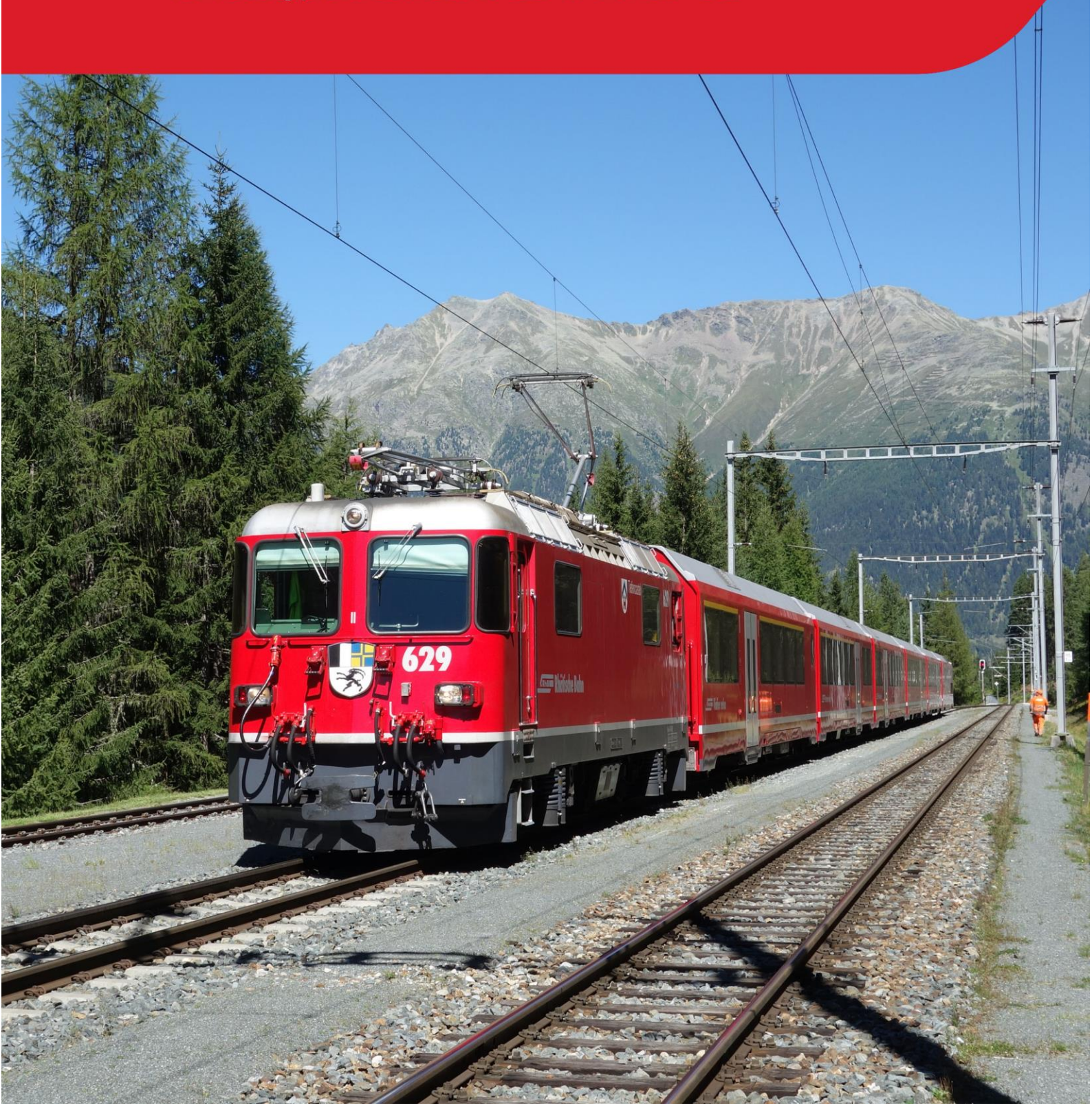


P-073 Schlussbericht

Energieeinsparung

durch Optimierung der Ventilationssteuerung
1. Prototyplok der Serie Ge 4/4 II 611-633



Schlussbericht des Projektes:

P-073 Energieeinsparung durch Optimierung der Ventilationssteuerung
1 Prototyplok der Serie Ge 4/4 II 611-633

Bearbeitung durch:

Rhätische Bahn AG
RhB-Strasse 1
CH-7302 Landquart
www.rhb.ch

Projektleiter/Entwicklungsingenieur/Verfasser:

Michael Nold
michael.nold@rhb.ch
081 288 22 62

Titelbild:

Ge 4/4 II der Rhätischen Bahn mit einem Albulagliederzug im Fahrplanbetrieb
Foto: M. Nold

24.09.2018

Inhalt

Danksagung	5
Kurzüberblick dieses Projektschlussberichtes.....	6
<i>Brief overview of this project completion report</i>	7
1 Ausgangssituation & Voruntersuchung.....	8
1.1 Die RhB Ge 4/4 II	8
1.2 Bisherige Ventilation	9
1.3 Energieverbrauch und Abschätzung.....	10
1.3.1 Ventilationsstufenabhängiger Energieverbrauch.....	10
1.3.2 Ventilationsstufenwahl	11
1.3.3 Betriebszeiten.....	11
1.3.4 Kalkulation der Energiereduktion.....	12
1.3.5 Zusätzliche Energiekostenreduktion auf dem Abstellgleis.....	13
1.4 Auswirkungen auf die Motorlebenserwartung	13
1.5 Motortemperatursensoren vs. Motortemperaturmodell.....	15
2 Entwicklung	17
2.1 Motortemperaturmodellansatz	17
2.2 Bestimmung der Motormodelleinflussgrößen.....	18
2.2.1 Motoraufbau	18
2.2.2 Messfahrten	19
2.2.3 Auswertung	22
3 Die praktische Umsetzung & Validierung.....	23
3.1 Steuerungskonzept.....	23
3.2 Implementierung in der Lok	24
3.2.1 Speicherprogrammierbare Steuerung.....	24
3.2.2 Signale und deren Einbindung.....	25
3.2.2.1 Temperaturen.....	25
3.2.2.2 Einführung von Leittechnikdaten	26
3.2.2.3 Verzicht auf Sensoren zur Luftdruckmessung	26
3.2.3 Software	27
3.2.3.1 Strukturierung	27

3.2.3.2	Umsetzung des Steuerungskonzeptes und zusätzlicher Sicherheitssysteme	28
3.2.3.3	Umsetzung der Temperatursteuerung anhand des Beispiels des Stromrichters	29
3.2.4	Inbetriebsetzung und Optimierung	30
4	Validierung	31
5	Energiekostenreduktion	32
5.1	Wirkungsgrad	32
5.1.1	Abkühlfaktor	32
5.1.2	Temperaturabhängigkeit der Wärmeübertragung	32
5.2	Energieersparnis	34
5.2.1	Während der Fahrt	34
5.2.2	Zusatzersparnis auf dem Abstellgleis	35
5.3	Energiekostenreduktion	36
5.3.1	Während der Fahrt	36
5.3.2	Zusatzersparnis auf dem Abstellgleis	37
6	Fazit / Conclusion	38
7	Verzeichnisse	40
7.1	Abbildungsverzeichnis	40
7.2	Tabellenverzeichnis	41
7.3	Quellen	42

Danksagung

Dieses Entwicklungsprojekt wurde durch das Bundesamt für Verkehr (BAV) im Rahmen des Programmes Energiestrategie 2015 im öffentlichen Verkehr (ESÖV 2050) finanziert.

