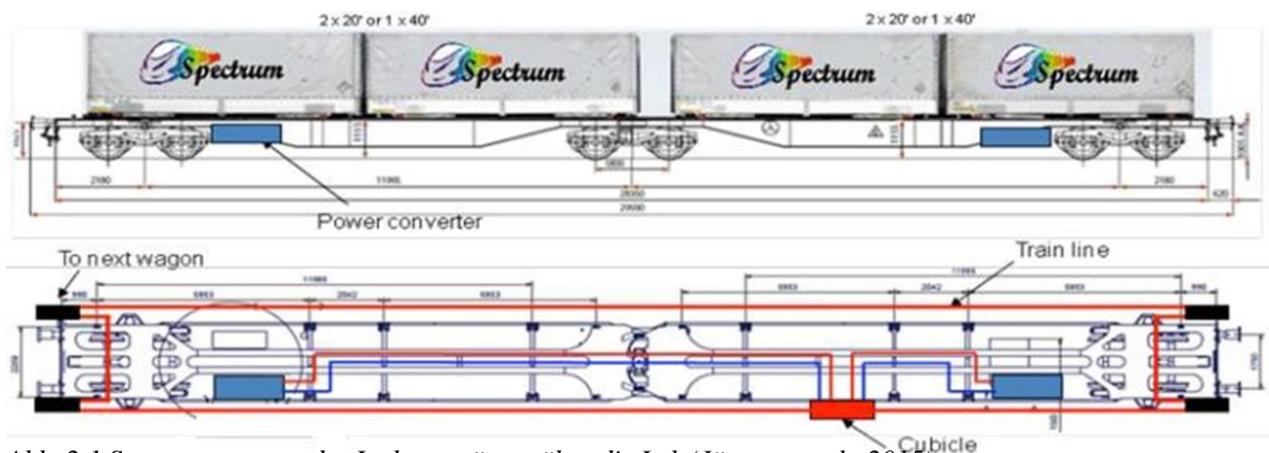


Abb. 2.1 Stromversorgung des Ladungsträgers über die Lok (Jönsson *et al.*, 2015).

Die intermodalen Eisenbahnwagen, die im Bericht beschrieben werden, wurden nicht gebaut. Eine Demonstration und ein Test der Umformtechnik erfolgte in der Form, dass diese Ausrüstung in einem 20ft-Standardcontainer platziert wurde, der auf einem Gelenkwagen platziert war, der von ähnlicher Ausführung war wie der im Bericht beschriebene Wagen, und der bei Tests durch die Heizspannung von der Lokomotive mit Strom versorgt wurde. Ausserdem waren Ladungsträger mit Temperierungsaggregat auf den übrigen Ladungsträgerplätzen platziert.

Von besonderem Interesse ist bei diesem Projekt und der begrenzten Demo, die stattfand, die Wahl eines standardisierten Systems zur Stromversorgung der Wagen im Zug, das gewählte Zugheizungssystem sowie die Ausrüstung der Wagen mit Umrichteranlagen. Die Notwendigkeit der Redundanz mit zwei Umrichtern je Wagen wurde von der Annahme geleitet, dass die betreffenden Ladungsträger keine Möglichkeit zum Dieselbetrieb haben würden. In denjenigen Fällen, in denen die Ladungsträger Aggregate haben, die mit Verbrennungsmotoren angetrieben werden können (Dieselbetrieb), wird das Redundanzkriterium dadurch erfüllt, dass der Diesel einspringen kann, wenn der Umrichter ausfällt.

### 2.5.2 Stromversorgung von Güterwagen über Generatoren

Es gibt mehrere Lösungen, zum Teil patentierte Systeme, für die Stromversorgung von Güterwagen über Achsgeneratoren, die in den betreffenden Wagen installiert sind. Ein Beispiel dafür ist ein in den USA 1993 gewährtes Patent, das ein System zur Stromversorgung von intermodalen Güterwagen, vor allem für temperierte Güter, über einen Achsgenerator am Wagen beinhaltet (Hilsenteger *et al.*, 1993). Die Kabel liegen geschützt im Waggon, um Beschädigung und Unfälle zu vermeiden.

### **rCE-Powerpack**

Das Schweizer Bahntransportunternehmen railCare hat im Rahmen des Projekts *e-Modal* ein System zur elektrischen Temperierung von Ladungsträgern während des Bahntransports erarbeitet (railCare, 2017). Das System trägt die Bezeichnung „rCE-powerpack“ und wandelt kinetische Energie, von der Bewegung des Zugs, mit Hilfe eines Generators in elektrische Energie um (siehe Abb. 2.2). Die Leistung des Generators liegt im Bereich 12–20 kW, und die Energie wird in Batteriemodulen gespeichert, die eine Kapazität von 7 kWh haben. Nach den Berechnungen reicht das aus, um die angeschlossenen Temperierungsaggregate vier Stunden lang anzutreiben, ohne dass von einem Generator oder einer anderen externen Energiequelle Energie zugeführt wird.

Zwei 6-achsige, mit rCE-Powerpack ausgerüstete Wagen wurden im September 2016 getestet. 2017 wurden 25 Wagen mit rCE-Powerpack (fwd.news, 2017) ausgerüstet. Das Ziel ist, dass sämtliche 84 Wagen von railCare bis Ende 2018 mit rCE-Powerpack ausgerüstet sind (Solothurner Zeitung, 2016).

Diese Lösung ist railCare zufolge billiger als Lösungen, wo Ladungsträger via Lokomotive mit elektrischer Energie von der Fahrleitung versorgt werden, da diese Lösung keine Kabel zwischen Lokomotive und Wagen beziehungsweise zwischen den Wagen erfordert. Ausserdem ist keine Transformierung und Umwandlung des Fahrleitungsstrom in 400V-Drehstrom erforderlich. Auch die Energieverluste sollen mit diesem System niedriger sein. Der hydraulisch angetriebene Generator wird durch ein GPS-System gesteuert und eingekoppelt, wenn der Zug bremst, wobei die Bewegungsenergie in elektrische Energie umgewandelt wird (Solothurner Zeitung, 2016).

Ein System für einen 6-achsigen Containerwaggon mit Gelenkverbindung wiegt 800 kg. Die Kosten für das System sollen pro Wagen ca. 55 000 EUR betragen und die Lebensdauer mindestens acht Jahre (DVZ, 2016).

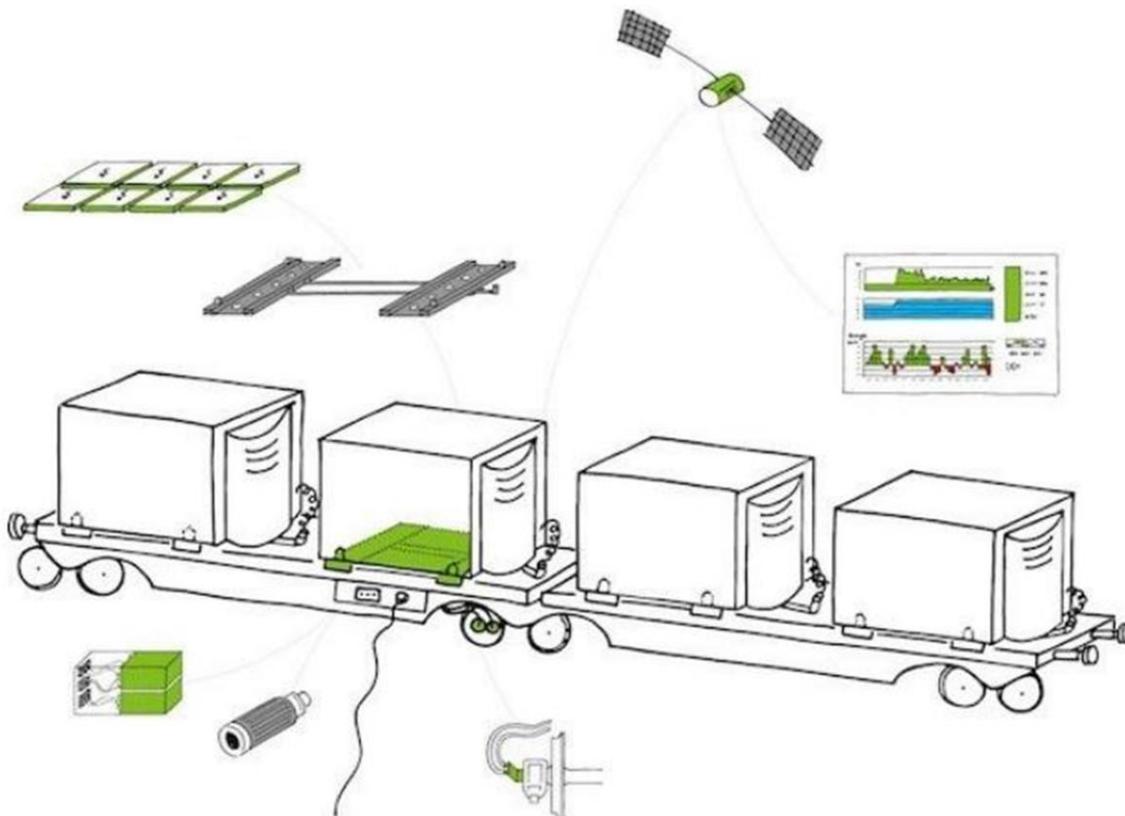


Abb. 2.2 Stromversorgung des Ladungsträgers mit einem eCE-Powerpack (railCare, 2017)

### **Siros Energy – Sustainable power system (SSPS)**

Das Projekt *Fresh Food Corridors* wurde gestartet, um ein nachhaltiges intermodales Transport- und Logistiksystem zu entwickeln für intermodale Gütertransporte zwischen den Mittelmeerländern und nordeuropäischen Bestimmungsorten (SSPS, 2017). Ziel des Projekts ist der Aufbau und Betrieb eines Logistikkorridors für Kühlwaren und Tiefkühlwaren bis zum Jahr 2018. Das Projekt wird zum Teil von der EU finanziert.

Eine zentrale Rolle spielt bei diesem Projekt eine patentierte Lösung (SSPS) zur Stromversorgung der Temperieraggregate während des Bahntransports. SSPS ist eine Stand-alone-Lösung für die Stromversorgung von elektrischen Temperieraggregaten auf Ladungsträgern bei ihrem Transport auf der Schiene. SSPS konvertiert – vor allem beim Bremsen – die kinetische Energie des Eisenbahnwagens in elektrische Energie, die in Akkumulatoren gespeichert wird.

Das System wird am Temperierungsaggregat des Ladungsträgers befestigt, bevor der Ladungsträger auf einen Eisenbahnwagen gestellt wird, und wird entfernt, wenn der Ladungsträger vom Wagen gehoben wird (siehe Abb. 2.3). An einer Achse von jedem Wagen müssen Generatoren installiert werden. Die SSPS-Module kommunizieren via Cloud mit einem Kontrollcenter, um die Entnahme von kinetischer Energie zu optimieren und die von der Lokomotive entnommene Last zu minimieren.



Abb. 2.3 Mit SSPS-Aggregat ausgerüstete Ladungsträger (SSPS, 2017)

### 2.5.3 Schlussfolgerungen aus den Literaturstudien und Analysen des Umfelds

Die Literaturstudien und Analysen des Umfelds zeigten, dass für die Stromversorgung von intermodalen Ladungsträgern bei intermodalen Bahntransporten hauptsächlich zwei Alternativen aktuell sind. Die eine Alternative besteht darin, die Eisenbahnwagen mit Strom von der Lok zu versorgen, mit Hilfe des genormten Systems zur Übertragung des einphasigen Heizstroms, worauf der Strom mittels Transformator und Umrichter, die an den Wagen montiert sind, in Dreiphasenwechselstrom von 400 V 50 Hz umgewandelt wird. Nach der zweiten Alternative wird – vor allem beim Bremsen – durch die Bewegungsenergie des Wagens elektrische Energie erzeugt, durch Generatoren, die an die Wagenachsen angeschlossen sind. Neben der Umformung der erzeugten Energie in Dreiphasenwechselstrom benötigen diese Systeme auch Akkumulatoren auf den Wagen, um die elektrische Energie zu speichern.

Frühere Untersuchungen haben gezeigt, dass es keine standardisierten Systeme für die Verteilung von 400V-Drehstrom für Arbeitszüge in Schweden gibt (Ahlberg et al., 2013) beziehungsweise für Transporte des gesamten Lastzugs in Finnland (Bärthel, 2012). In beiden Fällen wird mit Dieselgeneratoren, die entweder auf besonderen Generatorwagen (Schweden) oder im Fahrgestell bestimmter Eisenbahnwagen montiert sind (Finnland), Drehstrom von 400 V erzeugt. Diese Lösungen sind nur von begrenztem Interesse, da sie auf der Erzeugung von Drehstrom mit Hilfe von Dieselmotoren basieren.

## 2.6 Konzepte in Bezug auf Systeme zur Stromübertragung

Der grundlegende Ansatz in diesem Demo-Projekt bestand darin, dass temperierte Ladungsträger, in Form von Sattelanhängern mit Temperierungsaggregaten, die elektrisch betrieben werden können, beim Transport auf elektrifizierten Eisenbahnstrecken über die Fahrleitung mit Strom versorgt werden könnten, das heisst via Lokomotive. Das bedeutet in Schweden, dass Einphasenwechselstrom mit einer Spannung von 16 kV und einer Frequenz von 16⅔ Hz irgendwo im Zug in 400V-Drehstrom mit einer Frequenz von 50 Hz umgeformt werden muss. Ein Grund dafür, dass die Stromversorgung über die Elektrolokomotiven erfolgen soll, ist, dass diese bereits mit Hochspannungsanlagen wie Stromabnehmer, Hochspannungsschalter usw. ausgerüstet sind und dass es nicht als realistisch erachtet wird, die Ladungsträger (Sattelanhänger) oder die jeweiligen Eisenbahnwagen mit einer solchen Technik auszurüsten, sowohl aus technischen wie auch aus wirtschaftlichen Gründen. Die Überlegung war daher, die Ladungsträger über die intermodalen Eisenbahnwagen mit sogenannter Industriespannung zu versorgen, das heisst Dreiphasenwechselstrom von 400 V 50 Hz.

In diesem Demo-Projekt gab es zu Beginn zwei Hauptkonzepte, wie und in welcher Form die elektrische Energie auf die intermodalen Wagen und danach auf die Ladungsträger, bestehend aus Sattelanhängern, übertragen werden soll.

### 2.6.1 Konzept bezüglich einer Umformung des Stroms in der Lok

Nach dem ersten Konzept sollte die Umformung in Drehstrom von 400 V 50 Hz in der Lokomotive erfolgen. Nach diesem Ansatz müsste ein System, und später ein europäischer Eisenbahnstandard, zur Übertragung von Drehstrom zwischen Lok und Wagen, bzw. zwischen den einzelnen Wagen, entwickelt werden. In Nordamerika gibt es seit langem solche Normen für die Stromversorgung verschiedener Hilfssysteme in Personenwagen, zum Beispiel von Heizungs-/Klimaanlagen (bei 60 Hz Frequenz). In diesem System werden Übertragungskabel zwischen Lok und Wagen beziehungsweise zwischen den einzelnen Wagen verwendet, die aus mindestens einer Dreiphasenleitung bestehen (siehe Abb. 2.4). Auch in Grossbritannien werden Dreiphasenleitungen zur Stromübertragung auf die und zwischen den Personenwagen benutzt (Abb. 2.5).



Abb. 2.4 Duo-Lok für Verkehr in Nordamerika mit Dreiphasenanschlüssen (rote Dosen) an der Frontseite (TFK)



Abb. 2.5 Dreiphasenkabel zwischen Personenwagen in Grossbritannien (TFK)

Vor dem Versuchsbetrieb wurde die Möglichkeit untersucht, mit Hilfe des Hilfsstromrichters der Lok Drehstrom für die Stromversorgung von 2-4 Ladungsträgern (Sattelanhängern) zu erhalten. Bei einem vollmassstäblichen Betrieb in der Zukunft müsste die Lok mit besonderen Hilfsstromrichtern ausgerüstet werden, die ausreichend Kapazität haben, um die Mehrzahl elektrisch temperierter Ladungsträger in einem intermodalen Zug mit Strom versorgen zu können.

Eine Beschränkung dieses Systems ist die relativ niedrige Spannung (400 V), die vermutlich zu hohen Strömen in den Übertragungsleitungen führt, was möglicherweise grosse Leitungsquerschnitte erfordert und zu einem erheblichen Spannungsfall im Zug, gemessen zwischen der Lok und dem letzten Wagen, führen kann. Ein Vorteil bei dieser Lösung liegt darin, dass die gesamte Technik zur Umformung des Stroms im Maschinenraum der Lok platziert werden kann, der ein geschütztes Umfeld darstellt. Was in den Wagen platziert wird, sind nur die Kabel und Anschlusskontakte für Ladungsträger (Sattelanhängern) und Anschlussleitungen zwischen den Wagen.

Bezüglich eines Versuchsbetrieb kam man jedoch zu dem Schluss, dass die Montage von Steckkontakten und sonstiger Technik auf die betreffenden Lokomotiven sowie auch die Zertifizierung der Installationen, vor allem in Bezug auf die Sicherheit, mit erheblichen Kosten verbunden ist. Ausserdem könnte auf diese Weise nur eine überschaubare Anzahl von Lokomotiven ausgerüstet werden. Man kam zu dem Schluss, dass vor einem Test und einer Demonstration eine Lok pro betriebsbereitem Zugsatz sowie eventuell eine Reservelok auszurüsten sind. Zusammengenommen würde das bedeuten, dass 2 - 3 Loks mit Steckkontakten und Trennschaltern etc. auszurüsten wären.

### 2.6.2 Umformung des Stroms in den Wagen

Nach einem anderen Ansatz würde die Stromübertragung von der Lok auf die intermodalen Eisenbahnwagen, und zwischen diesen Wagen, mittels Heizspannung erfolgen, das heisst mit einem System, das ursprünglich für die elektrische Beheizung und die Beleuchtung der Abteile usw. entwickelt worden ist.

Das System ist nach der europäischen Norm UIC 552 (Ahlberg *et al.*, 2013) spezifiziert. In diesem System wird die Fahrleitungsspannung von 16 kV über eine besondere Wicklung im Transformator der Lok auf die angegebene Mittelspannung von 1,5 kV heruntertransformiert. Dies hat zur Folge, dass der Heizstrom dieselbe Frequenz erhält wie die Fahrleitung ( $16\frac{2}{3}$  Hz).

Die Spannung der Fahrleitung bewegt sich in einem Intervall, wo:  $U_{\max} = 16,5$  kV und  $U_{\min} = 13,5$  kV (Biedermann, 2010). Das bedeutet, dass auch die Heizspannung entsprechend schwanken kann.