Dadurch wurde es uns ermöglicht, bei Altfahrzeugen Energie zu sparen und die Nachhaltigkeit zu verbessern. Für diese Unterstützung, des Projektes und die damit erreichten Energieeinsparungen soll Dr. Tristan Chevroulet, Herrn Daniel Schaller, Herrn Jean-Loup Robineau und allen weiteren Beteiligten des BAV recht herzlich gedankt werden.

Dabei ist zu betonen, dass es sicher ist, dass dieses Projekt ohne diese Unterstützung nicht zustande gekommen wäre und daher auch die Energieeinsparungen nicht umgesetzt worden wären.

Weiter soll allen Kollegen gedankt werden, die im Rahmen dieses Projektes tätig waren und es durch ihre Mitarbeit ermöglicht haben, dass die erarbeiteten Lösungen in einer Fahrzeugserie umgesetzt werden konnten.

Kurzüberblick dieses Projektschlussberichtes

Dieser Bericht beschreibt das vom BAV subventionierte Projekt „P-073 Energieeinsparung durch Optimierung der Ventilationssteuerung 1 Prototyplok der Serie Ge 4/4 II 611-633“. Dabei soll nicht nur auf die Ergebnisse eingegangen werden, sondern auch der Weg zu dem Projektziel beschrieben werden um einen Wissenstransfer und eine Projektnachahmung zu ermöglichen.

Im ersten Kapitel (ab Seite 8) wird auf die Ausgangssituation eingegangen und den Aspekt, das bisher durch den Lokführer manuell zu stark ventiliert wurde, was wiederum den Energieverbrauch erhöht und die Lebenserwartung der Motoren durch die Kondenswasserbildung reduziert. Weiter wird erläutert, dass dieses hier beschriebene Entwicklungsprojekt gewählt wurde, da es die ökonomischste Variante ist, das ökologische Ziel der Energieeinsparung zu erreichen.

Im zweiten Kapitel (ab Seite 17) wird die Entwicklung der sensorlosen Motortemperaturberechnung beschrieben. Dazu wird zuerst der Ansatz zur Berechnung erklärt. Anschliessend wird dargestellt, wie die Modellparameter für die Berechnung an der Ge 4/4 II ermittelt wurden.

Das dritte Kapitel (ab Seite 23) befasst sich mit der praktischen Umsetzung der Ventilationssteuerung und der anschliessenden Validierung am Fahrzeug. Dabei wird zuerst auf das Steuerungskonzept eingegangen. Weiter wird die eingesetzte Hard- und Software beschrieben. Im Anschluss wird erläutert, wie die Inbetriebsetzung effizient umgesetzt werden konnte.

Das vierte Kapitel (ab Seite 31) beschreibt die Validierung, der Motortemperaturberechnung. Dabei wird die gemessene Situation mit der berechneten Situation verglichen und dargestellt.

Im fünften Kapitel (ab Seite 32) werden die Energiekostenreduktionen erörtert. Dabei wird unter anderem auf den Wirkungsgradaspekt eingegangen. Weiter wird die erreichte Energieersparnis dargestellt, sodass letztendlich die Energiekostenreduktionen aufgezeigt werden können.

Im sechsten und letzten Kapitel (ab Seite 38) wird zuerst das Projekt im Kontext der verschiedenen Möglichkeiten Energie zu sparen eingeordnet und das Projektfazit gefällt.

Brief overview of this project completion report

This report describes the BAV-subsidized project "P-073 Energy Saving by Optimizing Ventilation Control 1 Ge 4/4 II 611-633 Series Prototype Locomotive". Additionally to the project results, it describes the way to the project goal to enable a knowledge transfer and a project imitation.

The first chapter (from page 8) describes the initial situation which the aspect that was previously over-ventilated manually by the train driver. This increases the energy consumption and reduces the life expectancy of the engines. Further it discussed the best approach to achieve the energy saving goals.

The second chapter (from page 17) describes the development of the sensorless motor temperature calculation. Firstly the calculation is explained following by the approach how to determine the model parameters for temperature calculation.

The third chapter (from page 23) describes the practical implementation of the ventilation control. Firstly, the control concept is described. Then will the hardware and software explained. Lastly, it is explained as how to commission could be implemented efficiently.

The fourth chapter (from page 31) describes the validation of the sensorless motor temperature calculation. Therefore, the calculation and measurements results will be compared.

The fifth chapter (from page 32) discusses energy cost reductions. Therefore, the aspect of efficiency will be explained. Then will energy savings and the energy cost reductions described.

The sixth and last chapter (from page 38) is the conclusion. Firstly will be this project and the different kind of energy classified. Further, will be discusses the results and the conclusions.

1 Ausgangssituation & Voruntersuchung

Zur Erläuterung der Ausgangssituation wird zuerst kurz die betroffene Fahrzeugserie vorgestellt (siehe Abschnitt 1.1) und auf die bisherige Ventilationssituation eingegangen (siehe Abschnitt 1.2 ab Seite 9).

Anschliessend wird basierend auf der Ausgangssituation die Voruntersuchung dieser Entwicklung erläutert. Hierbei wird mit einer konservativen Annahme die minimale Energieersparnis ermittelt und dadurch die Motivation für die Entwicklung abgeschätzt (siehe 1.3 ab Seite 10).

Zusätzlich wird erörtert, dass die neue höhere Motortemperatur dazu beiträgt die Motorlebenserwartung zu erhöhen (siehe 1.4 ab Seite 13).

Letztendlich wird noch darauf eingegangen, warum genau diese Lösungsvariante gewählt und im Folgenden entwickelt wurde (siehe Abschnitt 1.5 ab Seite 15)

1.1 Die RhB Ge 4/4 II

Die Lokomotivserie Ge 4/4 II (siehe Abbildung 1) stellt mit 23 Fahrzeugen die grösste Triebfahrzeugserie der Rhätischen Bahn dar.



Abbildung 1 – Die Ge 4/4 II der Rhätischen Bahn mit einem Albulagliederzug im Fahrplanbetrieb (Foto: M.Nold)

Die ersten Fahrzeuge wurden im Jahr 1973 gebaut. Die zweite Serie stammt aus dem Jahr 1984. Momentan wird in die Ge 4/4 II im grossen Stil investiert um sie für die Anforderungen der nächsten 25 Jahre fit zu machen. So werden die Fahrzeuge neben der neuen Zugsicherung ZSI 127 mit der Dualbremse (parallele Druckluft- und Vakuumbremse) ausgestattet, damit sie die neuen Albulagliederzüge befördern und mit den neuen Steuerwagen im Pendelzug eingesetzt werden können.

Im Rahmen dieser umfangreichen Umbauten ist es extrem kostengünstig und einfach möglich diese Fahrzeuge mit der hier beschriebenen automatischen Ventilationssteuerung auszustatten um die Fahrzeuge hinsichtlich der Energieeffizienz attraktiver zu gestalten.

1.2 Bisherige Ventilation

Bei den Fahrzeugen der Lokomotivserie Ge 4/4 II der Rhätischen Bahn wird die Ventilation der Fahrmotoren, Stromrichter und des Transformators manuell durch den Lokführer geregelt (siehe Bedienelemente in Abbildung 2 und Abbildung 3). Dabei stehen dem Lokführer keinerlei quantitative Anhaltspunkte zur Verfügung. Die Motortemperatur wird bei den Lokomotiven dieser Serie nicht gemessen. Die Stromrichtertemperatur und die Trafotemperatur werden nur direkt im Maschinenraum auf analogen Thermometern angezeigt, sodass der Lokführer auch auf diese Informationen während der Fahrt nicht zurückgreifen kann. Daher orientiert sich der Lokführer bei der Wahl der Ventilationsstufe an:

- seiner persönlichen Intuition,
- an dem Zuggewicht,
- an der Strecke,
- an seiner gefühlten Führerraumtemperatur,
- an seiner Schätzung der Aussentemperatur und
- an der Selbsteinschätzung seiner Fahrweise.

Diese unpräzisen Informationsquellen mit den jeweiligen Ungewissheiten in Kombination mit den Bedenken des Lokführers die Lokomotive und insbesondere die Fahrmotoren nicht zu überhitzen führt dazu, dass im Allgemeinen deutlich zu stark ventiliert wird.

Von den drei zur Verfügung stehenden Ventilationsstufen wird von den meisten Lokführern bei der manuellen Bedienung fast ausschliesslich die Stufe drei und somit die maximale Ventilation gewählt. Erst wenn Schnee auf der Strecke liegt wird dieser Trend unterbrochen, sodass dann tendenziell auf der Stufe 2, welche als „schwach“ angeschrieben ist, ventiliert wird.



Abbildung 2 – Übersicht des Führerraums und des Bedienpults (Foto: M.Nold)



Abbildung 3 – Schalter zur manuellen Bedienung der Ventilation (Foto: M.Nold)

1.3 Energieverbrauch und Abschätzung

Im Folgenden sollen die Vorabuntersuchungen hinsichtlich der Energieersparnis und der daraus resultierenden Motivation zur weiterführenden Untersuchung dargelegt werden. Hierbei wird zuerst auf den ventilationsstufenspezifischen Energieverbrauch eingegangen (siehe Abschnitt 1.3.1). Anschliessend wird die durchschnittliche Ventilationsstufenwahl dargelegt (siehe Abschnitt 1.3.2 ab Seite auf Seite 11), sodass mit den Betriebszeiten (siehe Abschnitt 1.3.3 auf Seite 11) die Kalkulation der Energiereduktion durchgeführt werden kann (siehe Abschnitt 1.3.4 ab Seite 12).

1.3.1 Ventilationsstufenabhängiger Energieverbrauch

Messungen während des Betriebes machten es deutlich, dass der Energieverbrauch für die Ventilation mit zunehmender Ventilationsstufe signifikant zunimmt.

Hierzu veranschaulicht die Abbildung 4 die Unterschiede des Energieverbrauches in Abhängigkeit der Ventilationsstufe.

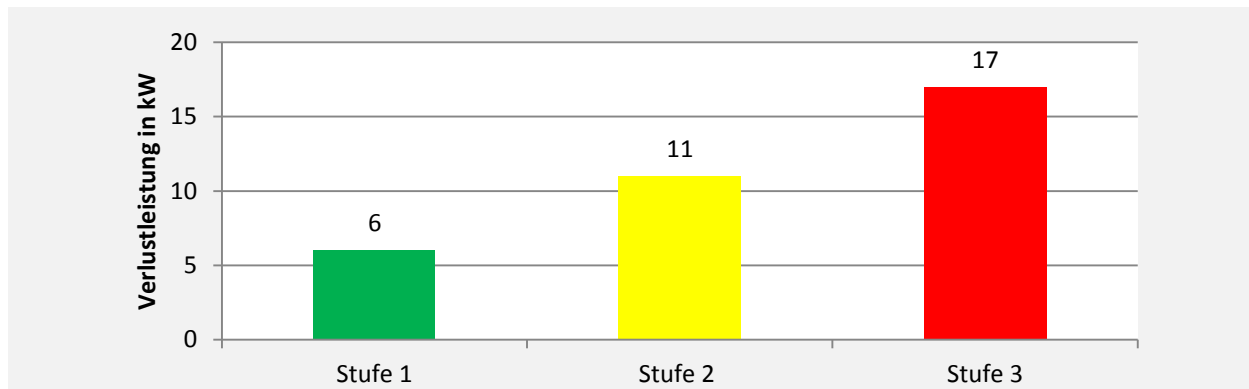


Abbildung 4 – Übersicht des Energieverbrauches der einzelnen Ventilationsstufen

Ergänzend zur Abbildung 4 zeigt die Tabelle 1 den prozentualen Vergleich der einzelnen Ventilationsstufen. Daraus wird deutlich, dass um Faktor 1.83 mehr Energie für die Ventilation verbraucht wird, wenn Stufe 3 anstatt der Stufe 2 gewählt wird. Wenn Stufe 3 anstatt der Stufe 1 gewählt wird, erhöht sich der Verbrauch sogar um den Faktor 2.83.

Name der Stufe	Energieverbrauch	Prozentualer Verbrauch verglichen mit:		
		Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3
Stufe 1 (Stillstand)	2 mal 3.0 kW	100 %	55 %	35 %
Stufe 2 (Schwach)	2 mal 5.5 kW	183 %	100 %	65 %
Stufe 3 (Stark)	2 mal 8.5 kW	283 %	155 %	100 %

Tabelle 1 – Übersicht des Energieverbrauches der einzelnen Ventilationsstufen und prozentualer Vergleich dieser Stufen zueinander.

Anhand dieser Ausgangssituation macht es aus ökologischer (und ökonomischer) Perspektive Sinn zu untersuchen, wie stark die Ventilation betrieben wird und wie viel Energie gespart werden kann wenn die Ventilation reduziert wird.

1.3.2 Ventilationsstufenwahl

Anonymisierte Aufzeichnungen während des Betriebes zur Ermittlung der Ventilationsstufenwahl ergaben folgendes Ergebnis:

- 65 % mit Stufe 3,
- 30 % mit Stufe 2 und
- 5 % mit Stufe 1.

Zu diesen quantitativen Werten ist jedoch anzumerken, dass sowohl bei den Untersuchungen im Winter wie auch im Sommer erhebliche Streuungen zwischen den Ventilationsverhalten der einzelnen Lokführern aufgetreten sind.

In diesem Zusammenhang kam es unter anderem zu dem Ergebnis, dass einige Lokführer komplett auf Stufe 3 ventiliert haben. Einzelne andere haben ungefähr im folgenden Verhältnis ventiliert:

- 25 % Stufe 3,
- 65 % Stufe 2 und
- 10 % Stufe 1.

Gleichzeitig waren keinerlei kritisch erhöhte Temperaturen und Schädigungen am Fahrzeug festzustellen, wenn weniger ventiliert wurde. Daher wurde dieses Ventilationsverhältnis als Grundannahme für eine erste Amortisationsrechnung herangezogen.