Ein erheblicher Vorteil bei diesem System besteht darin, dass die meisten Elektrolokomotiven in den Transformatoren Wicklungen für die Zugheizung und entsprechende Anschlüsse besitzen. Für die elektrische Übertragung zwischen Lok und Eisenbahnwagen beziehungsweise zwischen den Wagen wird bei diesem System ein einpoliges Kabel an den Wagen verwendet, das an die entsprechende Buchse der Lok oder an Buchsen von anderen Wagen angeschlossen wird (siehe Abb. 2.6–2.8). Die Rückleitung erfolgt via Wagenräder und Schiene.



Abb. 2.6 TRAXX-Lok (CargoNet Ce 119) mit Buchse für Zugheizung (mit Pfeilen markiert) (TFK)



Abb. 2.7 Heizspannungsbuchse an TRAXX-Lok in Nahaufnahme (TFK)



Abb. 2.8 Heizleitungskabel gekoppelt an TRAXX-Lok (TFK)

Ein Vorteil beim Zugheizungssystem ist darüber hinaus, dass es sich um ein erprobtes System handelt, mit dem die meisten Lokführer und sonstige Eisenbahnbedienstete vertraut sind. Ein weiterer Vorteil von diesem System liegt darin, dass sowohl bei einem Versuchsbetrieb als auch bei einem späteren Einsatz im realen Massstab die meisten Elektrolokomotiven zum Ziehen und Temperieren der betreffenden Züge verwendet werden können. Eine Anpassung der Lok ist daher für diese Züge nicht erforderlich. Gleichzeitig steht eine grosse Auswahl von Lokomotiven zur Verfügung, die für die betreffenden Aufgaben verwendet werden können.

Ein Nachteil beim Zugheizungssystem liegt darin, dass das Umformen des Stroms pro Zug ein gewisses Mass an Technik erfordert, die in den intermodalen Eisenbahnwagen platziert wird. Eventuell wird eine Anlage pro intermodalem Wagen mit temperiertem Ladungsträger benötigt.

### 2.6.3 Auswahl der Lösung zur Stromversorgung von intermodalen Ladungsträgern

Im Vorfeld von Demo und Versuchsbetrieb wurden die möglichen Lösungen für eine elektrische Temperierung verglichen und analysiert. Mehrere Faktoren sprachen dafür, ein System zu wählen, bei dem der Strom in den Wagen anstatt in der Lok umgeformt wird, sowohl für den Demo- und Testbetrieb als auch für das künftige System der elektrischen Temperierung temperaturempfindlicher Güter in intermodalen Zügen.

Entscheidende Faktoren waren vor allem, dass bei diesen Lösungen keine Eingriffe oder Änderungen an der Lok erforderlich sind und dass das Zugheizungssystem für die benötigte Last ausgelegt ist, wenn man die vorhandenen Kabel zugrunde legt, die in den aktuellen Zugheizungssystemen die Norm sind.

### 2.6.4 Leistungsbedarf bei der Stromversorgung von intermodalen Ladungsträgern

Im Rahmen eines Demo- und Testbetriebs wurde ein Leistungsbedarf von 10 kW je Ladungsträger ermittelt (Ahlberg *et al.*, 2013). Je intermodalem Wagen bedeutet das ein Leistungsbedarf von 20 kW. Bei einem Leistungsfaktor von 0,8 ergibt sich damit eine Scheinleistung von 25 kVA.

### 3 Demo und Testbetrieb

Ein Demo- und Testbetrieb mit elektrischer Temperierung von intermodalen Ladungsträgern, in Form von Sattelanhängern, wurde im Juli 2017 eingeleitet und lief bis Oktober 2017.

#### 3.1 Transportsystem für Demo und Tests

Für Demo und Testbetrieb wurden die Eisenbahnwagen in den intermodalen Systemzug („Coop-Zug“), den Coop Logistik seit 2009 mit Unterstützung von Eisenbahnunternehmen und Terminalbetreibern auf der Strecke Schonen – Grossraum Stockholm betreibt, eingesetzt.

Der Coop-Zug ist Teil einer neuen Logistikhaltung, bei der die Distribution von Coop Logistik auf drei Anlagen in Zentralschweden konzentriert wird, von wo aus das ganze Land beliefert wird (Håkansson, 2017). Nach der Veränderung gibt es jetzt eine Anlage zur Zwischenlagerung und Verteilung von Kolonialwaren (Trockenware) und Non-Food-Artikeln in Bro, westlich von Stockholm, die ganz Schweden abdeckt. Für Tiefkühlwaren gibt es eine Anlage in Enköping und für Kühlwaren (Frischwaren) eine Anlage in Västerås. Auf diese Anlagen entfallen zusammen 80 % der ankommenden Transporte. Seit 2011 hält der Zug am Coop-Terminal für Trockenware in Bro, 35 km nordwestlich von Stockholm, und seit 2014 ist Malmö die Endstation in Schonen (Håkansson, 2015).

Bei intermodalen Transporten werden Ladungsträger in Form von Sattelanhängern verwendet, die mit diesel- und strombetriebenen Temperierungsaggregaten ausgerüstet sind (siehe Abb. 3.1 und 3.2). Das bedeutet, dass alle Arten von Waren befördert werden können, unabhängig vom Temperierungsbedarf (Larsson, 2011). Die Sattelanhänger werden beim Transport auf der Strasse oder Schiene mit Hilfe der Dieselmotoren der Aggregate temperiert. Wenn die Wagen an Terminal- und Umladepunkten abgestellt sind, gibt es jedoch die Möglichkeit, diese mit Energie aus dem Stromnetz, in Form von 400 V-Drehstrom (50 Hz), zu betreiben. Diese Möglichkeit wird vor allem für beladene Ladungsträger an der Anlage für Tiefkühlwaren in Enköping genutzt.

[Abbildung 3.1 und 3.2 werden nicht korrekt angezeigt in Word. Bitte mit Original vergleichen]

*Abb. 3.1 Teil des Coop-Zugs mit Sattelanhängern auf Eisenbahnwagen (TFK)*

*Abb. 3.2 Sattelanhänger mit Temperierungsaggregat, angekuppelt an Zugmaschine (TFK)*

Im Coop-Zug werden Sattelanhänger (Trailer) verwendet, die nach EU-Norm 13,6 m lang sind und auf Bodenniveau eine Ladungsfläche für 33 Europaletten haben (siehe Abb. 3.3). Das Ladegewicht beträgt etwa 25 t, und ein maximales Ladegewicht von etwa 27 t ist möglich, wenn eine dreiachsige Zugmaschine verwendet wird (siehe Abb. 3.3). Die Sattelanhänger sind ausserdem mit Trägern ausgerüstet, die an den Innenwänden des Laderaums befestigt werden können, sodass die Paletten in zwei Ebenen gestapelt werden können. Auf diese Weise erhält man Platz für 66 Europaletten (Håkansson, 2014).

Die Ladung des Zugs in Nordrichtung besteht aus Importwaren, die über Schonen ins Land kommen, und Waren aus dem südlichen Teil von Schweden, vor allem aus Schonen. Auf den Coop-Zug entfällt 30 % der angelieferten Warenmenge von Coop (Ibid.). Mit diesem Zugsystem werden fünf Hin- und Rückfahrten pro Woche durchgeführt, von Malmö nach Bro Sonntag bis Donnerstag, und von Bro nach Alvesta und Malmö Montag bis Freitag.



Abb. 3.3 Dreiachsige Zugmaschine mit Sattelanhängen (TFK)

In Bro hat Coop ein eigenes intermodales Terminal angelegt in direkter Nähe zu dem vorhandenen Distributionszentrum und Lager für Trockenware und Non-Food. Das Umladen der Eisenbahnwagen in Bro erfolgt mit schwerem Gerät, einem Reachstacker (siehe Abb. 3.4).



Abb. 3.4 Intermodales Verladen eines Sattelanhängers in Bro mit Hilfe eines Reachstackers (TFK)

Die Sattelanhängen, die in Bro vom Zug gehoben werden, werden entweder vor Ort entladen, im Distributionszentrum für Trockenware, oder mit einer Zugmaschine weitertransportiert, zum Beispiel zum Frischwarencentrum in Västerås oder zur Anlage für Tiefkühlware in Enköping. Ausserdem werden die Sattelanhängen an diesen drei Anlagen auch mit Waren beladen, die für Läden in Südschweden bestimmt sind.

Auf den meisten Streckenabschnitten, auf denen der Coop-Zug verkehrt, beträgt die maximal zulässige Zuglänge 630 m, was die Kapazität des Zuges auf 18 Eisenbahnwagen begrenzt, die zusammen 36 Sattelanhängen laden können. Daraus resultiert ferner ein maximales Fahrzeuggewicht von 1600 t, was ein maximales Ladungsgewicht von 900 t je Zug ergibt (Håkansson, 2014). Lok und Wagen des Coop-Zuges werden von einem Eisenbahnunternehmen zur Verfügung gestellt, während andere Betreiber für die intermodale Handhabung an den Terminals zuständig sind und auch Rangierloks bereitstellen.

Durch den Coop-Zug wird das Strassennetz um 30 % der Transporte, die auf Coop's Güterversorgung entfallen, entlastet (Håkansson, 2018/I). Dadurch sind die Kohlendioxidemissionen um 6700 t/Jahr niedriger, als wenn dafür Strassentransporte genutzt würden. Coop zufolge ist eine weitere Verminderung der Umweltbelastung dieser Transporte von Interesse, was dadurch geschehen kann, dass die durch das Temperierungsaggregat verursachten Kohlendioxidemissionen vermindert werden, indem während der Eisenbahntransporte elektrische Energie für die Temperierung benutzt wird. Neben den grossen Vorteilen für die Umwelt soll der Coop-Zug auch in wirtschaftlicher Hinsicht kein Verlustgeschäft sein. Es sind jedoch weitere ökonomische Verbesserungen oder Einsparungen bei den Betriebskosten nötig, um die erreichten Vorteile zu sichern beziehungsweise auszubauen (Håkansson, 2017).

### 3.2 Intermodale Eisenbahnwagen für Demo- und Testbetrieb

Für den Demo- und Testbetrieb wurden zwei sechssachsige intermodale Eisenbahnwagen des Typs Sdggmqqrss eingerichtet und benutzt, die für den Transport von jeweils zwei Sattelanhängern bestimmt sind (siehe Abb. 3.5). Die Wagen waren für eine Höchstgeschwindigkeit von 120 km/h und eine Maximallast von 99,5 t (bei 100 km/h) beziehungsweise 81,5 t (bei 120 km/h) zugelassen. Für Ladungsträger in Form von Sattelanhängern (Trailern) betrug das höchstzulässige Gewicht 40 t pro Einheit.



Abb. 3.5 Intermodaler Wagen mit Umrichteranlage und Stromversorgungsanlage, beladen mit zwei temperierten Sattelanhängern (Coop Logistik)

Die Wagen waren ferner mit Stromaggregat und Umrichteraggregat ausgerüstet, die die Ladungsträger (Sattelanhänger) mit Drehstrom von 400 V 50 Hz versorgten (siehe Abb. 3.6).



Abb. 3.6 Stromaggregat und Umrichteraggregat (TFK sowie Coop Logistik)

Stromaggregat und Umrichteraggregat waren über den mittleren Drehgestellen der intermodalen Eisenbahnwagen platziert, wie aus den Typzeichnungen der Wagen hervorgeht (siehe Anlage 1). An den beiden Wagenenden waren Anschlusskabel für die Stromversorgung der Sattelanhänger oder der Temperierungsaggregate von anderen Ladungsträgern platziert (siehe Abb. 3.7). An den Wagenenden befanden sich ferner Kabel und Anschlüsse für die Stromübertragung von Lok auf Eisenbahnwagen beziehungsweise die Übertragung zwischen den einzelnen Eisenbahnwagen.



Abb. 3.7 Mit Drehstromkabel angeschlossener Sattelanhänger (TFK)

Die Stromübertragung von Lok auf Eisenbahnwagen beziehungsweise zwischen den einzelnen Eisenbahnwagen erfolgt mit einer einpoligen Heizleitung (siehe Abb. 3.8).



Abb. 3.8 Anschlusskontakt für einpolige Heizleitung

Die Rückleitung erfolgt über die Schienen. Dazu muss an mindestens einer Achse je Wagen ein entsprechender Rückstromkontakt montiert werden (siehe Abb. 3.9), unter anderem deshalb, um zu vermeiden, dass Strom durch die Radlager geleitet wird, was deren Lebensdauer verkürzen würde.



Abb. 3.9 Rückstromkontakt an Eisenbahnwagen (TFK)

Die Stromaggregate oder Umrichter, die auf den betreffenden intermodalen Wagen installiert sind, haben eine Ausgangsleistung von 60 kVA, bei einem Leistungsfaktor von 0,8. Das bedeutet, dass die Ausgangsleistung von 48 kW den angegebenen Leistungsbedarf von 20 kW (siehe Abschnitt 2.6.4) übertraf.

### 3.3 Analyseobjekt

Im betreffenden Zeitraum wurden zwei intermodale Eisenbahnwagen mit Stromaggregat und Umrichteranlage eingesetzt. Ein Wagen mit elektrischer Temperierungs- und Umrichteranlage war im betreffenden Zeitraum jeweils in einen Zugsatz des Coop-Zugs eingekoppelt und auf der Strecke Malmö-Bro im Verkehr. Die Wagen wurden immer ganz vorne im Wagensatz platziert, gleich hinter der Lok, damit sie direkt an die Stromversorgung der Lokomotive angeschlossen werden konnten. Die Folge war jedoch mehr Arbeit beim Rangieren am jeweiligen Endpunkt, da der Wagen dann von einem Zugende zum anderen gebracht werden muss.

Die speziellen Mess- und Analyseobjekte bestanden bei dieser Demo aus acht Ladungsträgern in Form von Sattelanhängern von Coop Logistik, die mit Temperierungsaggregaten und Messgeräten ausgerüstet waren (siehe Abb. 3.10).



Abb. 3.10 Sattelanhängen von Coop Logistik (TFK)

## **3.4 Messgeräte beim Demo- und Testbetrieb**

### **3.4.1 Sattelanhänger**

Im Juli 2017 wurden acht Sattelanhänger von Coop Logistik mit Messgeräten und Aufzeichnungsgeräten des Typs TracKing ausgerüstet, auch unter dem Namen BlueBox bekannt. Diese Geräte wurden von der Firma Thermo-King zur Verfügung gestellt, die auch die Temperierungsaggregate für die betreffenden Sattelanhänger lieferte.

Mit diesen Geräten war es unter anderem möglich zu erfassen, wann das Temperieraggregat lief und ob es in diesem Fall mit elektrischer Energie oder mit Dieselmotorkraftstoff lief. Ferner wurde die Temperatur im Ladungsträger beziehungsweise die Aussentemperatur um diesen herum erfasst und registriert, ob das Aggregat den Ladungsträger gekühlt oder geheizt hat.

Die Aufzeichnungsgeräte gaben ferner mit Hilfe von GPS Auskunft über die Position des jeweiligen Sattelanhängers und kommunizierten via GSM mit dem Lieferanten (Thermo-King). Im Anschluss daran war es möglich, über eine Website Daten und Positionsangaben des jeweiligen Ladungsträgers oder Sattelanhängers abzulesen. Mit Hilfe von diesen Positionsangaben liess sich feststellen, ob ein Ladungsträger auf der Strasse oder auf der Schiene transportiert wurde, und es konnten die Fahrtrouten, Abfahrts- und Ankunftszeiten sowie die verschiedenen Fahrtunterbrechungen der intermodalen Züge ermittelt werden.

### **3.4.2 Eisenbahnwagen**

Die mit Umrichteranlagen ausgerüsteten intermodalen Eisenbahnwagen waren auch mit Geräten zur Erfassung von Eingangsströmen (Zugheizungsstrom), Zwischenkreisströmen und Ausgangsströmen zum Temperierungsaggregat ausgerüstet. Ausserdem wurde die Spannung an diesen Messpunkten erfasst. Bei der Bearbeitung der Messdaten zeigte sich, dass die besten Messwerte für Strom und Spannung vom Zwischenkreis kamen.

## **3.5 Erfassung der Messdaten**

Der erste Zug, auf dessen vordersten Wagen ein Sattelanhänger mit Messgeräten und Datenschreibern platziert war, fuhr am 20. Juli 2017 von Malmö ab und kam am 21. Juli 2017 in Bro an. Der letzte Zug, auf dessen vordersten Wagen ein Sattelanhänger mit Messgeräten und Datenschreibern platziert war, fuhr am 30. Oktober 2017 von Malmö ab und kam am 31. Oktober 2017 in Bro an. Im Testzeitraum wurden insgesamt 26 Mal mit Datenschreibern ausgerüstete Sattelanhänger auf dem vordersten Wagen des Zugs transportiert, durch die eine Stromversorgung möglich war. Bei neun dieser Fahrten waren darüber hinaus zwei Sattelanhänger mit Datenschreibern auf dem ersten Wagen platziert. Das ergibt zusammengenommen 35 Erfassungsvorgänge.

### **3.5.1 Erfassung des Kraftstoffverbrauchs**

Die Daten bezüglich des Kraftstoffverbrauchs für acht Sattelanhänger wurden, in einem ersten Schritt, in der Zeit bis Oktober 2017 erhoben und zwar im Zusammenhang mit den Eisenbahnwagen, die mit Umrichteranlagen und Stromaggregaten ausgerüstet waren. In einem zweiten Schritt wurden Daten zum Kraftstoffverbrauch von sieben dieser Sattelanhänger von November bis Dezember 2017 erhoben. Die grundlegenden Daten bezüglich des Kraftstoffverbrauchs basierten auf Coop Logistik's Überwachung der nachgetankten Menge an Dieselmotorkraftstoff des jeweiligen Sattelanhängers im betreffenden Zeitraum.

### **3.5.2 Erfassung der Betriebsdaten**

Von den mit Datenschreibern ausgerüsteten Ladungsträgern wurde erfasst, ob/wann die Temperierungsaggregate in Betrieb waren (und wann nicht) und ob sie mit elektrischer Energie oder mit Diesel liefen. Ausserdem wurden Daten zur Innentemperatur und zur Temperatur auf der Aussenseite der betreffenden Ladungsträger erfasst.

Von Stromaggregaten und Umrichteranlagen auf den intermodalen Wagen wurden Daten bezüglich der Eingangsströme sowie der jeweiligen Eingangsspannungen (eine Phase) beziehungsweise Ausgangsströme und jeweilige Ausgangsspannungen erfasst.

### 3.5.3 Erfahrungen von der Erhebung der Messdaten

Die grösste Schwierigkeit im Zusammenhang mit der Erhebung der Messdaten bestand darin, die mit Datenschreibern ausgerüsteten Sattelanhänger so zu leiten, dass sie auf den vordersten Wagen im Zug geladen wurden, der mit Stromversorgung und Umrichteranlage ausgerüstet war.