1.3.3 Betriebszeiten

Die Betriebsstunden pro Fahrzeug sind bei der Rhätischen Bahn im Vergleich zu anderen Bahngesellschaften kürzer. Dies liegt, wie aus Abbildung 5 deutlich wird, an dem späten Betriebsbeginn und früheren Betriebsende. So ergeben sich für die Ge 4/4 II im Schnitt Umlaufzeiten zwischen 9 und gut 13 Stunden. Im Median sind es knapp 12 Stunden.

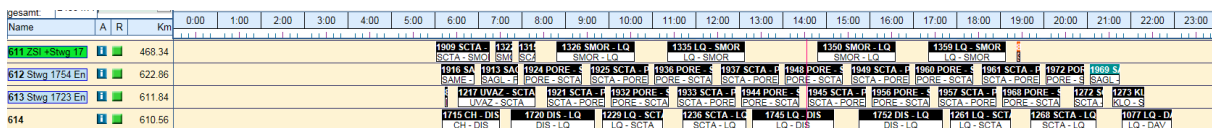


Abbildung 5 – Auszug aus einem Dienstplan für die Ge 4/4 II (Quelle: RhB)

Weiter befinden sich bei der RhB Fahrzeuge tagsüber im Unterhalt oder stehen bei der RhB als betriebliche Reserven zur Verfügung. Im Normalfall entspricht dies in der Summe knapp einem Monat im Jahr. Bewusst wurde jedoch, da es sich um eine konservative Annahme handeln soll, mit 45 Tagen gerechnet, an denen das Fahrzeug nicht in Betrieb ist¹.

¹ Abhängig von Fahrzeugumbauten und Fahrzeugrevisionen ist die Anzahl an eingesetzten und verfügbaren Fahrzeugen bei der RhB sehr unterschiedlich. So ist es keine Ausnahme, dass derartige Rollmaterialknappheiten bestanden, sodass Güterzüge von Museumslokomotiven wie den Rhätischen Krokodilen gezogen werden mussten.

1.3.4 Kalkulation der Energiereduktion

Anhand der erwähnten Daten lässt sich hochrechnen, dass die Ventilation einer Ge 4/4 II im Jahr circa 55 000 kWh an Energie benötigt, wenn sie mit dem Ventilationsverhältnis der Abbildung 6 betrieben wird.

Würde die Ventilation mit dem Verhältnis, wie es in der Abbildung 7 dargestellt ist, betrieben - ergibt sich ein Verbrauch von lediglich 45 000 kWh pro Lokomotive pro Jahr. Diese Ersparnis von 10 000 kWh pro Lokomotive und Jahr wurde als realistisch erreichbarer Wert, welcher mit dieser Entwicklung möglich ist, angesehen. Diese Ersparnis führt nicht nur zu einem ökologischen Gewinn sondern auch bei einer Betrachtung der Gesamtkosten (inklusive Entwicklungskosten) zu einem deutlichen ökonomischen Gewinn. Zudem bestand das Ziel darin, diesen Wert zu überbieten.

In der Praxis hat sich gezeigt, dass dies möglich war und sogar ein besserer Wert erreicht werden konnte. Es hat sich gezeigt, dass der Prototyp bei einem Verhältnis, wie in Abbildung 8 dargestellt eingependelt hat und gegenüber dem heutigen manuellen Betrieb eine Energieersparnis von circa 19 300 kWh pro Lokomotive im Jahr erreicht hat. Weitere Details zur Energieersparnis werden in Kapitel 5 ab Seite 32 erläutert.

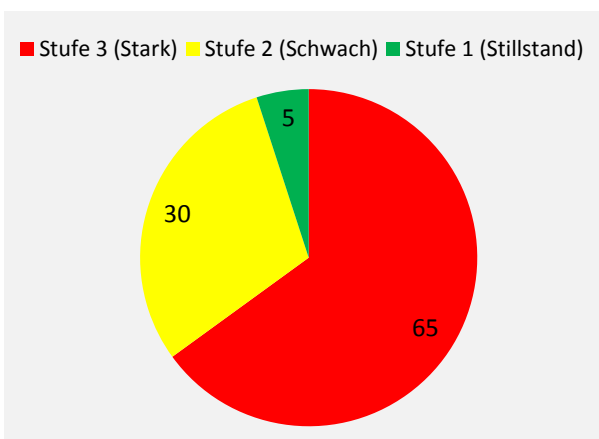


Abbildung 6 – Mittleres Ventilationsverhältnis bei manueller Bedienung durch den Lokführer.

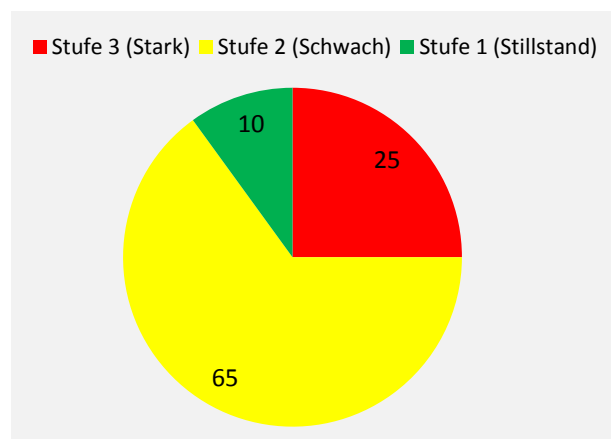


Abbildung 7 – Konservative Annahme für ein zukünftiges Ventilationsverhältnis.

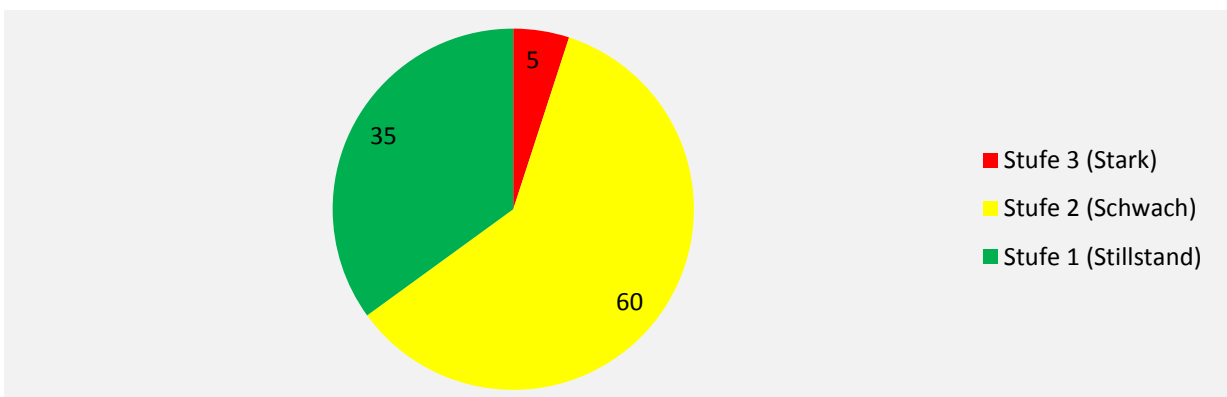


Abbildung 8 – Erreichtes Ventilationsverhältnis der Prototypenlokomotive

1.3.5 Zusätzliche Energiekostenreduktion auf dem Abstellgleis

Bis zur Einführung des neuen Albulagliederzuges im Sommer 2016, bestand bei einem abgestellten Zug nicht die Notwendigkeit die Ge 4/4 II auf dem Abstellgleis zu ventilieren.

Der neue Albulagliederzug benötigt im Vergleich zu den alten Personenwagen auch im Stillstand deutlich höhere Ströme. Diese liegen zwischen 200 und 300 Ampere, sodass sich der Trafo deutlich erwärmt. Ohne eine Ventilation, wird daher regelmässig, die bei 85 Grad Trafotemperatur auslösende Zwangsventilation aktiv. Aus diesem Grund, wird die Stillstandsventilation neuerdings bei dem abgestellten Zug manuell aktiviert und die ganze Zeit aktiv gehalten, was bei 12 Stunden circa 72 kWh an Energie verbraucht.

Praktisch ist es jedoch nicht notwendig kontinuierlich zu ventilieren. Effektiv haben erste Untersuchungen gezeigt, dass es ausreichend ist, sporadisch die Ventilation zu aktivieren, sodass bedarfsgerecht ungefähr 10 % der abgestellten Zeit ventiliert werden muss.

Durch diese neu hinzugekommene Notwendigkeit besteht ein weiterer Vorteil der automatischen Ventilationssteuerung Energie zu sparen. So können durch diese bedarfsgerechte Ventilation auf dem Abstellgleis pro Albulagliederzug circa 65 kWh an Energie pro Tag gespart werden.

1.4 Auswirkungen auf die Motorlebenserwartung

Bei einer Erhöhung der Motortemperaturen wäre es naheliegend die Annahme zu treffen, dass dies die Lebenserwartung reduziert. Im Fall der Ge 4/4 II ist dies jedoch anders. Diverse Temperaturstichproben des Motorinnenraums haben gezeigt, dass die Motortemperaturen, bedingt durch die starke Ventilation, häufig weniger als 20 K über den Umgebungstemperaturen lagen.

Im Winter ist dies insbesondere nachteilhaft wenn die Motoren auf Temperaturen von unter 18 °C abgekühlt werden. Beispielsweise liegt im Vereinatunnel eine Temperatur von 22 °C vor und durch die hohe Luftfeuchtigkeit im Tunnel ergibt sich ein Taupunkt von circa 18 °C. Dies bedeutet, dass sich an Komponenten, deren Temperatur unter 18 °C liegen, Kondenswasser bildet².

Daher bildet sich bei einer zu stark gekühlten Ge 4/4 II Kondenswasser im Motor, wenn sie im Winter in den Vereinatunnel einfährt. Bedingt durch den Aspekt, dass es sich bei den Motoren um Reihenschlussmotoren mit Bürsten handelt, verursacht Kondenswasser im Motor Bürstenfeuer. Zusätzlich kann es auch zu Stromüberschlägen führen. Durch diese Wasserbildung wurden in alle Motorverkleidungen der Ge 4/4 II Wasserablauflöcher gebohrt um Wasseransammlungen zu verhindern.

Diese Ablauflöcher verbessern die Situation jedoch nur minimal. Letztendlich konnte es jedoch nicht verhindert werden, dass sich in den zu kalten Motoren Stromüberschläge entstehen (siehe Abbildung 9), zu erheblichen Schädigungen führen und die Komponenten aufschmelzen.

² In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, dass die Kondenswasserbildung im Vereinatunnel so intensiv ist, dass sich sogar auf der Lauffläche von Rädern Kondenswasser bildet und die Rad-Schiene-Reibwerte verschlechtert (diese Kondenswasserbildung auf den Rädern wurde 2013 entdeckt und als Vereina-Effekt bezeichnet) [1].



Abbildung 9 – Durch einen Stromüberschlag geschädigter Motor einer Ge 4/4 III, welcher durch Kondenswasserbildung im Vereinatunnel entstanden ist (Foto: M.Nold)

1.5 Motortemperatursensoren vs. Motortemperaturmodell

Das Ziel besteht darin, eine automatisierte Ventilationssteuerung zu implementieren. Hierzu gibt es grundsätzlich zwei Varianten:

- Ventilationssteuerung mit Temperatursensoren in den Fahrmotoren
- Ventilationssteuerung anhand eines Motortemperaturmodells

Eine Ventilationssteuerung mit Temperatursensoren in den Motoren hat im Vergleich zur anderen Variante folgende Vor- und Nachteile:

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> - Hinsichtlich des Entwicklungsanspruchs einfach realisierbar. - Genauere Temperaturkenntnis 	<ul style="list-style-type: none"> - Die Temperatursensoren werden üblicherweise konstruktiv während der Motorenwicklung in den Motor integriert. Ein nachträgliches Einbringen ist sehr aufwendig und kostenintensiv. - Bei diversen moderneren Triebfahrzeugen hat sich gezeigt, dass die Temperatursensoren in den Motoren störungsanfällig sind und aufwendig ausgewechselt werden müssen. - Die zusätzliche Sensorverkabelung vom Drehgestell zum Wagenkasten macht den Drehgestellwechsel aufwendiger und stellt bei der vorliegenden Konstruktion eine potentielle Schwachstelle dar. - Es besteht ein Konstruktionsaufwand für den Umbau des Motors und der Kabelführung in den Drehgestellen. - Pro Fahrzeug entstehen höhere Kosten im Vergleich zur Variante mit dem Motortemperaturmodell

Tabelle 2 – Vor- und Nachteile des Nachrüstens, einer Ventilationssteuerung mit Motortemperatursensoren

Eine Ventilationssteuerung anhand eines Motortemperaturmodells hat im Vergleich zur anderen Variante folgende Vor- und Nachteile:

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> - Deutlich geringerer Umbauaufwand, da es sich primär um eine Softwarelösung handelt. - Mit zunehmender Fahrzeuganzahl wird diese Variante günstiger. - Im Fahrzeug ist weniger störungsanfällige Hardware. 	<ul style="list-style-type: none"> - Es besteht ein Entwicklungsaufwand - Es müssen verschiedene Zustandsgrößen bekannt sein.

Tabelle 3 - Vor- und Nachteile des Nachrüstens, einer Ventilationssteuerung mit einem Motortemperaturmodell

Eine Abwägung der Sachlage macht deutlich, dass für das Nachrüsten dieser Altfahrzeugserie die Variante mit dem Motortemperaturmodell vorzuziehen ist. Dies begründet sich insbesondere daraus, dass der Entwicklungsaufwand stundenmässig (und auch bei Betrachtung des höheren Entwicklungsstundensatzes) deutlich geringer, als der Umbauaufwand für die Fahrzeugserie ist. Daher erweist sich die Variante mit dem Motortemperaturmodell als wirtschaftlicher. Aus diesem Grund wurde schon von Anfang an dieses Entwicklungsprojekt, mit dem Ziel diese Variante umzusetzen, initialisiert.

In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass während der Entwicklungsphase in den Fahrmotoren des Prototyps Temperatursensoren installiert wurden. Diese mussten jedoch während der Entwicklungsphase mehrfach durch neue Sensoren ersetzt werden, da es zu Sensordefekten kam.

2 Entwicklung

Am Anfang dieses Kapitels wird zuerst auf den Motortemperaturmodellansatz eingegangen (siehe Abschnitt 2.1), sodass darauf beschrieben werden kann, wie die Einflussgrößen ermittelt wurden (siehe Abschnitt 2.2 ab Seite 18).