Im betreffenden Testzeitraum August – Oktober 2017 fuhren 141 Züge ab, die Wagen mit Stromversorgung und Umrichteranlage hatten. Bei 26 Fällen davon, oder 25 der Abfahrten, waren diese mit einem oder zwei der acht Sattelanhänger beladen, die mit Datenschreibern ausgerüstet waren.

### 3.6 Erfahrungen mit dem Betrieb – Handling

Während des Testzeitraums funktionierte die Handhabung der betreffenden Ladungsträger gut (Håkansson, 2018). Ein zusätzlicher Arbeitsgang für das Personal am Terminal bestand darin, dass das dreiphasige Stromkabel, das für die Stromversorgung des Ladungsträgers verwendet wurde und das am Eisenbahnwagen befestigt ist, an den Ladungsträger (Sattelanhänger) angeschlossen bzw. abgekoppelt werden musste (siehe Abb. 3.11).



Abb. 3.11 Anschlusskabel, vom Vorderende des Ladungsträgers gesehen (TFK)

Es gab die Befürchtung, dass diese Prozedur möglicherweise als mühsame Zusatzarbeit angesehen wird, und es gab ein Risiko, dass das Personal am Terminal vergisst, dieses Kabel abzukuppeln. Lediglich in einem Fall während des Testzeitraums wurde ein derartiges Kabel beschädigt, weil es nicht abgekuppelt war, als der Ladungsträger vom Eisenbahnwagen gehoben wurde.

In gleicher Weise kam für den Lokführer eine Arbeit hinzu, nämlich das Ankuppeln der einphasigen Heizleitung an die Lok vor der Abfahrt und das Abkuppeln des Kabels an der Endstation (siehe Abb. 3.12). Diese Prozedur war mit umfangreichen Sicherheitsroutinen verbunden, was auch eine Schulung der Lokführer beinhaltete. Eine Folge davon war, dass eine Stromversorgung der Wagen durch die Lok nicht möglich war, wenn der Zug von Lokführern geführt wurde, die nicht entsprechend geschult waren. Eine Folge davon war ferner, dass eine Erhebung von Messdaten in einigen Fällen nicht stattfand, wenn der Zug von nicht geschulten Zugführern geführt wurde.

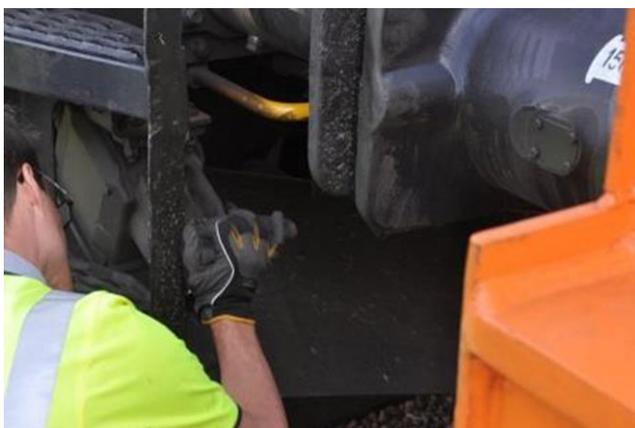


Abb. 3.12 Anschluss der Heizleitung an die Lok (TFK)

## 4. Analysen

Eine Überprüfung der gesammelten Messdaten ergab einen Datenverlust in 9 von 35 Fällen, als Ladungsträger (Sattelaufleger) mit Aufzeichnungsgeräten auf den mit Stromversorgung und Umrichteranlagen ausgestatteten Eisenbahnwaggons platziert waren. Der Verlust war zum Teil auf Störungen bei der Datenübertragung zurückzuführen, in anderen Fällen auf die mangelnde Ausbildung der Fahrer beim An- und Abstöpseln des Stromkabels zwischen Lokomotive und Waggon mit Stromversorgungsanlagen.

### 4.1 Durchgeführter Testbetrieb

Die Testbetriebe wurden gemäss der obigen 26 Ereignisse durchgeführt, als Ladungsträger (Sattelaufleger) mit Mess- und Aufzeichnungsgeräten auf einen der mit Stromversorgungsanlagen ausgestatteten intermodalen Eisenbahnwaggons geladen und an den Waggon, der der Lokomotive des Zugs am nächsten war, gekoppelt waren.

Zudem waren in acht Fällen zwei Sattelaufleger mit Aufzeichnungsgeräten auf den aktuellen Wagen beladen. Dies bedeutete, dass komplette Analysedaten für 35 Schienentransporte elektrisch temperierter Sattelaufleger auf dem intermodalen Coop-Zug zur Verfügung standen.

#### 4.1.1 Betriebsdaten der Temperiergeräte

Die erfassten Betriebsdaten für die acht aktuellen Temperiergeräte wurden unter anderem für die Betriebszeit und den Kraftstoffverbrauch analysiert und zusammengestellt (siehe Tabelle 4.1).

Tabelle 4.1 Betriebsdaten von acht Temperiergeräten

Zeitraum (2017)	Gesamtanzahl der Betriebsstunden für acht Aggregate	Gesamtanzahl Stunden im Elektrobetrieb	Zeitanteil in Elektrobetrieb	Häufigkeit in Elektrobetrieb bei Schienentransporte <sup>3</sup>	Gesamtanteil der Betriebsstunden bei Dieselbetrieb	Durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch (Diesel) pro Betriebsstunde bei Dieselmotoren			
						ProZeitraum	Für die Testperiode <sup>4</sup>	Für September– Oktober	Für den Gesamtzeitraum
Juli <sup>1</sup> –August	1889	17 4	9,2 %	7	1715	1,84	1,81		1,70
September	1513	19 8	13,0 %	20	1315	1,85		1,84	
Oktober	1922	24 5	12,7 %	20	1677	1,82			
November	1043	12	1,0 % <sup>2</sup>	-	1031	1,15			
Dezember	1089	65	6,0 % <sup>2</sup>	-	907	1,43			
Summe	7289	69 4	9,5 %	47	6595				

1) bezieht sich auf die Zeit ab Erhalt der Aufzeichnungsgeräte (17. Juli)

2) bezieht sich auf den elektrischen Antrieb am Standort des Terminals, vor allem in Enköping

3) bezieht sich auf die Anzahl der beförderten Ladungsträger (Sattelaufleger)

4) bezieht sich auf den Zeitraum bis Oktober, in dem die beiden Eisenbahnwaggons mit Stromversorgung und Umrichteranlagen in Betrieb waren

Die Zusammenstellung zeigt, dass der Kraftstoffverbrauch während des Testzeitraums (bis einschliesslich Oktober) auf einem konstanten Niveau (1,84 L/h) lag und dann von November bis Dezember 2017 sinkt. Ein Grund dafür ist eine geringere Aussentemperatur, was bedeutet, dass eine geringere Menge Energie benötigt wird, um den gewünschten (niedrigeren) Temperaturwert im Ladungsträger zu halten.

#### 4.1.2 Stromverbrauch

Betriebsdaten zum Stromverbrauch im Zusammenhang mit der elektrischen Temperierung wurden analysiert und erstellt (siehe Tabelle 4.2). Die Analysen basieren auf Daten, die im Zusammenhang mit dem Transport von 35 Ladungsträgern (Sattelauflegern) in 26 Fällen erhoben wurden. Acht Mal wurden auf dem Wagen im Zug, der mit Stromversorgung und Umrichteranlage ausgestattet war, gleichzeitig zwei Ladungsträger transportiert, die Mess- und Aufzeichnungsgeräte installiert hatten. In den meisten Fällen, in denen ein temperierter Ladungsträger mit Mess- und Aufzeichnungsgeräten auf einem Wagen mit Stromversorgung und Umrichteranlage transportiert wurde, wurde gleichzeitig der Transport zusammen mit einem anderen temperierten Träger ohne Mess- und Aufzeichnungsgeräte durchgeführt.

Dies führte dazu, dass die Versorgung mit elektrischer Energie in den meisten Fällen auf zwei Transporteinheiten aufgeteilt wurde. In einigen Fällen wurde jedoch festgestellt, dass keine Stromversorgung der Ladungsträger stattgefunden hat. Bei sieben analysierten und gemeldeten Transporten wurde festgestellt, dass nur einer der Ladungsträger auf dem betreffenden Eisenbahnwaggon teilweise oder vollständig während des Schienentransports mit elektrischer Energie versorgt war (siehe Tabelle 4.2).

Tabelle 4.2 Zusammenstellung der Messdaten von Umrichteranlagen auf Eisenbahnwaggons

Datum	Richtung	Zeit im Elektrobetrieb (h)	Stromverbrauch (kWh)				Solltemperatur in Ladungsträger (°C)	Durchschnittstemperatur in Ladungsträger (°C)	Durchschnittliche Außentemperatur (°C)	Temperaturunterschied (°C)
			Pro Schienentransport			Pro Ladungsträger und Betriebsstunde				
			Ausgehend von Umrichter	Verteilt auf Ladungsträgeranzahl*	Verteilt pro Ladungsträger					
2017-08-30 – 31	Nord	16,0				3,0	4,0	16,5	12,5	
2017-09-01	Süd	7,6				-23,0	-23,0	19,2	42,2	
2017-09-07 – 08	Nord	5,8	58,0	2	29,0	24,0	-23,7	11,2	34,9	
		6,3	68,3	2	34,2	-23,0	-17,8		29,0	
2017-09-10 – 11	Nord	10,0	44,6	2	22,3	3,0	3,5	17,0	13,4	
2017-09-12 – 13	Nord	8,2	27,3	1	27,3	3,0	3,6	17,0	13,4	
2017-09-18	Süd	10,0	13,8	1	13,8	-22,0	-12,3	11,6	23,9	
2017-09-20 – 21	Nord	8,9	36,2	2	18,1	3,0	3,9	12,9	9,0	
2017-09-21 – 22	Nord	8,3	37,2	2	18,6	3,0	3,6	11,4	7,7	
2017-09-25	Süd	10,0	51,2	2	25,6	3,0	3,1		8,3	
2017-09-25 – 26	Nord	8,5	100,8	2	50,4	-25,0	-23,2	15,9	39,1	
						3,0	3,7	14,4	10,7	
2017-09-26	Süd	11,0	67,1	2	33,6	-23,0	-22,5			37,0
2017-09-28	Süd	9,7	67,4	2	33,7	-24,0	-21,5	19,6	41,1	
2017-10-01 – 02	Nord	8,0	29,7	1	29,7	-22,0	-13,5	16,2	29,7	
		8,1	42,7	2	21,3	3,0	4,0	12,8	7,8	
2017-10-03 – 04	Nord	6,0	27,1	1	27,1	3,0	3,7	13,7	10,1	
2017-10-04	Süd	8,5	43,7	2	21,8	-22,0	-21,6	12,9	34,5	
2017-10-05 – 06	Nord	8,7	18,7	1	18,7	-23,0	-22,1	12,0	34,1	
2017-10-06 – 07	Süd	10,6	61,8	2	30,9	3,0	3,7	7,0	3,3	
2017-10-08 – 09	Nord	12,8	27,1	2	13,6	-22,0	-21,5	10,5	32,0	
		9,4	32,6	2	16,3	3,0	3,6	8,8	5,2	
2017-10-09 – 10	Nord	8,2	42,7	2	21,3	2,0	2,2			6,6
		8,3	27,1	2	13,6	-22,0	-21,5	9,7	31,2	
2017-10-11 – 12	Nord	8,1	32,6	2	16,3	3,0	4,2			5,5
2017-10-15 – 16	Nord	8,8	12,8	1	12,8	3,0	3,7	13,4	9,8	
2017-10-18 – 19	Nord	7,5	23,5	2	11,8	2,0	3,0	14,5	11,5	
		7,6	26,8	2	13,4	3,0	3,0	5,4	2,4	
2017-10-19	Süd	8,2	26,8	2	13,4	3,0	3,2			2,2
2017-10-23 – 24	Nord	8,2	27,4	1	27,4	-22,0	-12,6	9,3	21,9	
2017-10-25 – 26	Nord	8,2	36,8	2	18,4	-22,0	-21,0	3,9	24,9	
		8,2	51,8	2	25,9	-22,0	-20,8	10,1	30,9	
2017-10-30 – 31	Nord	10,4	36,8	2	18,4	-22,0	-21,4			31,5
		7,8	51,8	2	25,9	3,0	2,2	1,5	-0,8	
<b>Durchschnittswert:</b>			32,8	2	16,4	4,0	3,8			-2,3
							-7,3	12,6	18,7	

\* In einigen Fällen hat der Umrichter nur einen Träger mit elektrischer Energie während des Schienentransports versorgt.

Die Zusammenfassung zeigt, dass die durchschnittliche Zeit, in der die Temperiergeräte während eines Schienentransports mit elektrischer Energie betrieben wurden, 8,6 Stunden betrug. Bei diesen Transporten wurden die Geräte auch mit Dieselkraftstoff gestartet, als die Stromversorgung für kurze Zeit nicht vorhanden war. Einige Minuten danach wurde der Betrieb mit Dieselkraftstoff fortgesetzt.

Unterbrechungen in der Stromversorgung gab es vor allem, wenn die Züge stromlose Überleitungsabschnitte passierten.

Der Messpunkt für den Stromverbrauch war die Gleichspannungzwischenstufe des Umrichters. Dieser Messpunkt hat den Vorteil, dass eine Gleichspannung und ein Gleichstrom gemessen werden kann, so dass bei der Verarbeitung von Messdaten keine direkte Berücksichtigung der Leistungsfaktoren erforderlich ist.

Nach Angaben des Herstellers der elektrischen Versorgungs- und der Umrichteranlage liegt der Wirkungsgrad des Umrichters bei 0,89, wobei der Wirkungsgrad zwischen Eingangsstromversorgung und Zwischenstufe 0,97 beträgt. Darüber hinaus ist der Wirkungsgrad zwischen der Zwischenstufe und dem ausgehenden 3-Phasen-Wechselstrom 0,92.

Der vom Messpunkt aus neu berechnete Durchschnittsverbrauch an elektrischer Energie lag bei 2,66 KW pro Betriebsstunde und Ladungsträger (siehe Tabelle 4.2). Mit Hilfe von Temperaturlaufzeichnungen in den Ladungsträgern wurde eine Vorgehensweise und Berechnung durchgeführt, die die Unterschiede im Energieverbrauch bei der Kühl- und Tiefkühltemperierung darstellt. Dies ergab, dass der Energieverbrauch der Kühltemperierung (Soll-Temperatur + 3 ° C) 2,13 kWh/Betriebsstunde betrug, während der Energieverbrauch bei Tiefkühltemperierung (Soll-Temperatur – 22 ° C) 3,28 kWh/Betriebsstunde betrug.

Eine frühere Untersuchung in dem durchgeführten Projekt ergab, dass ein tiefkühltemperierter Ladungsträger in Form eines Sattelauflegers, als er aufgestellt und ans Netz angeschlossen wurde, 3,52 kWh Strom pro Betriebsstunde bei einer Durchschnittsaussentemperatur von 13,2 ° C verbrauchte. Dies entsprach etwa der durchschnittlichen Aussentemperatur von 12,6 ° C, die während der Testbetriebstransporte aufgezeichnet wurde. Der Unterschied im Energieverbrauch zwischen der aktuellen Untersuchung und dem Testbetrieb betrug nur 7%. Gleichzeitig wurde der Unterschied im tatsächlichen Energieverbrauch zwischen Kühl- und Tiefkühltemperierung als etwas grösser eingeschätzt als bei der Analyse des Stromverbrauchs während des Testbetriebs. Das bedeutet, dass der Verbrauch im Bereich von 3,3 – 3,5 kWh pro Betriebsstunde bei Tiefkühltemperierung realistisch sein kann. Darüber hinaus ist ein mittlerer Energieverbrauch der elektrischen Temperierung von 2,66 kWh pro Betriebsstunde zu erwarten.

Auf der Grundlage vorliegender bzw. geschätzter Daten über die Effizienz der Umrichteranlage auf den intermodalen Waggons und der Zugheizungsanlage von Lokomotivtransformatoren wurde eine Neuberechnung von der Oberleitung aus durchgeführt. Mit einem festgelegten Wirkungsgrad im Umrichter von 0,89 und einem Wirkungsgrad im Transformator der Lokomotive von 0,95, wurde der durchschnittliche Energieverbrauch in der Oberleitung erreicht, der sich auf 3,15 kWh pro Betriebsstunde belief.

### 4.1.3 Energiekosten

Bei der Berechnung der Energiekosten des Dieselbetriebs war es von Interesse, als Vergleich die Dieselpreise an öffentlichen Tankstellen bzw. die Preise beim Direktverkauf an grössere Kunden und bei direkter Lieferung an die Tankanlagen des Kunden (über Tanklastwagen) zu verwenden. Die während des Testzeitraums aktuellen Preise wurden zusammengestellt (siehe Tabelle 4.3).

Tabelle 4.3 Kostenaufstellung für Dieselkraftstoff

Testperiode	Preis von Zapfsäule (Tankstelle) (Circle K, 2018) (kr/l)	Preis bei Direktverkauf (SBPI, 2018) (kr/l)	Durchschnittspreis (sek/l)
September	13,95	12,45	13,20
Oktober	14,08	11,98	13,03
Durchschnittspreis:	14,02	12,22	13,12

Als Grundlage für die Berechnung der elektrischen Energiekosten wurden die Preise der schwedischen Transportbehörde für den Antriebsmotorstrom für den aktuellen Lokomotiventyp Bombardier TRAXX, auch als BR 141 (Hector Rail), BR 185 und Re (Green Cargo) bezeichnet, als verwendet (Trafikverket, 2016).

Im September und Oktober 2017 beliefen sich die Nettokosten für diese Fahrzeuge auf 9,50 SEK bzw. 9,10 SEK / kWh. Der Stromhandelspreis betrug 34,64 bzw. 31,32 SEK / kWh. Bei einem pauschalen Verlustzuschlag von 14% beliefen sich die durchschnittlichen Kosten auf 48,20 SEK / kWh.

Hinzu kommen Kosten für Stromzertifikate, die sich in den betreffenden Monaten auf 1,73 Öre / kWh beliefen, was in diesem Zeitraum zu Gesamtstromkosten von 49,93 Öre / kWh führte.

Berechnungen zeigten auch, dass die durchschnittlichen Kosten für das elektrische Temperieren eines Ladungsträgers während eines Schienentransports im Testzeitraum 13,53 SEK betragen. Die Kosten eines mit Dieseldieselkraftstoff temperierten Ladungsträgers betragen im gleichen Zeitintervall (8,6 h) während des Schienentransports, im Durchschnitt 208 SEK, wobei die Spanne in einem Bereich von 190 - 220 SEK lag, je nach aktuellen Handelspreis des Dieseldieselkraftstoffs.