2.1 Motortemperaturmodellansatz

Für die Ventilationssteuerung wird die Temperatur des Fahrmotors sekundlich in einem Zeitschrittverfahren berechnet. Hierbei erfolgt die Berechnung der neuen Temperatur aus der bestehenden Temperatur sowie der Temperaturänderung aufgrund verschiedener Einflussgrößen. Für die Temperaturzunahme und Temperaturabnahme werden jeweils mathematische fahrzeugspezifische Zusammenhänge anhand von Messungen aufgestellt.

Dabei errechnet sich die Temperaturzunahme aus den Eingangsgrößen:

- des aktuellen Fahrmotorstroms und
- der momentanen Fahrmotortemperatur.

Die Temperaturabnahme hat deutlich mehr Einflussgrößen und hängt primär von:

- der zuvor berechneten Motortemperatur,
- der aktuellen Ventilationsstufe,
- der gemessenen Kühllufttemperatur,
- der gemessenen Lokkastentemperatur und
- dem aktuellen Luftdruck ab.

Mit diesen Eingangsgrößen wird sekundlich, nach dem in Abbildung 10 gezeigten Schema, aus der alten Fahrmotortemperatur die neue Fahrmotortemperatur berechnet.

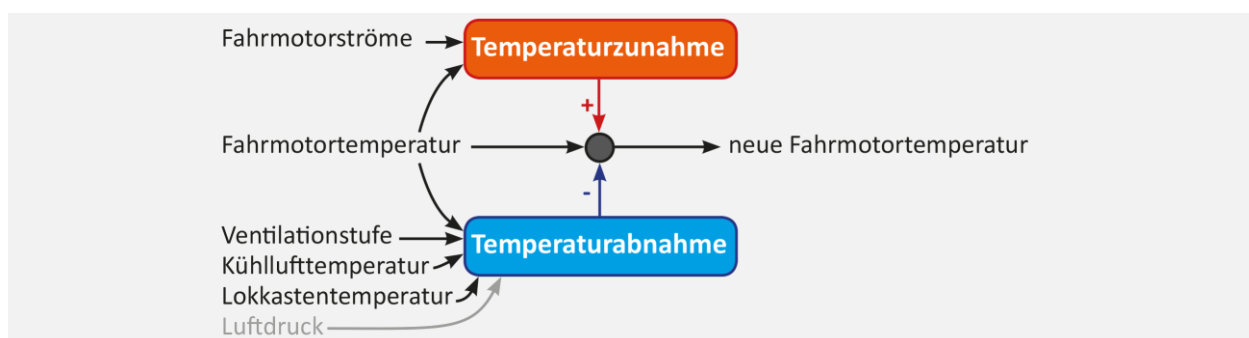


Abbildung 10 – Aufbau des implementierten Fahrmotortemperaturberechnungsmodells

Dieses Modell hat den Vorteil, dass die Parameter messtechnisch mit anschließender mathematischer Auswertung bestimmt werden können und sich als Ergebnis direkt ein Temperaturwert ergibt, welcher mit der alten Fahrmotortemperatur verrechnet wird. Eine aufwendige Modellbildung mit diversen Annahmen und Ungewissheiten entfällt. Es ist lediglich erforderlich den physikalischen Einfluss der einzelnen Einflussgrößen sorgfältig aus Messungen zu

extrahieren und diese in motorspezifische mathematische Formeln für den jeweiligen Lokomotivtyp zu beschreiben.

Ein weiterer Vorteil dieser Herangehensweise ist der Aspekt, dass die benötigte Rechenleistung deutlich geringer ist, wenn mit gefitteten Formeln gearbeitet wird, anstatt mit einer aufwendigen Berechnung eines dreidimensionalen Temperaturmodells. Wenn zusätzlich noch die Approximation der physikalischen Einflüsse auf Polynome heruntergebrochen wird, kann auf kostengünstige speicherprogrammierbare Steuerungseinheiten zurückgegriffen werden. Alternativ besteht sogar die Möglichkeit bestehende speicherprogrammierbare Steuerungen zu erweitern und mit diesen die Ventilationssteuerung zu betreiben.

2.2 Bestimmung der Motormodelleinflussgrößen

Zur Bestimmung der physikalischen Abhängigkeiten der Fahrmotortemperatur von den Motormodelleinflussgrößen wurde die Prototypenlokomotive mit diversen Messeinrichtungen ausgestattet. Unter anderem wurde hierzu die Fahrmotortemperatur an verschiedenen Stellen jedes einzelnen Motors gemessen und mit Datenloggern sekundlich aufgezeichnet.

Hierzu beschreibt Abschnitt 2.2.1 den Motoraufbau und Abschnitt 2.2.2 die Messungen.

2.2.1 Motoraufbau

In einer Vorabmessung wurden alle Wicklungen des Motors untersucht (siehe Abbildung 11, Abbildung 12 und vgl. Schema Abbildung 13).

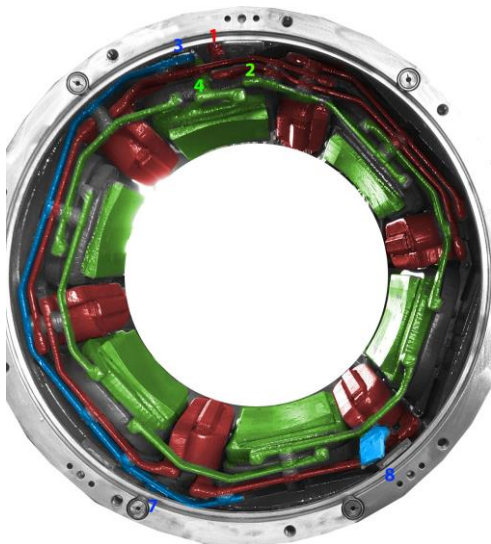


Abbildung 11 – Stator des Reihenschlussmotors der RhB Ge 4/4 II mit kolorierten Wicklungen. Rot sind die Wendepolwicklungen, grün sind die Wicklungen für die Serienfelderregung und die blauen Leitungen führen zu den Statorwicklungen (Foto & Montage: M.Nold)

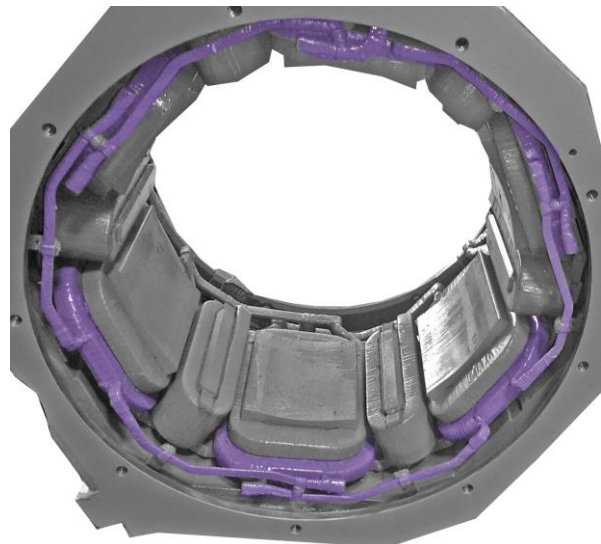


Abbildung 12 – Stator des Reihenschlussmotors der RhB Ge 4/4 II mit kolorierten Wicklungen. Violett sind die Fremdfeldwicklungen (Foto & Montage: M.Nold)

Im Rahmen erster Messungen wurde, die zuvor berechnete theoretische Annahme bestätigt, dass die Wendepolwicklungen (siehe Abbildung 11) die stärkste Erwärmung aufweisen und somit am kritischsten sind. Daher wurde der Schwerpunkt weiterer Messungen auf die Wendepolwicklungen gesetzt.