Die ersten Analysen zeigten, dass ein Einsparpotenzial in Höhe von 200 SEK pro temperiertem Schienentransport eines Ladungsträgers, der in der Grösse einem Sattelaufleger (Anhängler) entspricht, in Bezug auf die aktuellen Dieseldieselkraftstoffpreise (Oktober 2017) möglich

ist. Diese Spanne kann sich jedoch für grosse Unternehmen, die grosse Mengen an Dieseldieselkraftstoff zu wesentlich günstigeren als den marktüblichen Preisen beziehen können, verringern. Das betrifft Player wie Coop Logistics.

#### 4.1.4 Umweltauswirkungen der elektrischen Temperierung

Die Umwelteinflüsse der elektrischen Temperierung eines Ladungsträgers im Schienenverkehr bestehen hauptsächlich in den direkten Auswirkungen eines reduzierten Einsatzes von Dieseldieselkraftstoff und der dadurch erzielten Verringerung lokaler Emissionen. Weiter hängen die ökologischen Effekte des elektrischen Temperierens im Vergleich zum Temperieren mit Diesel in hohem Masse auch von der Stromherkunft und dem BioDiesel-Anteil im Dieseldieselkraftstoff ab, was in vergleichenden Daten dargestellt wird.

Der Energieverbrauch und die Kohlendioxidemissionen von Dieseldieselbetriebeben und elektrischen temperierten Sattelauflegern während des Vorführungs- und Testbetriebs wurden analysiert und zusammengestellt (siehe Tabelle 4.4). Den Analysen lagen die Annahme zugrunde, dass fossiler Diesel zu einer Kohlendioxidemission von 2640 g CO<sub>2</sub> / l führt, während eine Dieseldieselmischung mit 20% BioDiesel, der sogenannte Diesel B20, zu einer Kohlendioxidemission von 2003 g CO<sub>2</sub> / l führt (Schwedische Umweltschutzbehörde) 2015). Die Kohlendioxidemissionen, die aus dem elektrischen Temperieren resultieren, wurden für 100% erneuerbaren Strom sowie Strom mit einer Zusammensetzung gemäss nordic Residualmix (Trafikverket, 2016) berechnet. Der von der schwedischen Verkehrsbehörde an Stromkunden verkaufte Strom, der für den Zugbetrieb verwendet wird, ist zu 100% erneuerbar und verursacht keine Kohlendioxidemissionen, während der nordic Residualmix für 2016 einen Emissionswert von 350,51 g CO<sub>2</sub> / kWh aufweist.

*Tabelle 4.4 Erfassung von Energieverbrauch und Umwelteinflüssen beim Temperieren mit unterschiedlichen Energiearten*

		Dieseltemperierung		Elektrische Temperierung	
		Mit fossilem Diesel	Mit Diesel B20	Mit 100 % erneuerbarem Strom	Mit Nordic Residualmix
<b>Energieverbrauch</b> (kWh)	Pro Betriebsstunde		17,7 <sup>1</sup>	3,2 <sup>2</sup>	
	Pro Schienentransport (8,6 h)		53	27	
<b>Kohlendioxidausstoss</b> (kg CO <sub>2</sub> /kWh)	Pro Betriebsstunde	4,8	3,6	0	1,1
	Pro Schienentransport	41	31	0	9,5

<sup>1</sup> Neuberechnung aus registriertem Durchschnittsverbrauch im Zeitraum September – Oktober (siehe Tabelle 4.1)

<sup>2</sup> Neuberechnung des Energieverbrauchs in der Oberleitung (siehe Abschnitt 4.1.2)

Die Zusammenstellung (siehe Tabelle 4.4) zeigt, dass die elektrische Temperierung energieeffizient ist und der Energieverbrauch beim Übergang von Diesel- zu elektrischer Temperierung um über 80% sinkt.

Der Vergleich der Kohlendioxidemissionen der elektrischen und der Diesel-Temperierung eines Trägers beim Schienentransport zeigt, dass bei elektrischer Temperierung mit 100% erneuerbarer Energie diese Emissionen vollständig eliminiert werden im Vergleich zur Temperierung mit fossilem Diesel oder mit Diesel B20. Wird stattdessen elektrische Energie nach dem Nordic Residualmix verwendet, werden die Emissionen um 70 – 80% reduziert.

Durch den Übergang von der Diesel- zur elektrischen Temperierung werden neben der Reduzierung von Kohlendioxidemissionen auch die Emissionen von Stickoxiden und Partikeln stark reduziert oder vollständig beseitigt.

## 4.2 Lärmemission von temperierten intermodalen Zügen

Die Auswirkungen der elektrisch angetriebenen Temperierung in Bezug auf Geräusch- und Lärmparameter wurden auf - durch Literaturstudien gesammelte - Informationen über Lärm von Temperiergeräten abgeschätzt.

Das aktuelle Diesel-Temperiergerät erzeugt einen Geräuschpegel von 69 – 74 dB (A) (Wang *et al.*, 2013). Mit elektrischen Temperiergeräten kann der Geräuschpegel angeblich reduziert werden, um Lärmpegel von maximal 60 dB (a) zu erreichen.

### 4.2.1 Lärm bei elektrischer Temperierung des Coop-Zugs

Der Geräuschpegel, der durch theoretische Berechnungen an einem bestimmten Punkt in der Mitte des Zuges  
Der Coop-Zug besteht aus 18 Eisenbahnwaggons mit 2 Ladungsträger in Form von Sattelauflegern auf jedem Eisenbahnwaggon, also insgesamt 36 Transporteinheiten, von denen ein gewisser Anteil temperiert ist. Jeder Eisenbahnwaggon ist 34,2 m lang. Der Geräuschpegel der laufenden Geräte lässt sich an der Seite des Coop-Zugs berechnen, wobei der Geräuschpegel beim Einsatz von Diesel- und elektrischen Geräten verglichen werden kann. Die Schallpegel wurden an einer bestimmten Stelle auf der Seite des Zugs in der Mitte berechnet (siehe Abb. 4.1)

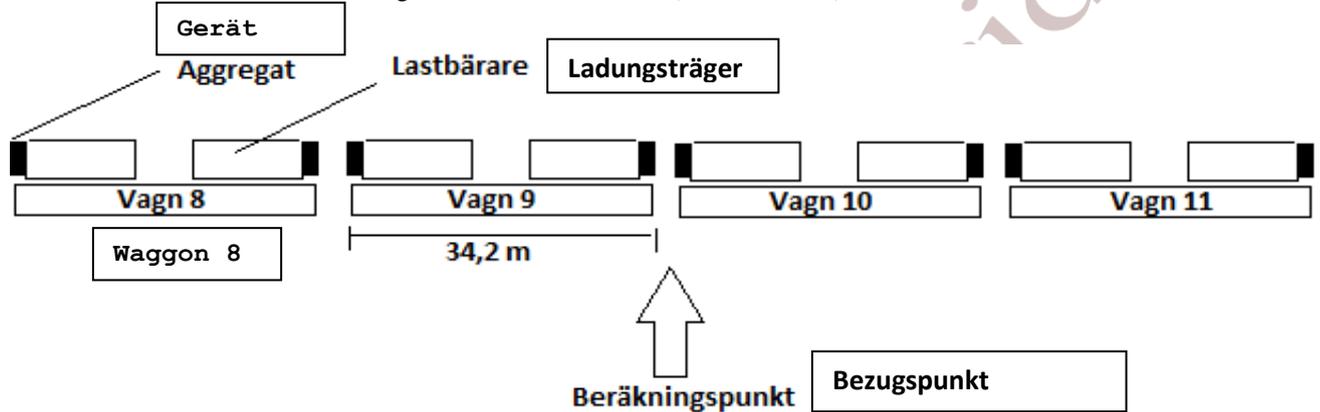


Abb. 4.1 Abbildung der Lage der Geräte auf dem Coop-Zug und des Bezugspunktes zur Berechnung des Schallpegels der Geräte.

erzeugt wird, wenn alle Geräte gleichzeitig laufen, wurde erhoben und in einer Tabelle zusammengestellt (siehe Tabelle 4.5). Bei den Berechnungen wurden ausschliesslich die Auswirkungen des Schallabfalls aufgrund zunehmender Entfernungen berücksichtigt. Die Absorption von Schall aufgrund von Umwelteinflüssen ist nicht berücksichtigt worden.

Tabelle 4.5 Schallpegel für ein Gerät bzw. für den gesamten Zug für Diesel- bzw. Elektrogeräte

	Gemessener Schallpegel eines Temperierungsgerätes mit 1 m Abstand zur Gleismitte	Berechneter Schallpegel bei Zugmittel mit folgenden Abständen zur Gleismitte bei eingeschalteten Temperiergeräten					
		25 m			35 m		
		Fall 1*		Fall 2*	Fall 1*		Fall 2*
		nordwärts	südwärts	Beide Richtungen	nordwärts	südwärts	Beide Richtungen
Anzahl Geräte	(1)	11	23	18	11	23	18
Dieselbetrieb [dB(A)]	69	43	43	43	38	38	38
Strombetrieb [dB(A)]	60	34	34	34	29	29	29
Unterschied [dB(A)]	9	9	9	9	9	9	9

\* Bei der Berechnung wird davon ausgegangen, dass sich Waggons und Ladungsträger mit Temperierungsgerät in der Mitte des Zuges platziert sind.

In der Studie wird ein Geräuschpegel eines Dieselgetriebenen Temperiergeräts, gemessen in einem Abstand von 1 m von der Mitte des Gleises, von 69 dB (a) angenommen. In einer Entfernung von 25 m von der Mitte des Gleises sinkt der Geräuschpegel auf 43 dB (a). Es wird weiter angenommen, dass der Geräuschpegel eines elektrischen Temperiergeräts, gemessen in einem Abstand von 1 m von der Mitte des Gleises, 60 dB (A) beträgt. In einer Entfernung von 35 m von der Mitte des Gleises sinkt der Geräuschpegel auf 38 dB (a).

Der Unterschied im Schallpegel zwischen Diesel- und Elektrogeräten liegt in der Größenordnung von 9 dB. Eine Erhöhung um 10 dB wird als Verdoppelung des Schallpegels wahrgenommen. Das bedeutet, dass der Übergang von Dieselgetriebenen zu elektrischen Temperiergeräten den wahrgenommenen Geräuschpegel der Geräte halbiert, was gleichzeitig bedeutet, dass der Geräuschpegel eines stillstehenden Zuges halbiert wird.

Die Richtwerte des schwedischen Umweltschutzbehörden (Naturvårdsverket) für Lärmschutz im Schienenverkehr beträgt an Wohnfassade 60 dB (a) bzw. 55 dB (a) im Aussenbereich einer Wohnung (Naturvårdsverket, 2017). Diese Werte werden im Abstand von 25 m von einem stillstehenden Zug, bei dem alle Temperiergeräte eingeschaltet sind, nicht überschritten, egal, ob diese mit Strom oder Diesel betrieben werden. Nachts gilt als Lärmbelästigung, wenn der Geräuschpegel 30 dB (a) übersteigt, was bedeutet, dass ein stillstehender elektrisch temperierter Zug nicht stört, wenn er mindestens 35 m von Personen, die ihre Nachtruhe haben wollen, entfernt steht.

### 4.2.2 Lärm aus Temperierten Intermodalen Züge in Bewegung

Wenn sich der Zug bewegt, steigt der erzeugte Geräuschpegel, wobei die relevantesten Schallquellen die Zugräder und das Windgeräusch sind. Das Geräusch eines vorbeifahrenden, 600 m langen intermodalen Zuges (BR Intermodal freight train), wurde, basierend auf den Ergebnissen früherer Messungen, in einer Entfernung von 25 m zur Mitte des Gleises, mit folgenden Werten angegeben (Andersson et al, 2001):

- 84 dB(A) bei 80 km/h
- 87 dB(A) bei 120 km/h

Der Lärm aus den Temperiergeräten wurde zum Lärm im Zusammenhang mit der Zugbewegung addiert und zusammengestellt (siehe Tabelle 4.6).

Tabelle 4.6 Geräuschpegel der intermodalen Züge in Bewegung mit eingeschalteten Temperiergeräten

	<i>Geschätzter Geräuschpegel in der Mitte des Zuges und bei einer Entfernung von 25 m von der Mitte der Gleis für einen ganzen Zug mit eingeschalteten Temperiergeräten , bei folgenden Fahrtgeschwindigkeiten:</i>								
	<i>0 (Stillstand)</i>			<i>80 km/h</i>			<i>120 km/h</i>		
	<i>Fall 1*</i>		<i>Fall 2*</i>	<i>Fall 1*</i>		<i>Fall 2*</i>	<i>Fall 1*</i>		<i>Fall 2*</i>
	Nordwärts	Südwärts	Beide Richtungen	Nordwärts	Südwärts	Beide Richtungen	Nordwärts	Südwärts	Beide Richtungen
<b>Anzahl Geräte</b>	11	23	18	11	23	18	11	23	18
<b>Diesel-Betrieb [dB(A)]</b>	43	43	43	84	84	84	87	87	87
<b>Elektrischer Betrieb [dB(A)]</b>	34	34	34	84	84	84	87	87	87
<b>Unterschied [dB(A)]</b>	9	9	9	0	0	0	0	0	0

*\* Waggons und Ladungsträger mit Temperiergeräten werden in der Lärmberechnung in der Mitte des Zuges und danach gestellt*

Die Zusammenfassung zeigt, dass, wenn sich ein intermodaler Zug bewegt und mit "Zuggeschwindigkeit" fährt, also 80 bzw. 120 km/h, der Lärm, der von den Temperiergeräten ausgeht, von untergeordneter Bedeutung ist, weil er durch Windgeräusche, Fahrwerkgeräusche usw. "übertönt" wird.

Bei fahrenden Zügen werden in einer Entfernung von 25 m von der Mitte des Gleises die Richtwerte der schwedischen Umweltschutzbehörden für Lärm aus dem Schienenverkehr, die 60 dB (a) an Wohnfassaden und 55 dB (a) Aussenräumen betragen, (Naturvårdsverkets, 2017) deutlich überschritten. In diesen Fällen ist es ist es von keiner Relevanz, ob sich auf den Zügen Temperiergeräte befinden. Der Lärm von Temperiergeräten ist an solchen Orten und Gleisen von Bedeutung, wo Züge mit geringer Geschwindigkeit fahren, zum Beispiel beim Schalten oder bei Fahrten auf Seitengleisen, oder wenn sie, vor allem während der Abend- und Nachtzeit stillstehen.

## 5. Elektrische Temperierung intermodaler Züge

Es gibt unterschiedliche Ansätze in Bezug auf die Auswirkungen der Einführung einer elektrischen Temperierung von Ladungsträgern in verschiedenen intermodalen Zugsystemen, mit denen temperaturempfindliche Gütern transportiert werden.

### 5.1 Ansatz zur elektrischen Temperierung des Coop-Zugs

Ein erster Ansatz betrifft die Auswirkungen des vollständigen Umzugs auf elektrisch temperierte Ladungsträger beim Schienentransporte innerhalb des intermodalen Transportsystems Coop Logistik, dem Coop-Zug. Mit diesem Transportsystem werden temperierte Transporte von Lebensmitteln mit intermodalen Ladungsträgern in Form von Sattelaufliegern zwischen Malmö und Bro sowie zwischen Bro und Alvesta bzw. Malmö durchgeführt.

#### 5.1.1 Voraussetzungen

Im Transportsystem Coop-Zug gibt es zwei Züge: Der eine fährt am Abend und in der Nacht nach Norden, der andere am Nachmittag und am Abend nach Süden. Dem Fahrplan gemäss fährt der Coop-Zug um 19.10 Uhr Richtung Norden vom Malmö Kombiterminal ab und kommt nachts um 2.50 Uhr am Bahnhof in Bro an (Bark *et al.*, 2017). In Richtung Süden fährt der Zug um 12.05 Uhr von Bro ab, um 22.10 Uhr kommt er in Malmö an. Während der Fahrt nach Süden wird in Alvesta eine Wagengruppe gewechselt, in der 6 intermodale Waggons mit 12 Ladungsträgern abgekoppelt und 6 Waggons mit 12 leeren Ladungsträger an den Zug angekoppelt werden (Håkansson, 2018).

Der Coop-Zug besteht neben der Lokomotive aus 18 intermodalen Eisenbahnwaggons, die jeweils für den Transport von 2 Ladungsträgern in Form von Sattelaufliegern geeignet sind, was einer Kapazität von 36 Transporteinheiten pro Zug entspricht (siehe Abschnitt 2.7). Das intermodale System besteht aus insgesamt 2 Lokomotiven und 42 intermodalen Eisenbahnwaggons. Hinzu kommen Ersatzwaggons. Darüber hinaus beinhaltet das System 116 intermodale Ladungsträger in Form von Sattelaufliegern mit isolierten Aufbauten (Schränken) mit Temperiergeräten und 5 weiteren Sattelaufliegern mit Planenabdeckung (Håkansson, 2017/II).

#### 5.1.2 Leistungs- und Energiebedarf

Die meisten Ladungsträger (Sattelaufleger) sind mit Temperiergeräten der Typen Thermo-King SLXe-100 bzw. SLXe-300 ausgestattet. Laut Hersteller Thermo-King (Lillebaek, 2013) haben beim Strombetrieb einen Energiebedarf von 8,7 kW haben. Bei einem bisher angenommenen Leistungsfaktor von 0,8 bedeutet dies einen scheinbaren Strombedarf von 10,9 kVA (Jönsson *et al.*, 2015).

Messungen zeigten einen durchschnittlichen Energiebedarf pro Ladungsträger von 2,66 kWh/Betriebsstunde, was grob auf einen Leistungsbedarf von durchschnittlich 2,7 kW gerundet werden kann. Bei allen Gefriertransporten lag der durchschnittliche Energiebedarf bei 3,52 kWh pro Betriebsstunde, während der höchste Energiebedarf für einen einzigen Gefriertransport bei durchschnittlich 5,04 kWh pro Betriebsstunde lag. Der Leistungsbedarf für alle Ladungsträger wurde auf 3 – 5 kW geschätzt.

#### 5.1.3 Ermittlung der vorhandenen Transportströme von temperierten Ladungsträgern

Basierend auf den gesammelten Daten von Aufzeichnungsgeräten von acht Ladungsträgern wurde eine Auswertung der Nutzung der Temperierung durchgeführt, das heisst, in welchem Umfang Temperiergeräte auf den jeweiligen Teilstrecken von August-September 2017 in Betrieb waren (siehe Tabelle 5.1).