Die Stator-Wicklungen wurden dafür mit berührenden Hochtemperatursensoren beklebt (siehe Abbildung 14). Zusätzlich wurde der Rotor mittels Infrarotsensoren überwacht.

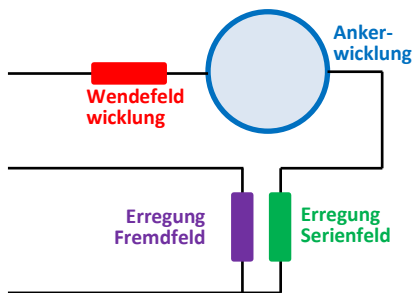


Abbildung 13 – Wicklungsschema der Ge 4/4 II Fahrmotoren.



Abbildung 14 – Temperatursensor an der Fahrmotorwendepolwicklung der Ge 4/4 II (Foto: M.Nold)

2.2.2 Messfahrten

Zur exakten Bestimmung der Motortemperatur in Abhängigkeit konstanter Grössen wurden umfangreiche Messfahrten durchgeführt.



Abbildung 15 – RhB Ge 4/4 II 629 + RhB Ge 4/4 III 642 im Vereinatunnel (Foto: M.Nold)

Bedingt durch seine lange gerade Streckenführung und konstanten Umgebungsbedingungen eignet sich der Vereinatunnel besonders gut. So liegt in der Tunnelmitte eine Temperatur von circa 21 bis 22 Grad vor, wie vergangene Messungen gezeigt haben [1]. Weiter ist, bezogen auf das RhB Netz, der Höhenunterschied und somit der Luftdruckunterschied durch die geringe Steigung von 15 ‰ im Vereinatunnel nicht allzu hoch.

Zur Simulation der Last wurde an die Ge 4/4 II eine Ge 4/4 III als Bremslokomotive angekoppelt (siehe Abbildung 15). In diesem Zusammenhang ist zu betonen, dass durch die Ge 4/4 III die Bremsenergie wieder zurück in den Fahrdrat gespeist wurde, sodass die Messungen möglichst energieeffizient durchgeführt werden konnten. Daher wurde bewusst darauf verzichtet Anhängelasten mitzuführen, da mit Anhängelasten keine Energierückspeisung möglich gewesen wäre.

Zusätzlich muss bei der Auswahl der Bremslokomotive beachtet werden, dass diese über den gesamten Geschwindigkeitsbereich mehr elektrische Bremskraft aufbringen kann, als die Ge 4/4 II zuzüglich der Hangabtriebskraft beider Lokomotiven (siehe Abbildung 16).

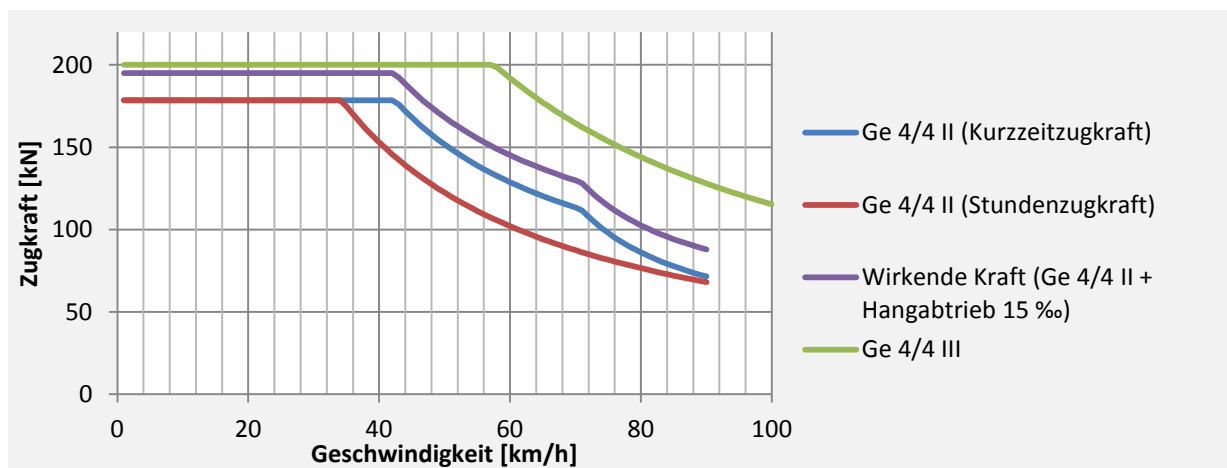


Abbildung 16 – Zugkraft der RhB Ge 4/4 II (blau und rot) und Bremskraft der RhB Ge 4/4 III (grün) sowie die maximal wirkende Kraft (violett), welche von der Ge 4/4 III abgebremst werden muss [2].

Zur Bestimmung der Motorerwärmung wurden Motorströme bis 950 Ampere bei allen drei Ventilationsstufen aufgebracht, sodass pro Motor Erwärmungskennlinien, wie sie beispielsweise in Abbildung 17 oder Abbildung 18 gezeigt werden, gemessen werden konnten. Zusätzlich wurden Abkühlkurven, wie beispielsweise in Abbildung 19 dargestellt, erfasst.

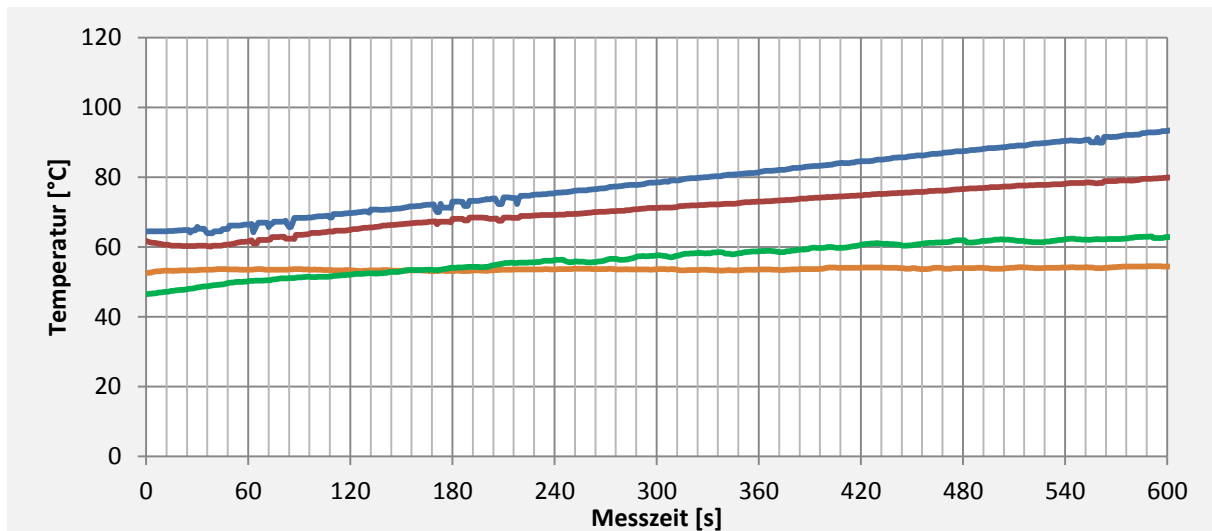


Abbildung 17 – Rohdaten der Erwärmungsmessung bei 650 A Motorstrom und Ventilationsstufe 1 (Stillstandsventilation) (blau Wendepolwicklung, rot Kollektor, orange Maschinenraum, grün Erregerwicklung)