Tabelle 5.1 Ermittlung der vorhandenen Transportströme von temperierten Ladungsträgern

Teilstrecke	Anzahl Ladungsträger pro Tag	Anteil temperierter Ladungsträger	Durchschnittliche Anzahl temperierter Ladungsträger
Bro–Alvesta	12	49 %	6
Bro–Malmö	24	71 %	17
Alvesta–Malmö	12	0 %	0
Malmö–Bro	36	57 %	11

Die Auswertung zeigte, dass bei der Abfahrt der Brücke durchschnittlich 23 der Temperiergeräte auf den Ladungsträgern auf einen Zug zugeschaltet waren. Dabei hatten 6 der Ladungsträger Alvesta und 17 Ladungsträger Malmö als Ziel. Zwischen Alvesta und Malmö wurden nur leere Ladungsträger ohne Temperierung transportiert. Von Malmö nach Bro betrug der Transportstrom 11 temperierte Ladungsträger pro Tag.

Dies bedeutete auch, dass der vorgesehene Bedarf an Eisenbahnwaggons mit Stromversorgung und Umrichteranlagen für Züge, die von Bro nach Süden abfahren, 12 Waggons betragen, was erforderlich war, wenn 23 temperierte Ladungsträger (Sattelaufleger) transportiert werden sollten. Richtung Norden brauchte es nur 6 Eisenbahnwaggons mit Stromversorgung und Umrichteranlagen, um 11 temperierte Ladungsträger transportieren zu können. Der Auswertung zufolge galt es demnach, zwei Drittel der Waggons in einem Zug mit Stromversorgung und Umrichteranlagen auszustatten. Insgesamt gab es im System einen Bedarf von 27 intermodalen Eisenbahnwaggons mit Stromversorgung und Umrichteranlagen sowie von 15 intermodale Waggons ohne solche Geräte.

### 5.1.4 Ansatz für den Transportbedarf für temperierte Ladungsträger

Coop Logistik wurde gefragt, welcher oder welchen Bedarfe der Transport von temperierten Ladungsträgern in Form von Sattelauflegern auf der jeweiligen Teilstrecken über einen längeren Zeitraum erfüllt sein müssen. Die angegebenen Bedarfe wurden in tabellarischer Form zusammengestellt (siehe Tabelle 5.2).

*Tabelle 5.2 Von Coop Logistik spezifizierte Transportströme von temperierten Ladungsträgern im Coop-Zug auf einen langen Zeitraum*

<i>Teilstrecke</i>	Anzahl Ladungsträger pro Tag	Bedarf an temperierter Ladungsträger pro Teilstrecke	Bedarf an Wagen mit Stromversorgung pro Teilstrecke	Gefragter Anteil an Wagen mit Stromversorgung pro Teilstrecke
Bro–Alvesta	12	3	2	33 %
Bro–Malmö	24	15	8	67 %
Alvesta–Malmö	12	0	0	0 %
Malmö–Bro	36	18	9	50 %

Die Zusammenstellung (siehe Tabelle 5.2) zeigt, dass im abfahrenden Zug nach Süden, von Bro nach Alvesta und Malmö, zehn Eisenbahnwaggons mit Stromversorgung und Umrichteranlagen benötigt werden. In diese Richtung werden zwei Waggons mit Stromversorgungs- und Umrichteranlagen in Alvesta ab- und angekuppelt. Im Zug Richtung Norden, von Malmö nach Bro, fahren neun Waggons mit Stromversorgung und Umrichteranlagen. Das bedeutet, dass der Zug Richtung Süden von Bro auf den Bedarf an Waggons mit Stromversorgung und Umrichteranlagen dimensioniert wird, was bedeutet, dass für die jeweiligen Züge zehn solcher Waggons benötigt werden. Zwei Waggons mit Stromversorgung würden dafür in Alvesta zur Verfügung stehen.

Dies bedeutete einen gesamten Bedarf von 22 intermodalen Eisenbahnwaggons, die mit Stromversorgung und Umrichteranlagen ausgestattet sind, um die angegebene Nachfrage nach temperierten Transporten in ihren jeweiligen Beziehungen zu decken. Zudem werden 20 Eisenbahnwaggons ohne solche Geräte benötigt.

### 5.1.5 Ansätze bezüglich Wagenzusammensetzung in intermodalen Zügen

Angesichts der fortlaufenden Berechnungen der Auswirkungen der elektrischen Temperierung des Coop-Zuges wurden auf der Grundlage von zwei Fällen unterschiedliche Annahmen und Ansätze getroffen:

**Fall 1** Voraussetzungen nach dem gesammelten Dossier darüber, wie die Eisenbahnwaggons voraussichtlich mit temperierten Ladungsträgern auf den verschiedenen Teilstrecken beladen sein werden (siehe Abschnitt 5.1.3).

*27 Waggons werden mit Stromversorgung und Umrichteranlagen ausgestattet*

**Fall 2** Voraussetzungen nach den Erwartungen von Coop Logistik an die Art und Weise, wie die Waggons mit temperierten Ladungsträgern beladen werden sollen (siehe Abschnitt 5.1.4).

*22 Waggons werden mit Stromversorgung und Umrichteranlagen ausgestattet*

Die Eisenbahnwaggons sollen zudem mit Stromversorgung und Umrichteranlagen ausgestattet sein, soweit dies notwendig ist, um die intermodalen Ladungsträger (Sattelaufleger), die temperiert werden sollen, antreiben zu können. Zu den aktuellen Verkehrsvorhaben gehören insgesamt 42 eingeplante intermodale Eisenbahnwaggons (siehe Abschnitt 5.1.1). Dazu kommt noch eine bestimmte Zahl von Reservewagen.

Die nicht mit Stromversorgung und Umrichteranlagen ausgestatteten Waggons sollen mit einem durchgehenden Zugheizungskabel inklusive Verbindungskabeln und Steckdosen in den Wagenenden ausgestattet werden. Damit sollen Waggons mit elektrischer Versorgung und Temperiergeräten an jedem beliebigen Ort im Zug platziert werden können. Die Notwendigkeit, die Waggons zu wechseln und sie im Zug an den Terminals neu zu positionieren, wie es im Zusammenhang mit dem Demonstrations- und Testbetrieb der Fall war, entfällt.

### **5.1.6 Berechnung des Energieverbrauchs bei intermodalen Transport**

Das bedeutet, dass die Temperiergeräte der Ladungsträger einstell- oder programmierbar sein müssen, damit sie nicht sofort in den Verbrennungsmotorbetrieb (Dieselbetrieb) wechseln, wenn an stromlosen Abschnitten vorbeigefahren wird oder wenn es andere Unterbrechungen in der Stromversorgung für Zeiträume von begrenzter Dauer gibt. Ein Beispiel für eine andere Art von geplanter Unterbrechung der Stromversorgung sind Spurwechsel, oder die An- und Abkopplung von intermodalen Eisenbahnwaggons, die in Alvesta durchgeführt werden und bei der die Stromversorgung der Lokomotive während der gesamten Pause getrennt wird, was bis zu 30 Minuten dauern kann.

Ein Lösungsansatz könnte sein, dass im Falle einer Unterbrechung der Stromversorgung die Dieselmotoren der Temperiergeräte nicht innerhalb eines Zeitraums von 30 bis 40 Minuten gestartet werden, ausser wenn die Temperatur im Träger auf ein Niveau steigt, das ein erhebliches Risiko birgt, dass temperaturempfindliche Güter im Träger, wie Kühl- oder Tiefkühlkost, beschädigt wird.

#### ***Fall 1 – Voraussetzungen nach erhobenen Daten***

In Richtung Süden fährt der Coop-Zug um 12.10 Uhr von Bro ab und kommt um 19.00 Uhr in Alvesta an, was bedeutet, dass die Transportzeit 6 Stunden und 50 Minuten (6,8 Stunden) beträgt. Dies ist auch die aktuell benötigte Zeit, um die 12 Ladungsträger, die auf die in Alvesta abgekoppelten Waggons aufgesetzt werden und die dort später von den Waggons genommen werden, elektrisch zu temperieren.

Nach dem Aufenthalt in Alvesta kommt der Zug laut Fahrplan um 22.10 Uhr in Malmö an. Das bedeutet, dass die Transportzeit und die Zeit, die für die elektrische Temperierung der 24 temperierten Ladungsträger, die sich auf den für Malmö bestimmten Waggons befinden, 10 Stunden beträgt.

In Richtung Norden fährt der Zug laut Fahrplan um 19.10 Uhr ab und kommt am nächsten Morgen um 2.50 Uhr in Bro an, was bedeutet, dass sich die Transportzeit und die Zeit für die elektrische Temperierung der 11 temperierten Ladungsträger auf 7 Stunden und 40 Minuten (7,3 Stunden) beläuft.

#### ***Fall 2 – Voraussetzungen nach Ansatz von Coop Logistik***

In Richtung Süden fährt der Coop-Zug von Bro laut Fahrplan um 12.10 Uhr ab, die Transportzeit nach Alvesta beträgt 6,8 Stunden. Dies ist auch die aktuell benötigte Zeit, um die 3 temperierten Ladungsträger, die auf den in Alvesta abgekoppelten Waggons transportiert werden, elektrisch zu temperieren. Nach dem Aufenthalt in Alvesta kommt der Zug um 22.10 Uhr in Malmö an, was bedeutet, dass die Transportzeit und die Zeit, die für die elektrische Temperierung der 15 temperierten Ladungsträger, die sich auf den für Malmö bestimmten Waggons befinden, 10 Stunden beträgt.

In Richtung Norden fährt der Zug planmässig um 19.10 Uhr ab und kommt am nächsten Morgen um 2.50 Uhr in Bro an, was bedeutet, dass die Transportzeit und die aktuelle Zeit für die elektrische Temperierung der 18 temperierten Ladungsträger 7 Stunden und 40 Minuten (7,3 Stunden) beträgt.

**Zusammenstellung des Energie-/Kraftstoffverbrauchs**

Der durchschnittliche Stromverbrauch beträgt, wie zuvor angegeben, 3,15 kWh pro Ladungsträger und Betriebsstunde in Energieauslässe an der Oberleitung umgewandelt (siehe Abschnitt 4.1.2). Der Verbrauch von Dieseldieselkraftstoff beträgt 1,8 (1,84) l/Betriebsstunde (siehe Abschnitt 4.1.1). Der Gesamtenergieverbrauch wurde dargestellt für die verschiedenen Ansätze zusammengestellt (siehe Tabelle 5.3).

Tabelle 5.3 Zusammenstellung von Betriebszeiten und Energie-/Kraftstoffverbrauch für Temperiergeräte im elektrischem Betrieb bzw. Dieseldieselbetrieb nach unterschiedlichen Ansätzen

Teilstrecke	Betriebszeit bei elektrischer Temperierung (h)	Anzahl temperierter Ladungsträger		Energieverbrauch bei elektrischer Temperierung (kWh)		Kraftstoffverbrauch bei Dieseldieseltemperierung (l)		Umgerechneter Energieverbrauch bei Dieseldieselbetrieb (kWh)	
		Fall 1	Fall 2	Fall 1	Fall 2	Fall 1	Fall 2	Fall 1	Fall 2
Südwärts: Bro–Alvesta	6,8	6	3	130	70	80	40	740	370
Bro–Malmö	10,0	17	15	540	470	310	280	3060	2700
Alvesta–Malmö	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sammantaget	16,8	23	18	670	540	390	320	3800	3070
Nordwärts (Malmö–Bro)	7,3	11	18	250	410	150	240	1450	2370
Gesamt pro Umlauf (Malmö–Bro–Malmö)		34	36	920	950	540	560	5250	5440

Aus der Zusammenstellung geht hervor, dass bei einem Schienentransport eine erhebliche Kraftstoffeinsparung erzielt werden kann, wenn intermodale Ladungsträger beim Eisenbahntransport elektrisch temperiert werden. Das Einsparpotenzial pro Umlauf bzw. Hin- und Rückfahrt für einen Zug (Brücke – Alvesta – Malmö – Bro), beträgt 540 l im Fall 1 bzw. 560 l im Fall 2. Die Energieeffizienz wird in der elektrischen Temperierung im Vergleich zur Dieseldieltemperierung um den Faktor 5,7 noch mal gesteigert. Das bedeutet folgende jährliche Energieeinsparung bei 9 Zugumläufen pro Woche für 52 Wochen im Jahr:

- 2030 MWh/Jahr (Fall 1)
- 2100 MWh/Jahr (Fall 2)

Die jährliche Kraftstoffeinsparung (Dieseldieselkraftstoff) beläuft sich auf:

- 250 m<sup>3</sup>/Jahr (Fall 1)
- 260 m<sup>3</sup>/Jahr (Fall 2)

**Wirtschaftliche Auswirkungen der elektrischen Temperierung in Bezug auf Energie/Kraftstoffverbrauch**

Auf der Grundlage von Informationen zum Energieverbrauch, den Kosten für Diesel und für elektrische Energie im Zusammenhang mit verschiedenen Beschaffungsmethoden (siehe Abschnitt 4.1.3) sind die Energiekosten für die Temperierung von intermodalen Zügen in verschiedenen Szenarien betreffend die Anzahl der temperierten Ladungsträger auf den Zügen zusammengestellt (siehe Tabelle 5.4).

Tabelle 5.4

Energiekosten von Dieseldiesel bzw. elektrischer Temperierung beim Transport intermodaler Ladungsträger auf der Strecke Malmö-Bro hin und zurück sowie Einsparungen bei elektrischer Temperierung auf der gleichen Strecke

	Anzahl der temperierten Ladungsträger		Energiekosten pro Fahrt <sup>1</sup> und Zug (kr)			Einsparung beim elektrischen Temperierung					
			Dieseldiel-Temperierung		Strom-Temperierung	Pro Fahrt hin und zurück (kr)		Pro Jahr <sup>3</sup> (mkr)		Relative Einsparung	
	Per resal	Pro Jahr	Alternative A. Dieseldiel vom Tankstelle	Alternative B. Dieseldiel direkt gelieferte Dieseldiel (eigene tank)	Stromkosten von Überleitung zum Tarif des Trafikverket	Alternative		Alternative		Alternative	
			(14,02 kr/l) <sup>2</sup>	(12,22 kr/l) <sup>2</sup>	(49,93 Öre/kWh) <sup>2</sup>	A	B	A	B	A	B
Fall 1	34	15910	7570	6600	460	7110	6140	3,3	2,9	94 %	93 %
Fall 2	36	16850	7850	6840	470	7380	6370	3,5	3,0	94 %	93 %

<sup>1</sup> bezieht sich auf eine Fahrt Bro – Alvesta – Malmö – Bro

<sup>2</sup> bezieht sich auf den Durchschnittspreis für den Zeitraum September – Oktober 2017

<sup>3</sup> beinhaltet 9 Hin- und Rückfahrt in 52 Wochen

Die Zusammenstellung (siehe Tabelle 5.4) weist darauf hin, dass grosse Einsparungen erzielt werden können, wenn die Temperierung beim Schienentransport elektrisch statt Dieselbetrieben ist. Im Schnitt können die Kosten für Dieselkraftstoff um 93 Prozent gesenkt werden, vor allem durch eine Senkung der Dieseldkosten, während die Mehrkosten für Strom relativ gering sind. Zudem ist der Energieverbrauch bei einer elektrischen Temperierung im Vergleich zur Dieselt temperierung deutlich geringer.

### 5.1.7 Auswirkungen in Bezug auf CO<sub>2</sub>-Ausstoss bei elektrischen Temperierung

Die durchschnittlichen Kohlendioxidemissionen bei Diesel- bzw. elektrischer Temperierung wurden berechnet und zusammengestellt (siehe Tabelle 5.5). Die Auswirkungen der Nutzung fossiler Dieselkraftstoffe bzw. der Nutzung von Dieselkraftstoff mit 20 Prozent Beimischung von BioDiesel (B20) wurden errechnet. Darüber hinaus wurden die Kohlendioxidemissionen aus der Nutzung von 100% erneuerbaren Stroms sowie der Nutzung eines Strommixes, wie er im Stromnetz üblich ist (Nordic residualmix), berechnet.

Tabelle 5.5 Zusammenstellung von Betriebszeiten und Kohlendioxidemissionen aus Elektro- bzw. Dieselt temperierung in drei Fällen

Teilstrecke	Betriebszeit bei elektrischer Temperierung (h)	Kohlendioxidausstoss (kg CO <sub>2</sub> )							
		Bei Temperierung in Dieselbetrieb				Elektrische Temperierung			
		Fossiler Diesel		Diesel B20		100 % erneuerbare Elektrizität		Nordic Residualmix	
		Fall 1	Fall 2	Fall 1	Fall 2	Fall 1	Fall 2	Fall 1	Fall 2
Südwärts: Bro–Alvesta	6,8	210	110	160	80	0	0	40	30
Bro–Malmö	10,0	820	740	620	560	0	0	190	160
Alvesta–Malmö	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sammantaget	16,8	1030	850	780	640	0	0	230	190
Nordwärts (Malmö–Bro)	7,3	400	630	300	480	0	0	90	140
<b>Gesamt pro Umlauf (Malmö–Bro–Malmö)</b>		<b>1430</b>	<b>1480</b>	<b>1080</b>	<b>1120</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>320</b>	<b>330</b>

Die Wirkungen von Diesel- und elektrischer Temperierung lassen sich auch so zusammenstellen, dass die Effekte der verschiedenen Optionen über unterschiedliche Zeiträume hinweg quantifiziert und dadurch leicht miteinander verglichen werden können (siehe Tabelle 5.6).

Tabelle 5.6

Kohlendioxidemissionen bei Diesel- bzw. elektrischer Temperierung intermodaler Ladungsträger während des Schienentransports auf der Strecke Malmö-Bro sowie Emissionsreduktionen bei der elektrischen Temperierung auf derselben Strecke

Minderung des Kohlendioxidausstosses bei elektrischer Temperierung												
Kraftstoff	Pro Hin- und Rückfahrt (ton CO <sub>2</sub> )				Pro Jahr <sup>2</sup> (ton CO <sub>2</sub> )				Relative Reduzierung			
	Fossiler Diesel		Diesel B20		fossiler Diesel		Diesel B20		fossiler Diesel		Diesel B20	
Strom	100 % erneuerbarer Strom	Nordic Residualmix	100 % erneuerbarer Strom	Nordic Residualmix	100 % erneuerbarer Strom	Nordic Residualmix	100 % erneuerbarer Strom	Nordic Residualmix	100 % erneuerbarer Strom	Nordic Residualmix	100 % erneuerbarer Strom	Nordic Residualmix
<b>Fall 1</b>	1,4	1,1	1,1	0,8	670	520	670	360	100 %	77 %	100 %	70 %
<b>Fall 2</b>	1,5	1,1	1,1	0,9	690	540	690	370	100 %	77 %	100 %	70 %

<sup>1</sup> bezieht sich auf eine Fahrt für einen Zug Malmö – Bro – Malmö (Rundfahrt)

<sup>2</sup> beinhaltet 9 Hin- und Rückfahrt für 52 Wochen

Die Zusammenfassung zeigt, dass der jährliche Ausstoss von Kohlendioxid je nach Fall (Fall 1 oder Fall 2) und Art des als Vergleich verwendeten Dieselkraftstoffs (fossiler Diesel oder Diesel B20) um 360 bis 690 Tonnen reduziert werden kann. Gleiches gilt, wenn der Kraftstoff mit 100% regenerativem Strom oder mit Nordic Residualmix verglichen wird. Wird Dieselkraftstoff durch 100% erneuerbarer Energie ersetzt, kommt es auch nicht mehr zu Kohlendioxidemissionen. Sogar bei einem Vergleich mit dem Nordic Residualmix sinken die CO<sub>2</sub>-Emissionen signifikant, sie belaufen sich auf 77% im Vergleich zu fossilem Diesel und auf 70% im Vergleich mit Diesel B20.

### 5.1.8 Kosteneffekte der elektrischen Temperierung des Coop-Zuges

Durch den Einbau von Stromversorgung und Umrichteranlagen auf intermodalen Eisenbahnwaggons werden die Waggons in Anschaffung und Wartung teurer. Nach einem Szenarium, das auf Daten eines Waggonvermieters basiert, kosten intermodale Eisenbahnwaggons mit Umrichteranlagen und Stromversorgung 2017 etwas 250 – 300 kr mehr pro Tag an Miete als gleichwertige Arten von Waggons ohne solche Geräte (Eastman, 2018). Die Kostensteigerung beinhaltet höhere Kapitalkosten, dass der Waggon in der Herstellung teurer ist und auch die Wartungskosten erhöht werden.

Gleichzeitig sind bei einer elektrischen Temperierung erhebliche Energiekosteneinsparungen möglich (siehe Abschnitt 5.1.6). Diese Einsparungen können auch ins Verhältnis zu den gestiegenen Kosten für Waggons mit Stromversorgungsanlagen gestellt werden (siehe Tabelle 5.7). Die Zusammenfassung zeigt, dass die angegebenen jährlichen Nettoersparnisse in einer Spanne von 100 000 SEK/Jahr bis 1,5 Millionen SEK/Jahr variieren.

Tabelle 5.7 Erhöhte Waggonkosten bzw. Einsparungen bei der elektrischen Temperierung

	Waggonanzahl mit Stromversorgung und Umrichteranlage	Kostenanstieg (höherer Wagenmiete) pro Jahr bei 7 Miettage pro Woche (Mio SEK)*	Energiekostensparnis bei elektrischer Temperierung im Vergleich zu Diesel-Temperierung (Mio SEK/Jahr)		Jährlicher Netto-Ersparnis bei elektrischer Temperierung	
			Dieseldieselloststoff von Zapfsäule	Dieseldieselloststoff bei Direktkauf (bei Gross-tank)	Dieseldieselloststoff von Zapfsäule	Dieseldieselloststoff bei Direktkauf (bei Gross-tank)
<b>Fall 1</b>	27	2,5–3,0	3,3	2,9	0,3–0,8	0,1–0,4
<b>Fall 2</b>	22	2,0–2,4	3,5	3,0	1,1–1,5	0,6–1,0

\* Die Miet- und Wartungskosten für einen Waggon mit Stromversorgung und Umrichteranlagen sind um pro Tag 250 – 300 SEK höher angesetzt als für einen Waggon ohne solche Geräte

Ein wichtiger Faktor in der Kostenschätzung ist der Preis, zu dem Dieseldieselloststoff in der Regel abgegeben wird, und die Auslastung von Schienenwaggons, die mit Stromversorgung und Umrichteranlagen versorgt werden. In einem ersten Fall (*Fall 1*) werden 27 Eisenbahnwaggons eingesetzt, um 15 910 temperierte Ladungsträger pro Jahr zu transportieren (siehe Tabelle 5.4), was bedeutet, dass jeder Waggon im Schnitt 590 Ladungsträger/Jahr befördert. Im zweiten Fall (*Fall 2*) werden 16850 temperierte Ladungsträger pro Jahr mit 22 Waggons transportiert, was bedeutet, dass jeder Waggon 770 Ladungsträger/Jahr transportiert, also eine um 30% höhere Produktivität hat.

### 5.1.9 Möglichkeiten zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit bei elektrischer Temperierung

Die Möglichkeit, die Wirtschaftlichkeit bei der elektrischen Temperierung von intermodalen Ladeträgern in Form von Sattelaufliegern im Coop-Zug zu erhöhen, wurde umgesetzt. Ein Ansatz war, die Zahl der Ladungsträger, die von der jeweiligen Stromversorgung und dem Umrichteranlagen angetrieben werden, zu erhöhen. Diese Art Verbesserung der Wirtschaftlichkeit setzt voraus, dass die Stromversorgung und Umrichteranlagen die Kapazität haben, mehr als zwei Ladungsträger zu versorgen.

#### Energie- und Leistungsbedarf für Temperiergeräte im Elektroantrieb

Der Leistungsbedarf für die eingesetzten Temperiergeräten lag dem Hersteller zufolge bei 8,7 kW (siehe Abschnitt 5.1.2). Bei einem Leistungsfaktor von 0,8 bedeutet dies einen scheinbaren Energiebedarf von 10,9 kVA. Die Energieversorgungs- und Umrichteranlagen, die beim Demonstrations- und Testbetrieb eingesetzt wurden, hatten einen Effekt von 60 kVA bei einem Leistungsfaktor von 0,8. Das bedeutet, dass solche Geräte ausreichende Reserven haben, um 5 Temperiergeräte versorgen zu können. Eine Energieversorgungs- und Umrichteranlage könnte daher für mindestens 2 intermodale Waggons eingesetzt werden.

Studien haben auch gezeigt, dass der durchschnittliche Leistungsbedarf in der Größenordnung von 3 – 5 kW liegt, was eine scheinbare Durchschnittsleistung von bis zu 6,2 kVA bei einem Leistungsfaktor von 0,8 bedeutet. Unter der Annahme, dass die Last mit dem durchschnittlichen Strombedarf übereinstimmt, bedeutet dies, dass eine Energieversorgungs- und Umrichteranlage 9 Temperiergeräte mit Strom versorgen könnte und dass die Ausrüstung für 4 intermodale Waggons verwendet werden kann. Sollten einmal alle Geräte mit voller Leistung (10,9 kVA) laufen, würden ein Strombedarf und eine Belastung der Energieversorgungs- und Umrichteranlage bis zu 87,2 kVA erreicht, was bedeutet, dass sie erheblich überlastet wäre (um 45%).

Eine dritte Annahme geht davon aus, dass eine Energieversorgungs- und Umrichteranlage 3 Waggons und 6 Ladungsträger mit Strom versorgt. In diesem Fall erfolgt die Bemessung mit dem Ansatz, dass 4 Temperiergeräte auf der Grundlage des vom Hersteller festgelegten Strombedarfs (10,6 kVA) und 2 Einheiten entsprechend dem durchschnittlichen Strombedarf gemäss der Studien (6,2 kVA) versorgt werden. Das bedeutet einen gesamten Strombedarf von 54,8 KVA, also weniger als 60 KVA.

Sollten einmal alle Temperiergeräte bei voller Leistung (10,9 kVA) laufen, würden der Strombedarf und die Belastung der Energieversorgungs- und Umrichteranlage 63,6 kVA erreichen, was eine gewisse Überlastung (6%) der Ausrüstung bedeutet.

Abschliessend werden die Bedingungen für die Nutzung einer Energieversorgungs- und Umrichteranlage um entweder zwei intermodale Waggons mit vier Ladungsträger (Sattelaufliegern) oder drei intermodale Waggons mit sechs Ladentragern mit Strom zu versorgen als interessant erachtet.

**Zusammensetzung der Züge bei der elektrischen Temperierung nach den Ansätzen in Fall 1 und Fall 2**

Nach den zuvor analysierten Fällen waren entweder 27 intermodale Waggons (Fall 1) oder 22 intermodale Waggons (Fall 2) mit Stromversorgungs- und Umrichteranlagen erforderlich. Ein erster Ansatz sieht einen intermodalen Waggon mit Stromversorgungs- und Umrichteranlage vor sowie einen Waggon ohne solche Geräte, der stattdessen mit 3-Phasen-Verbindungskabeln etc. ausgestattet ist. So sollen die temperierten Ladungsträger, die auf diese Wagen transportiert werden, aus der elektrischen Versorgung und der Umrichteranlage, die im Wagen daneben installiert ist, angetrieben werden können. Dadurch entstehen Waggonpaare, die aus einem Waggon mit Stromversorgung und Umrichteranlage sowie einem Waggon ohne solche Geräte bestehen, wobei letzterer stattdessen mit 3-Phasen-Verbindungskabeln ausgestattet ist.

Beim nächsten Szenarium wird ein intermodaler Waggon mit Stromversorgung und Umrichteranlage ausgestattet und mit zwei Waggons ohne solche Ausrüstung verbunden, die aber mit 3-Phasen-Verbindungskabeln etc. ausgestattet sind. Die temperierten Ladungsträger, die auf diesen beiden Waggons transportiert werden, können so aus der Stromversorgung und Umrichteranlage, die in einem dritten neben- oder zwischenliegenden Waggon installiert sind, angetrieben werden. Auf diese Weise entsteht eine Gruppe von drei Waggons, bestehend aus einem Waggon mit Stromversorgung und Umrichteranlage und zwei Waggons ohne solche Geräte.

Auf der Grundlage dieser Ansätze wurde die erforderliche Anzahl der Waggonpaare oder Waggongruppen im Setup für die elektrische Temperierung, wie in Fall 1 bzw. Fall 2 beschrieben (siehe Tabelle 5.8), berechnet.

*Tabelle 5.8 Ermittlung des Bedarfs an Waggons mit Stromversorgung nach verschiedenen Szenarien*

	Bedarf von temperierten Ladungsträgern pro Relation		Bedarf von Wagengruppen mit Stromversorgung pro Relation			
			2 Wagen in Wagengruppe		3 Wagen in Wagengruppe	
<i>Teilstrecke</i>	Fall 1	Fall 2	Fall 1	Fall 2	Fall 1	Fall 2
Südwärts Bro–Alvesta	6	3	2	1	1	1
Bro–Malmö	17	15	5	4	3	3
Alvesta–Malmö	0	0	0	0	0	0
Summa südwärts	23	18	7	5	4	4
Nordwärts (Malmö–Bro)	11	18	3	5	2	3
Wagenbedarf in dimensionierende Richtung			7	5	4	4
Wagen in Alvesta			2	1	1	1
Gesamtbedarf (2 Züge sowie Wagen in Alvesta)			16	11	9	9

Auf Basis des zusammengestellten Bedarfs an Waggons mit Stromversorgung in unterschiedlichen Szenarien ist ein Vergleich von Einsparungen und gestiegenen Kosten für unterschiedliche Szenarien in früheren Fällen (Fall 1 und Fall 2) bzw. Waggongruppen berechnet (siehe Tabelle 5.9). Die Berechnungen deuten darauf hin, dass die grössten Einsparungen auftreten, wenn die Alternative zum Betanken von Diesel an öffentlichen Tankstellen mit Fall 2 kombiniert wird, das heisst, die von Coop Logistik anvisierte Verteilung von temperierten Ladungsträgern im System.

Tabelle 5.9 Erhöhte Waggonkosten bzw. Einsparungen bei elektrischer Temperierung

	Anzahl der Wagen in Wagen-gruppe	Anzahl der Waggon mit Stromversorgung und Um-richteranlage im System			Kostensteige-rung (höherer Wagenmiete) Pro Jahr mit 7 Miettagen pro Woche (Mio SEK) <sup>1</sup>	Energiekostensparnis bei elektrischer Temperierung im Vergleich zu Diesel-Temperierung (Mio SEK/Jahr)		Jährlicher Netto-Ersparnis bei elektrischer Temperierung	
		Mit Um-richter-anlage <sup>1</sup>	Ohne Um-richter-anlage <sup>2</sup>	Ge-samt		Dieselmotoren-stoff von Zapfsäule	Dieselmotoren-stoff bei Direktkauf (bei Grosstank)	Dieselmotoren-stoff von Zapfsäule	Dieselmotoren-stoff bei Direktkauf (bei Grosstank)
<b>Fall 1</b>	1	27	0	27	2,5–3,0	3,3	2,9	0,3–0,8	0,1–0,4
	2	16	16	32	1,5–1,8			1,5–1,8	1,1–1,4
	3	9	18	27	0,8–1,0			2,3–2,5	1,9–2,1
<b>Fall 2</b>	1	22	0	22	2,0–2,4	3,5	3,0	1,1–1,5	0,6–1,0
	2	11	11	22	1,0–1,2			2,3–2,5	1,8–2,0
	3	9	18	27	0,8–1,0			2,5–2,7	2,0–2,2

<sup>1</sup> Die Miet- und Wartungskosten für einen Waggon mit Stromversorgung und Umrichteranlage sind pro Tag schätzungsweise um 250 – 300 SEK höher als für einen Waggon ohne solche Geräte

<sup>2</sup> Für diese Art von Waggon wird angenommen, dass die täglichen Kosten ähnlich der anderer intermodaler Waggon sind

Das Einsparpotenzial kann erhöht werden, wenn Eisenbahnwaggon mit Stromversorgung und Umrichteranlage in Waggongruppen mit einem oder zwei Waggon untergebracht werden, die nur mit Verkabelung etc. für die Stromversorgung von temperierten Ladungsträgern ausgestattet sind. Die Kostendifferenz zwischen Waggongruppen mit zwei und drei Waggon kann jedoch geringer sein als in der Zusammenstellung angedeutet. Denn weitere fünf intermodale Waggon müssen mit einer Verkabelung für die Stromversorgung ausgestattet werden, was versteckte Systemkosten bedeutet, da im Berechnungsansatz nicht davon ausgegangen wurde, dass dies die Wagenmiete beeinträchtigen würde.

Basierend auf der Zusammenstellung (siehe Tabelle 5.9) ergibt sich der Schluss, dass es laut Fall 1 vorteilhaft ist, Waggongruppen aus drei Waggon zu bilden, von denen einer mit Stromversorgung und Umrichteranlage ausgestattet ist und die anderen beiden nur mit Verkabelung für die Stromversorgung.

Eine weitere Schlussfolgerung ist, dass es in Fall 2 (Coops Ansatz für Frachtströme) wirtschaftlich vorteilhaft ist, Waggontruppen zu schaffen, statt einzelne Waggon mit Stromversorgung und Umrichteranlagen zu nutzen. In diesem Fall wird der grösste Effekt erzielt, wenn Waggonpaare bestehend aus einem Waggon mit Stromversorgung und Umrichteranlage und einem Waggon ohne Umrichteranlage, aber mit Kabeln und Anschlüssen für die Stromversorgung ausgestattet, gebildet werden (siehe Tabelle 5.9). In diesem Fall halbiert sich der Bedarf an Waggon mit Stromversorgung und Umrichteranlagen. Die Option, Dreiwagen-Gruppen zu verwenden, reduziert den Bedarf an Waggon mit Stromversorgung und Umrichteranlagen mit nur zwei Einheiten, während fünf zusätzliche Waggon ausschliesslich mit Verkabelung im System benötigt werden.

## 5.2 Elektrische Temperierung bei Transporten Narvik – Oslo

Für Züge, die auf der Strecke Narvik-Kiruna-Oslo unter der Regie von CargoNets bzw. Schenker verkehren, wurde eine theoretische Studie über die Möglichkeiten und Auswirkungen der Einführung der elektrischen Temperierung von Ladungsträger mit temperaturempfindlichen Gütern, vor allem Fischereierzeugnissen, in den Zügen durchgeführt. In diesen Zugsystemen werden eine beträchtliche Menge von Fischereierzeugnissen in Richtung Süden sowie Einzelhandelsprodukte, unter anderem Lebensmittel, in Richtung Norden transportiert.

### 5.2.1 Verkehrsansatz

Auf dieser Strecke fahren bis zu drei Züge pro Tag, zwei Abfahrten pro Wochentag (Montag – Freitag) bzw. zehn Abfahrten pro Woche von CargoNets Artic Rail Express (ER) und sechs Abfahrten pro Woche von Schenker Nordic Rail Express (NRE) (Austrheim, 2018 und Brunstad, 2018). Für einen der täglichen Züge sowie für die NRE-Züge gibt es auch einen Austausch (Umschlag) von Ladungsträger in Kiruna. Der Umfang ist jedoch nicht bekannt und wurde daher in dieser Studie nicht berücksichtigt. Darüber hinaus beträgt die Entfernung zwischen Oslo (dem Terminal in Alnabru) und Narvik 1.960 km. Diese Strecke wird im Durchschnitt in 27 Stunden zurückgelegt, was einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 71 km/h entspricht.

### 5.2.2 Zugzusammensetzung

Die ARE-Züge bestehen in der Regel aus 12 intermodalen 6-Achsen-Waggons, die für den Transport von insgesamt 24 Sattelauflegern, auch Trailers genannt (Brunstad, 2018), bestimmt sind. Das bedeutet, dass die Kapazität jeden Zuges 48 TEU entspricht. Auch die NRE-Züge bestehen aus zwölf Waggons, von denen 80 Prozent 6-Achsen-Waggons sind (Austrheim, 2018). Die Kapazität dieser Züge wird auch als 48 TEU angegeben. Die Gesamtwagengewichte liegen in der Grössenordnung von 1.000 Tonnen, die Zuglänge dürfen 520 m erreichen.

### 5.2.3 Güterzusammensetzung – Temperierungsbedarf

In Richtung Süden sind 60% und in Richtung Norden 10% der Waren in den ARE-Zügen temperiert (Brunstad, 2018). Das bedeutet, dass die Züge in Richtung Norden 24 und die Richtung Süden und 144 temperierte Ladungsträger in der Grösse eines Sattelauflegers pro Woche transportieren. Auf den ARE-Zügen sind angeblich im Schnitt 50 % der Ladungsträger temperiert (Austrheim, 2018). Werden diese in der gleichen Weise wie auf den NRE-Zügen verteilt, bedeutet das, dass in etwa 15% der Ladungsträger Richtung Norden und 85% der Ladungsträger Richtung Süden temperiert sind. Das bedeutet, dass die NRE-Züge pro Woche 122 Ladungsträger der Grösse eines Sattelschleppers in südliche 22 in nördliche Richtung transportieren. Damit werden 46 temperierte Ladungsträger in Form von Sattelauflegern (Trailers) nach Norden und 266 Ladungsträger pro Woche nach Süden gebracht. Sowohl für die ARE-Züge als auch für die NRE-Züge bedeutet dies pro Zug, durchschnittlich 17 Ladungsträger der Grösse eines Sattelauflegers Richtung Norden sowie 3 Ladungsträger der gleichen Grösse Richtung Süden.

### 5.2.4 Ansatz zur elektrischen Temperierung

Ein Ansatz untersucht die Möglichkeiten, Kosten- und Energieeffizienz dadurch zu erzielen, dass die Ladungsträger, die bei CargoNets (ER) und Schenker (NRE) zwischen Narvik und Oslo verwendet werden, um temperaturempfindliche Waren zu transportieren, und die bisher mit Hilfe von Diesel-Temperiergeräten temperiert wurden, elektrisch temperiert werden. Der Verkehr beläuft sich auf insgesamt 16 Züge pro Woche und Richtung. Bei den Zügen wird eine Umlaufzeit von 72 Stunden angenommen, was bedeutet, dass das ARE-System 6 Züge und das NRE-System 3 Züge umfasst. Unter der Annahme, dass der Verkehr in jeder Woche des Jahres stattfindet, umfasst das ARE-System 520 Abfahrten pro Jahr in jede Richtung und das NRE-System 312 Abfahrten pro Jahr und Richtung. Der Zug des ARE-Systems wird 87 Umschläge pro Jahr durchführen, während der Zug des NRE-Systems 104 Umschläge pro Jahr durchführt.

Aufgrund der Daten, nach denen jeder Zug eine Kapazität von 48 TEU hat, wurde der Bedarf nach Temperierung sowie die Stromversorgung und die Umrichteranlagen auf der Grundlage einer vollständigen Auslastung der beiden Zugssystemen berechnet. Die Zusammenfassung (siehe Tabelle 5.10) zeigt, dass der dimensionierte Temperierungsbedarf Richtung Süden entsteht und die Notwendigkeit impliziert, im Durchschnitt 17 temperierte Ladungsträger der Grösse eines Sattelauflegers pro Zug in Richtung Süden zu transportieren. Bestehen beide Zugsysteme (ARE und NRE) aus 6-Achsen-Waggons mit Platz für 2 Ladungsträger von der Grösse eines Sattelauflegers, sollten 9 der 12 Waggons des jeweiligen Zugs mit Stromversorgung und Umrichteranlagen ausgestattet werden.

Tabelle 5.10 Ströme von temperierten Ladungsträgern in zwei Transportsystemen zwischen Oslo und Narvik

	ARE					NRE					Total	
	Zug pro Woche	TEU Pro Woche	Temperierte TEU		Temperierte Ladungsträger entsprechend 2 TEU pro Jahr**	Zug pro Woche	TEU Pro Woche	Temperierte TEU		Temperierte Ladungsträger entsprechend 2 TEU pro Jahr**	Temperierte Ladungsträger entsprechend 2 TEU**	
			Pro Woche	Pro Jahr*				Pro Woche	Pro Jahr*		Pro Jahr	Pro Zug
Nordwärts	10	480	48	2496	1248	6	288	43	2246	1 123	2371	3
Südwärts	10	480	288	14976	7488	6	288	245	12730	6 365	13853	17
Gesamt	20	960				12	576				16224	

\* Ein Jahr umfasst 52 Verkehrswochen, was 830 Abfahrten pro Jahr und Richtung bedeutet

\*\* Ein Sattelaufleger entspricht 2 TEU

Umfasst die Systeme zusammen 9 Züge, werden 81 intermodale Eisenbahnwaggons mit Stromversorgung und Umrichteranlagen benötigt. Werden bei 16224 Malen im Jahr temperierte Ladungsträger durchschnittlich 27 Stunden auf intermodalen Waggons transportiert, bedeutet es 440000 Stunden Strombetrieb pro Jahr.

### 5.2.5 Zusammenstellung von Energie-/Kraftstoffverbrauch

Der durchschnittliche Stromverbrauch wurde vorher auf 3,15 kWh pro Ladungsträger und Betriebsstunde festgelegt und in Energieauslässen an der Überleitung umgewandelt (siehe Abschnitt 4.1.2). Der Verbrauch von Dieseldieselkraftstoff beträgt 1,84 l pro Betriebsstunde (siehe Abschnitt 4.1.1). Der Gesamtenergieverbrauch wurde daraus für die verschiedenen Szenarien zusammengestellt (siehe Tabelle 5.11).

Tabelle 5.11

Zusammenstellung von Betriebszeiten sowie Energie-/Kraftstoffverbrauch für Temperiergeräte In Elektro- bzw. Dieseldieselbetrieb nach unterschiedlichen Szenarien

	Betriebszeit bei elektrischer Temperierung (h)	Anzahl temperierter Ladungsträger	Energieverbrauch bei elektrischer Temperierung (kWh)	Kraftstoffverbrauch bei Diesel-Temperierung (l)	Umgerechneter Energieverbrauch bei Dieseldieselbetrieb (kWh)	Differenz zwischen elektrischem- und Dieseldieselbetrieb (kWh)
Nordwärts	27	3	260	150	1 460	1 200
Südwärts	27	17	1 450	840	8 280	6 830
Für einen Umlauf		<b>20</b>	<b>1 710</b>	<b>990</b>	<b>9 740</b>	<b>8 030</b>

Aus der Zusammenstellung geht hervor, dass bei einem Schienentransport eine erhebliche Kraftstoffeinsparung erzielt werden kann, werden intermodale Ladungsträger beim Eisenbahntransport elektrisch temperiert. Mit 16 Zugumläufen pro Woche für 52 Wochen im Jahr lassen sich folgende Einsparpotenziale erzielen:

- Energieeinsparung 6.560 MWh/Jahr
- Kraftstoffeinsparung 820 m<sup>3</sup>/Jahr

### 5.2.6 Wirtschaftliche Effekte der elektrischen Temperierung

Basierend auf Angaben zum Energieverbrauch und den Kosten für Strom und Diesel bei verschiedenen Beschaffungsmethoden (siehe Abschnitt 4.1.3) wurden die Energiekosten für die Temperierung intermodaler Züge berechnet und entsprechend den vorherigen Szenarien zusammengestellt (siehe Tabelle 5.12).

Tabelle 5.12 Energiekosten für Diesel- und elektrische Temperierung für den Transport von intermodalen Ladungsträgern auf der Schiene auf der Oslo-Narvik-Strecke hin und zurück, für ARE und NRE zusammen.

Anzahl transportierter Ladungsträger		Energiekosten pro Fahrt <sup>1</sup> und Zug (SEK)			Einsparung bei elektrischer Temperierung					
		Diesel-Temperierung		Elektrotemperierung	Pro Hin- und Rückfahrt (SEK)		Per Jahr <sup>3</sup> (Mio SEK)		Relative Ersparnis	
Pro Fahrt <sup>1</sup>	Pro Jahr	Alternative A. Dieseldieselkraftstoff aus der Zapfsäule (14,02 kr/l) <sup>2</sup>	Alternative B. Direkt gelieferter Diesel (Grosstank) (12,22 kr/l) <sup>2</sup>	Stromkosten an Oberleitung laut Tarif Trafikverkets (49,93 Öre/ kWh) <sup>2</sup>	Alternative		Alternative		Alternative	
					A	B	A	B	A	B
20	16 224	13 930	12 140		850	13 050	11 290	10,9	9,4	94 %

<sup>1</sup> bezieht sich auf eine Fahrt Oslo–Narvik–Oslo

<sup>2</sup> bezieht sich auf den Durchschnittspreis für den Zeitraum September – Oktober 2017

<sup>3</sup> beinhaltet 16 Hin- und Rückfahrt in 52 Wochen

Die Installation von Stromversorgung und Umrichteranlagen auf intermodalen Eisenbahnwaggons macht diese in Bezug auf die Beschaffungs- und Wartungskosten teurer. Auf der Grundlage von Berechnungen, die auf die Unterlagen eines Waggonvermietungsunternehmens basieren, ist eine Ansatz gemacht, bei denen die Kosten \* für Waggons mit Umrichter- und Stromversorgungs-ausrüstung 250 – 300 SEK höher pro Tag sind als für die entsprechenden Waggons ohne solche elektrischen Geräte (Engdahl, 2018). Dazu gehören höhere Kapitalkosten, weil der Wagen teurer zu herzustellen ist, und höhere Wartungskosten durch zusätzliche Ausrüstung.

Elektrische Temperierung bedeutet auch, dass Einsparungen bei den Energiekosten möglich sind, die im Verhältnis zu den erhöhten Waggonkosten gesetzt werden können. Des Weiteren wurden die Auswirkungen untersucht, bestimmte Waggon nur mit Kabeln zur Übertragung elektrischer Energie auszustatten und aus Waggonen mit Stromversorgung und Umrichteranlagen zu versorgen (siehe Tabelle 5.13). Die Untersuchung zeigt, dass die jährlichen Nettoersparnisse hierfür in einer Grössenspanne von 0,5 Millionen SEK/Jahr bis 6,9 Millionen SEK/Jahr variieren.

Tabelle 5.13 Erhöhte Wagenkosten bzw. Ersparnis bei elektrischer Temperierung

Anzahl Wagen in jeweiliger Wagengruppe mit Stromversorgung wobei ein Wagen mit Umrichter ausgestattet ist	Anzahl Eisenbahnwagen mit Stromversorgung und/oder Umrichteranlage im System			Kostenanstieg (höherer Wagenmiete) Pro Jahr bei 7 Miettagen pro Woche (Mio SEK)*	Energiekostensparnis bei elektrischer Temperierung im Vergleich zu Diesel-Temperierung (Mio SEK/Jahr)		Jährlicher Netto-Ersparnis bei elektronischer Temperierung	
	Mit Umrichter	Ohne Umrichter, aber mit Stromversorgungskabel	Gesamt		Dieseldieselkraftstoff von Zapfsäule	Dieseldieselkraftstoff bei Direktkauf (bei Grosstank)	Dieseldieselkraftstoff von Zapfsäule	Dieseldieselkraftstoff bei Direktkauf (bei Grosstank)
1	81	0	81	7,4–8,9	10,9	9,4	2,0–3,5	0,5–2,0
2	41	41	82	3,7–4,5			6,2–7,4	4,9–5,7
3	27	54	81	2,5–3,0			7,9–8,4	6,5–6,9

\* Die Miet- und Wartungskosten für einen Waggon mit Stromversorgung und Umrichteranlagen sind auf 250 – 300 kr höher pro Tag als für einen Wagen ohne solche Geräte festgelegt. Für Waggonen mit nur Kabeln für die Stromversorgung (ohne Umrichter) werden die gleichen Tagkosten wie andere intermodale Waggonen angenommen.

### 5.2.7 Auswirkungen auf den CO2-Ausstoss bei elektrischer Temperierung

Die durchschnittlichen Kohlendioxidemissionen bei Dieselgetriebene bzw. elektrischer Temperierung wurden berechnet und zusammengestellt (siehe Tabelle 5.14). Die Auswirkungen der Nutzung fossiler Dieseldieselkraftstoffe und der Nutzung von Dieseldieselkraftstoff mit 20 Prozent Beteiligung von Biodiesel (B20) wurden errechnet. Darüber hinaus wurden die Kohlendioxidemissionen bei Nutzung von 100% des erneuerbaren Stroms und der Nutzung von Strom mit der Zusammensetzung des Stromnetzes (Nordic Residualmix) berechnet.

Tabelle 5.14 Zusammenstellung von Betriebszeiten und Kohlendioxidemissionen aus Temperiergeräte bei elektrisch bzw. dieselgetriebener Temperierung

	Betriebszeit bei Elektrotemperierung (h)	Anzahl temperierter Ladungsträger pro Zug	Kohlendioxidausstoss (kg)							
			Temperierung wird bei Dieseldieselbetrieb durchgeführt				Elektrische Temperierung			
			Fossiler Dieseldiesel		Diesel B20		100 % erneuerbarer Strom		Nordic Residualmix	
			Pro Ladungsträger	Pro Zug	Pro Ladungsträger	Pro Zug	Pro Ladungsträger	Pro Zug	Pro Ladungsträger	Pro Zug
Nordwärts (Oslo – Narvik)	27	3	131	393	100	300	0	0	30	90
Südwärts (Narvik – Oslo)	27	17	131	2227	100	1700	0	0	30	510
Für einen Umlauf				2620		2000		0		600

Eine Zusammenfassung (siehe Tabelle 5.15) zeigt, dass die Kohlendioxidemissionen je nach Art des Kraftstoffs, der als Vergleichsgrundlage verwendet wird und ob der Kraftstoff mit 100% erneuerbarer Energie oder Nordic Residualmix verglichen wird, um 1 400 bis 2620 Tonnen reduziert werden können.

Tabelle 5.15 Kohlendioxidemissionen bei Dieseldiesel bzw. elektrischer Temperierung intermodaler Ladungsträger im Schienentransport auf der Strecke Oslo – Narvik

Reduzierung des Kohlendioxidausstosses bei elektrischer Temperierung													
	Pro Hin- und Rückfahrt (ton)				Pro Jahr <sup>2</sup> (ton)				Relative Reduzierung				
Kraftstoff	fossiler Dieseldiesel		Diesel B20		fossiler Dieseldiesel		Diesel B20		fossiler Dieseldiesel		Diesel B20		
Strom	100 % erneuerbarer Strom	Nordic Residualmix	100 % erneuerbarer Strom	Nordic Residualmix	100 % erneuerbarer Strom	Nordic Residualmix	100 % erneuerbarer Strom	Nordic Residualmix	100 % erneuerbarer Strom	Nordic Residualmix	100 % erneuerbarer Strom	Nordic Residualmix	
	2,6	2,0	2,0	1,4	2160	1660	1660	1160	100 %	77 %	100 %	70 %	

<sup>1</sup> Bezieht sich auf eine Reise für einen Zug – Narvik – Oslo (Rundfahrt)

<sup>2</sup> Umfasst 16 reisen Hin- und Zurück in 52 Wochen

Kohlendioxid-Emissionen gehen verloren, wenn Dieselkraftstoff durch 100% des erneuerbaren Stroms ersetzt wird. Auch wenn ein Vergleich der Kohlendioxidemissionen mit dem Nordic Residualmix als Berechnungsgrundlage stattfindet, sind die Reduktion der Kohlendioxidemissionen signifikant und belaufen sich auf 77%, wenn mit fossile Diesel verglichen wird bzw. 70 % wenn mit Diesel B20 verglichen wird.

### 5.3 Ansatz zur Ausrüstung für den Stromtransfer zwischen Waggons

Wenn eine Systemlösung für die elektrische Temperierung von intermodalen Zügen gewählt wird, wobei jede Stromversorgung und Umrichteranlage mehr als einen intermodalen Eisenbahnwagen versorgt, sollte eine geeignete Lösung für die Übertragung von 400 V Drei-Phasen-Wechselstrom auf Waggons ohne solche Aggregate, die aber die mit Stromversorgungskabeln ausgestattet sind gewählt werden, um elektrisch temperierte Ladungsträger transportieren zu können. Bei der Wahl einer Lösung für die Stromübertragung ist es wichtig, ob die Waggons mehr oder weniger dauerhaft zusammen gekoppelt werden sollte, also kurzgekoppelt werden, oder ob sie im Zusammenhang mit Schaltvorgängen und Zugbildung an- und abgekoppelt werden können. In letzterem Fall sind standardisierte Lösungen von Interesse.

#### 5.3.1 Standardisiertes System zur Stromübertragung zwischen Waggons

In dem Projekt wurde die in Nordamerika eingesetzte standardisierte Lösung für Stromübertragung die überwiegend in Personenzug verwendet wird untersucht. Dieses System dient der Übertragung von 3-Phasen-Wechselstrom mit einer Spannung von 480 V und einer Frequenz von 60 Hz zwischen Lokomotiven und Waggons sowie zwischen Waggons. Das System wird sowohl für die Versorgung von Personenwagen mit Zugheizstrom als auch mit Strom für verschiedene Service-Funktionen wie Beleuchtung und Klimaanlage eingesetzt (Ahlberg et al, 2013).

Für Züge in den Vereinigten Staaten empfiehlt die American Public Transportation Association (APTA) eine Stromversorgungs-/Zugheizungssystem, Head-End-Power (siehe Abbildung 5.1). Dabei werden sogenannte Jumper-kabeln verwendet, die losen Kabel mit Steckverbindern in jedem Ende sind, die an Steckdosen am Wagon bzw. Lokomotiven angeschlossen wird (siehe Abb. 5.2 und Abb. 5.3).

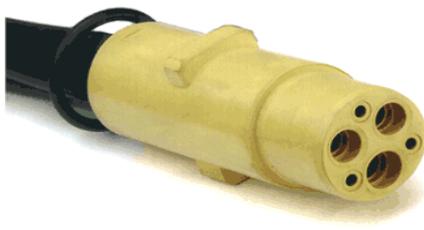


Abb. 5.1 Kabelende mit Stecker nach dem Nordamerikanischen System Head-End-Power



Abb. 5.2 Steckdose nach APTA-Standard mit möglichem Platzring auf intermodal Wagon (TFK)



Abb. 5.3 Kabel nach APTA-Standard zwischen Personenwagen in Nord Amerika (Färm)

Das System ist in der Lage, 1 600 A bzw. 2 x 800 3-Phasen-Wechselstrom mit einer Spannung von 480 V und einer Frequenz von 60 Hz, das heisst eine scheinbare Leistung von 1,3 MVA, die mit 4 Parallelgeschaltet Kabeln zwischen jedem Wagen geliefert wird (APTA, 1999). In einigen Fällen hat das System eine geringere Übertragungskapazität und es werden dann nur 2 parallelgeschaltet Kabel durch das Zug verwendet (siehe Abbildung 5.3).

#### 5.3.2 Stromübertragung zwischen kurzgekoppelte Waggons

In einen Ansatz wobei intermodale Waggons mit Stromversorgung und Umrichteranlagen kurzgekoppelt zu Waggons, die mit Kabelbäumen und Anschlussgeräten für die Übertragung ausgestattet sind wird, reduziert sich die Notwendigkeit der Verwendung von standardisierten Übertragungssystemen für 3-Phasen 400 V Wechselstrom zwischen den Waggons. Stattdessen können Lösungen gewählt werden, die als robust und kosteneffizient gelten.

## 6. Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Im Rahmen des Projekts wurde eine Lösung für die elektrische Temperierung intermodaler Ladungsträger im Schienentransport vorgeführt, getestet und unter realen Betriebsbedingungen im intermodalen System, das oft als Coop-Zug bekannt ist, bewertet. Das System transportiert temperaturempfindliche Güter wie Lebensmittel unter anderem zwischen Malmö und einer Vertriebs- und Terminalanlage in Bro ausserhalb Stockholms. Eine Absicht war es, die Menge des Energieverbrauchs sowie die Menge der Emissionen, die bei der Temperierung auftreten, zu quantifizieren. Darüber hinaus war es ein Ziel, die Energie- und Umweltauswirkungen bei einem Wechsel zur elektrischen Temperierung zu quantifizieren.

### 6.1 Ansätze

Der Grundansatz dieses Vorführprojekts war es, zu zeigen, dass temperierte Ladungsträger, wie Sattelaufleger mit Temperiergeräte, die elektrisch betrieben werden kann, von der Oberleitung über die Lokomotive des Zuges elektrifiziert werden können. Ziel war es, die Ladungsträger mit einem 3-Phasen-Wechselstrom mit 400 V-Spannung und einer Frequenz von 50 Hz zu versorgen.

Vor einem Vorführ- und Testbetrieb wurden verschiedene Lösungen für die elektrische Temperierung verglichen und analysiert. Der Einsatz der bestehenden Bahnheizungen der Lokomotiven und die Umgestaltung des Zugheizungsstrom in den Eisenbahnwaggons hatten mehrere Vorteile, darunter, dass die meisten Elektrische Lokomotive mit Zugheizungssystemen und Steckdosen ausgestattet sind und daher keine Anpassung der Lokomotiven erforderlich ist. Der Lösung für elektrischen Temperierung besteht in der Übertragung von elektrischer Energie von Lokomotiven auf intermodale Schienengüterwagen durch die in den meisten Elektrische Lokomotive installierte standardisierte System für Zugheizung. Damit kann 1-Phasen Strom mit 1 KV-Spannung und Frequenz der Überleitung von 162/3 Hz auf die Eisenbahnwaggons übertragen werden. Das bedeutet, dass die Überleitungsspannung von 16 kV in der Lokomotive bei gleich bleibender Frequenz in eine Spannung von 1 kV umgewandelt wird. Um die Ladungsträger mit einem 3-Phasen Strom von 400 V bei einer Frequenz von 50 Hz zu versorgen, wurden die Eisenbahnwaggons mit elektrischen Versorgungsgeräten ausgestattet, die hauptsächlich aus Umrichter, Spannungswandler und Anschlusskabeln bestand. Der leistungsbedarf wurde auf 10 kW pro Träger oder 20 kW pro intermodale Einheit geschätzt, was mit einem Leistungsfaktor von 0,8 eine scheinbare Leistung von 25 KVA bedeutet.

### 6.2 Demonstrations- und Testbetrieb

Ein Demonstrations- und Testbetrieb mit einer elektrischen Temperierung von intermodalen Ladungsträgern in Form von Sattelauflegern lief von Juli bis Oktober 2017 in der intermodalen Systembahnanordnung, dem Coop-Zug. 8 Sattelaufleger, ausgestattet mit Temperiergeräte für Diesel- bzw. Elektrische Betrieb, und mit Mess- und Aufzeichnungsgeräten, bildeten Analyseobjekte. 26 Mal wurden während der Testphase relevante und nützliche Messdaten gewonnen, als diese Sattelaufleger auf Eisenbahnwaggons mit Stromversorgung und Umrichteranlagen transportiert wurden.

Der Verbrauch von Dieseldieselstoff belief sich während des Testzeitraums auf 1,8 l/h, was einen Energieverbrauch von 17,7 kWh/Betriebsstunde bedeutete. Die durchschnittliche Zeit, die die Geräte bei der Schienentransport mit Strom betrieben wurde, betrug 8,6 Stunden. Der durchschnittliche Stromverbrauch in der Kühl- und Tiefkühlzeit betrug 2,7 kWh/Betriebsstunde bei Umrichtern, Was umgerechnet in Bezug auf Effizienz von Umrichtern und Lokomotiven, bei der Überleitung 3,2 kWh/Betriebsstunde Bedeutet. Der Energieverbrauch sank dadurch um über 80% bei einem Wechsel vom Diesel zur elektrischen Temperierung.

Während der Testphase betragen die Kosten für die elektrische Temperierung eines Ladungsträgers für den Schienenverkehr 13,50 SEK. Die durchschnittlichen Kosten für die Temperierung denselben Ladungsträger mit Dieseldieselstoff betragen 208 SEK. Ein 1 sparpotenzial von fast 200 SEK pro Schienentransport eines temperierten Ladungsträger, der in der Grösse eines Sattelauflegers entspricht, wurde mit die im Oktober 2017 geltenden Dieseldieselstoff- und Strompreise angezeigt, was eine Kostensenkung von über 90 Prozent bedeutete. Die Analysen verglichen die Dieselpreise an allgemeinen Tankstellen bzw. Grosskundenlieferung mit den Kosten für elektrische Energie nach dem Preis der Verkehrsbehörden.

Vergleiche der Kohlendioxidemissionen in der elektrischen und Diesel- Temperierung eines Sattelauflegers im Schienenverkehr zeigen, dass bei elektrischer Temperierung mit 100% erneuerbarer Energie die CO<sub>2</sub>-Emissionen eliminiert werden. Wird elektrische Energie mit Zusammensetzung nach Nordisk Residualmix verwendet, werden die Emissionen um 70 – 77% reduziert, verglichen mit der Temperierung mit fossilem Diesel oder UmweltDiesel (Diesel B20). Neben der Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Ausstosses wurde der Ausstoss von Stickoxiden und Partikeln stark reduziert oder vollständig eliminiert bei der Wechsel von Diesel- zur elektrischen Temperierung.

### **6.3 Elektrische Temperierung von intermodale Systemzüge**

Die Möglichkeiten und Auswirkungen der Einführung einer elektrischen Temperierung im Transport von Ladungsträgern mit temperaturempfindlichen Gütern wurden auch für intermodale Züge untersucht, die auf der Strecke Narvik – Kiruna – Oslo verkehren. Die Strecke hat eine Länge von 1 960 km und wird mit insgesamt 16 Zügen pro Woche bedient, von CargoNet mit Artic Rail Express und Schenker mit Nordic Rail Express. Die Züge bestehen in der Regel aus 12 intermodalen 6-Achs-Waggons, was bedeutet, dass 24 Sattelaufleger in jedem Zug transportiert werden können. Südwärts war 85 Prozent der Waren in den Zügen temperiert und nordwärts 15 Prozent temperiert. Das bedeutete, dass der Bedarf an Temperierung im Nach der Verkehr südwärts dimensioniert werden muss und 9 Waggons in jedem Zug mit Stromversorgung und Umrichteranlagen ausgestattet werden sollten. Berechnungen ergaben, dass, wenn temperierte Ladungsträger 16 200 Mal im Jahr für 27 Stunden auf intermodalen Zügen transportiert werden, elektrische Temperierung eine Energieeinsparung von 6,6 GWh/und eine Kraftstoffeinsparung von 820 m<sup>3</sup>/Jahr. Darüber hinaus wurde darauf hingewiesen, dass die Kohlendioxidemissionen je nach Art des Dieselmotors, der als Vergleichsgrundlage verwendet wird und ob der Kraftstoff mit 100% erneuerbarer Energie oder Strom nach dem Nordic Residualmix verglichen wird, um 1 250 bis 2 160 Tonnen pro Jahr reduziert werden könnten. Wird der Dieselmotors durch 100 Prozent erneuerbaren Stroms ersetzt, werden die Kohlendioxidemissionen eliminiert. Auch vergleiche nach dem Nordic Residualmix zeigen grosse Rückgänge, 80 Prozent, wenn man fossiler Diesel vergleicht und 75 Prozent für Diesel B20.

Die Anschaffungs- und Wartungskosten von intermodalen Eisenbahnwaggons steigen, wenn Stromversorgung und Umrichteranlagen installiert sind und 2017 wurde eingeschätzt das solche Geräte die Mietkosten pro Tag um 250 – 300 SEK erhöhen. Analysen der Nettofinanzeffekte der elektrischen Temperierung, wo die gestiegenen Kosten für Waggons mit Stromversorgung und Umrichteranlagen in Bezug auf reduzierte Energiekosten gesetzt wird, andeutete bei den beiden Alternativen Waggon-Zusammensetzungen des Coop-Zugs, dass die jährlichen Nettoersparnisse bei der elektrischen Temperierung zwischen 0,1 und 1,5 Millionen SEK/Jahr betragen. Für die Strecke Narvik – Kiruna – Oslo beliefen sich die entsprechenden Einsparungen auf 0,5 bis 3,5 Millionen SEK/Jahr. Die Variationen war auf die Anschaffung von Dieselmotors zurückzuführen, ob er an einer öffentlichen Tankstelle oder zu einem grosskundenpreis gekauft wurde und wie viele Waggons mit Stromversorgung und Umrichteranlagen im System sind und deren Auslastung. Die Kostenanalyse ergab, dass es von Interesse war, nach Lösungen zu suchen, um die Kosten für die Stromversorgung und den Umrichteranlagen auf mehrere beförderte Ladungsträgereinheiten zu verteilen. Interessant war, bestimmte Waggons nur mit Verkabelungen für die Stromübertragung auszustatten und sie aus Waggons mit Stromversorgung und Umrichteranlagen zu versorgen.

## 6.4 Ergebnisse

Auswertungen eines Demonstrations- und Probetriebs, bei dem Sattelaufleger elektrisch beim Schienentransport temperiert wurden, zeigten, dass die elektrische Temperierung den Energieverbrauch im Vergleich zur Dieseltemperierung um mehr als 80% reduzierte. Darüber hinaus könnten die Kohlendioxidemissionen eliminiert werden, wenn 100% erneuerbaren Stroms verbraucht werden. Bei einer Berechnung nach dem Ansatz, dass elektrische Energie eine Zusammensetzung nach dem Nordic Residualmix hat, verringerte sich der Kohlendioxid-Ausstoß um 70 – 77%.

Die Analyse ergab auch, dass die Nettoersparnis bei der elektrischen Temperierung für den Coop-Zug zwischen 0,1 und 1,5 Millionen SEK/Jahr betrug und für die Route Narvik – Kiruna – Oslo zwischen 0,5 und 3,5 Millionen SEK/Jahr.

Die Möglichkeiten zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit der elektrischen Temperierung von Sattelauflegern in diese beiden Szenarien wurden auf Grundlage des Ansatzes der Erhöhung der Zahl der Sattelaufleger die durch die jeweilige Stromversorgung und Umrichteranlage versorgt wird, die nach der angegebenen Leistungsbedarf die Kapazität hätte, 5 Temperiergeräte zu versorgen. Das bedeutete, dass eine Ausrüstung für 2 Eisenbahnwaggons verwendet werden konnte und könnte in der Lage 3 Waggons zu versorgen, in der Annahme, dass 4 Geräte entsprechend dem Strombedarf des Herstellers versorgt werden und dass 2 Einheiten entsprechend dem durchschnittlichen Strombedarf der in diesem Prospekt ermittelt wurde. In einer Situation, in der alle Temperiergeräte mit voller Leistung laufen, könnten die Energieversorgung und Umrichteranlagen bis zu einem gewissen Grad überlastet sein. Nach ein erster Ansatz nutzt eine Energieversorgung und Umrichteranlage für die Stromversorgung von 2 intermodalen Eisenbahnwaggons und 4 Sattelauflegern. Das bedeutet, dass ein Eisenbahnwaggon mit solcher Ausrüstung an einen Waggon der nur mit 3-Phasen Anschlusskabeln für die Stromversorgung der Sattelaufleger die auf diesen Wagen platziert wird. Nach nächste Ansatz soll ein intermodaler Waggon mit Stromversorgung und Umrichteranlage mit 2 Waggons ohne solche Geräte, nur mit 3-Phasen Kabeln für die Stromversorgung ausgestattet sind angeschlossen werden.

Die Nettoeinsparung stieg deutlich an, wenn jede Stromversorgung und Umrichteranlage für mehr als 2 Sattelaufleger genutzt werden konnte. Bei eine Lösung mit 4 Sattelauflegern pro Stromversorgung und Umrichteranlage stiegen die Einsparungen für den Coop-Zug auf 1,1 – 2,5 Millionen SEK. Wurde die Zahl der Ladungsträger pro Ausrüstung auf 6 erhöht, stiegen die Einsparungen auf eine Größenordnung von 1,9 – 2,7 Millionen. Für die Strecke Narvik – Kiruna – Oslo lagen die Einsparungen bei einer Größenordnung von 4,9 – 7,4 Millionen bei 4 Sattelauflegern bzw. im Bereich 6,5 – 8,4 Millionen bei 6 Sattelauflegern pro Ausrüstung. Das lässt den Schluss zu, dass eine robuste Profitabilität am besten durch die Bereitstellung von mindestens 4 intermodalen Lastenträgern in Form von Sattelauflegern für jede Stromversorgung und Umrichteranlage erreicht wurde.

Die Analyse des Lärms, der durch intermodale Züge in Bewegung sowie Lärm aus dem Temperiergerät ausgelöst wurde, ergab, dass die Addition von Lärm aus den Temperiergeräten, egal ob mit Diesel oder Strom betrieben, im Vergleich zu dem von einem Zug in Bewegung (bei 80 und 120 km/h) erzeugten Lärm so begrenzt ist, dass er in der Nähe von Eisenbahnstrecken nicht relevant ist. Das Problem kann aber auch an Orten auftreten, an denen temperierte Züge stillstehen oder sich mit geringer Geschwindigkeit bewegen, etwa beim Umschalten.

## 6.5 Schlussfolgerungen

Im Rahmen des Projekts wurde eine Lösung für die elektrische Temperierung intermodaler Lastenträger beim Schienentransport unter realen Betriebsbedingungen im intermodalen Zugsystem, das Coop Logistik betreibt und auch unter dem Namen Coop Zug bekannt ist, demonstriert, getestet und bewertet. Die abgeschlossene Demonstration und Auswertung ergab, dass das getestete System robust ist und gut funktioniert und sich gut an die bestehenden Systemlösungen angepasst hat, die etabliert sind und für die Stromversorgung von Schienenfahrzeugen bzw. für die Stromversorgung von Ladungsträgern nach Industrie-Standard entwickelt wurden. Insgesamt hat dies dazu geführt dass die Umsetzung des demonstrierten Stromversorgung- und Temperierungssystems sowohl im aktuellen intermodalen Schienenverkehr als auch im aktuellen intermodalen Terminalmanagement an 2 Orten problemlos war. Die Demonstration konnte zeigen, dass es kein Hindernis für die vollumfängliche Umsetzung der Systeme zur elektrischen Temperierung intermodaler Transporteinheiten für temperaturempfindliche Güter gibt.

Analysen zeigten eine deutliche Energieeinsparung, wenn Sattelaufleger mit Strom statt mit Dieselmotoren temperiert wurden. Es wurde auch festgestellt, dass elektrische Temperierung grosse Möglichkeiten bietet, die Umweltauswirkungen des intermodalen Verkehrs zu reduzieren. Berechnungen ergaben, dass die elektrische Temperierung des Coop-Zuges den Energieverbrauch um 2 GWh/pro Jahr senken konnte, während 250 m<sup>3</sup> Dieselmotoren jährlich eingespart werden konnten. Darüber hinaus konnten die Kohlendioxidemissionen unter Verwendung des Coop-Zuges um 680 Tonnen pro Jahr reduziert werden, sodass die CO<sub>2</sub>-Emissionen um 6 700 Tonnen pro Jahr niedriger waren, als wenn der betreffende Verkehr nur auf der Strasse durchgeführt worden wäre (Håkansson, 2018/I).

Aus betrieblicher Kostensicht sprechen auch grosse Einsparungen durch reduzierten Einsatz von Dieselmotoren für das System. Dies muss aber in Zusammenhang mit gestiegenen Kapitalkosten gesetzt werden.

## 6.6 Weitere Studien

Bei der elektrifizierten Temperierung lassen sich erhebliche Kostensenkungen erzielen, wenn Dieselmotoren in Temperiergeräten der Ladungsträger vermieden werden (Treiber et al., 2015). Beim intermodalen Verkehr bedeutet jedoch eine elektrifizierte Temperierung ohne die Möglichkeit des Dieselmotors, dass die Redundanz von Dieselmotoren, wie etwa bei einem Stromausfall durch Oberleitungsbusausfälle, verloren geht und durch andere Systeme ersetzt werden muss. Eine Lösungsmöglichkeit wäre, Duo-Lokomotiven zu verwenden, die mit Dieselmotoren ausgestattet sind, die diese Geräte bei einem Stromausfall versorgen können (Bark et al., 2008).

Die negativen Energie- und Umweltwirkungen durch die Temperierung können durch den Einsatz von Temperiergeräten, die im Strassenverkehr über verschiedene Kraftübertragungssysteme von Lkw-Motoren angetrieben werden und daher keine eigenen Energiequellen in Form kleiner Dieselmotoren benötigen, reduziert werden. Ein grosser Nachteil dieser Lösungen ist jedoch, dass die Temperierung ausgeschaltet wird, wenn die Triebwerke des Lastwagens abgeschaltet werden, was dazu führen kann, dass ein LKW-Motor in Betrieb bleiben muss, wenn das Fahrzeug steht, um mit der Temperierung fortzufahren, was vor allem aus Umweltsicht negativ ist. Eine Möglichkeit, dieses Problem zu lösen, könnte darin bestehen, die derzeitigen Strassenfahrzeuge und Ladungsträger mit elektrischen Energieträgern auszustatten.

Interessant ist, zu untersuchen, welche Veränderungen und Anpassungen im Verkehrssystem sowie bei Fahrzeugen und Ladungsträgern bei der Systemintegration zwischen verschiedenen Verkehrsträgern erforderlich sind, wenn der verstärkte Einsatz von Verkehrstypen mit hohem Effizienzfaktor ein Ziel ist. Deshalb ist es wichtig, dass das zukünftige elektrifizierte Temperiersystem so konzipiert wird, dass es verkehrstypenneutral ist und Transportansätze, bei denen verschiedene Nutzungsarten so kombiniert und die Typen mit grösster Verkehrs- und Energieeffizienz gewählt werden können. In einem Fortsetzungsprojekt soll daher untersucht werden, wie Systeme für elektrifizierte Temperierung im Strassenverkehr konzipiert werden können, welche Anforderungen an die Energiespeicherung für die Temperierung von stillstehenden Fahrzeugen gestellt werden sollten und wie Schnittstellen zum Beispiel bei intermodalen Systemen etabliert werden können.

Die Möglichkeit einer elektrifizierten Temperierung im Strassenverkehr ist Voraussetzung für elektrisch temperierte Ladungsträger in einer intermodalen Transportkette, in denen die ersten und letzten Abschnitte überwiegend im Strassenverkehr liegen. Ziel ist es, energieeffiziente Lösungen für den temperierten Transport zu schaffen, die den Einsatz fossiler Brennstoffe reduzieren. Ausserdem müssen die künftigen Anforderungen des Lebensmittelmarktes für die Durchführung der Temperierung sowie die technischen und systemtechnischen Anforderungen an künftige Strassen- und Schienenfahrzeuge und Temperieranlagen ermittelt werden.

Vertreter der Fahrzeugindustrie und der Gerätehersteller haben festgestellt, dass elektrifizierte Lösungen für die Temperierung eine systemübergreifende Schnittstelle aufweisen müssen. Das bedeutet, dass eine koordinierte Studien und Analysen erforderlich sind, wie elektrische Temperierung eingeführt werden kann, welche Anforderungen gestellt werden sollten und wie Schnittstellen zwischen verschiedenen Verkehrsträgern wie Strasse und Schiene gestaltet werden können.