Durch diese Messungen wurde deutlich, dass die Motorerwärmung im Gegensatz zur Annahme deutlich geringer als angenommen ist. So darf bspw. ein Motorstrom von 950 Ampere regulär maximal 3 Minuten bei maximaler Ventilationsstufe (Stufe 3) aufgebracht werden, damit der Motor nicht überhitzt wird. Die in Abbildung 18 dargestellte Messung hingegen zeigt, dass auch bei 10 Minuten und Ventilationsbetrieb auf Stufe 2 (schwach) keine kritischen Temperaturen entstehen.

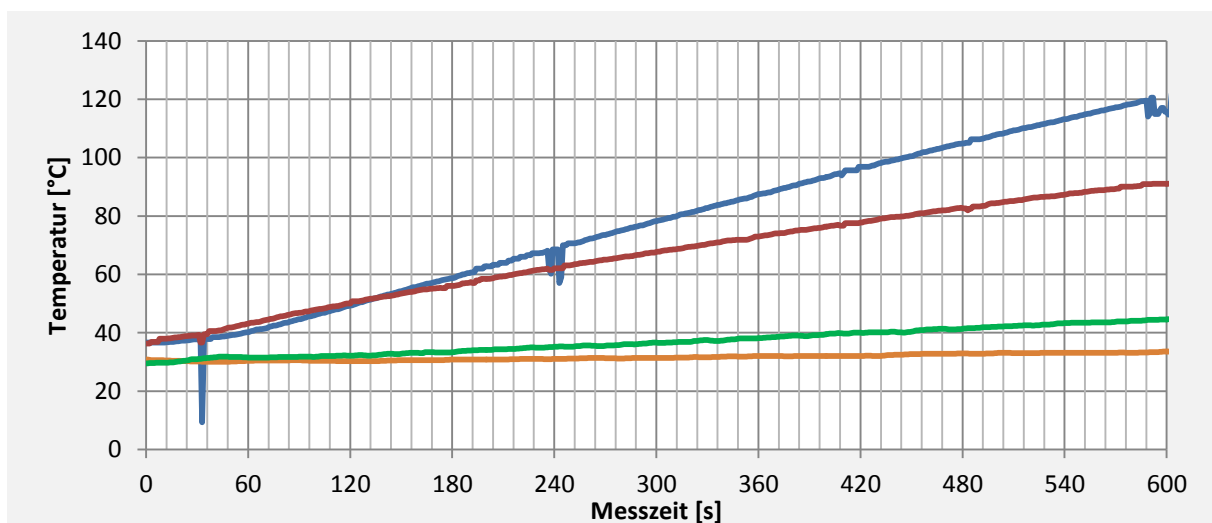


Abbildung 18 – Rohdaten der Erwärmungsmessung bei 650 A Motorstrom und Ventilationsstufe 2 (schwache Ventilation) (blau Wendepolwicklung, rot Kollektor, orange Maschinenraum, grün Erregerwicklung).

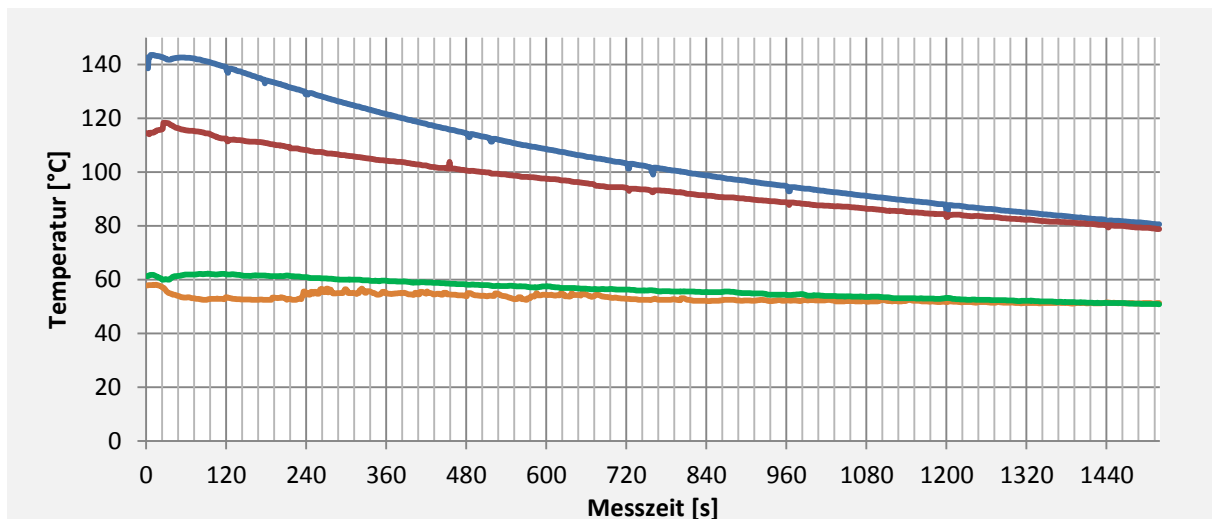


Abbildung 19 – Abkühlung bei Ventilationsstufe 2 (schwache Ventilation) und 0 A Motorstrom (blau Wendepolwicklung, rot Kollektor, orange Maschinenraum, grün Erregerwicklung)

2.2.3 Auswertung

Die Auswertung der Messungen hat das Ziel die Funktionen für die in Abschnitt 2.1 beschriebene Aufwärmung zu berechnen.

Die konstanten Rahmenbedingungen im Vereinatunnel vereinfachten die Auswertung, da potentielle Fehler durch schwankende Umgebungsbedingungen nicht vorhanden waren. So konnte zuerst anhand der Ventilationsstufe, Kühllufttemperatur und Lokkastentemperatur die Abkühlfunktionen ermittelt werden.

Anschliessend wurde aus den Aufwärmungskurven die Abkühlung herausgerechnet, sodass aus diesen Kurven in Abhängigkeit des Stroms und der Motortemperatur die Aufwärmfunktionen bestimmt werden konnten.

3 Die praktische Umsetzung & Validierung

Nachdem in Kapitel 2 die Grundlagen für die Temperaturberechnung ermittelt wurden, soll hier auf die praktische Umsetzung und Validierung eingegangen werden.

Hierzu wird zuerst das Steuerungskonzept in Abschnitt 3.1 erörtert. Anschliessend wird in Abschnitt 3.2 (ab Seite 24) die hardwaremässige Implementierung in der Lok aufgezeigt.

3.1 Steuerungskonzept

Die Ventilationssteuerung und Ventilationsstufenanforderung kann in drei miteinander agierende Teile aufgeteilt werden:

- Zum einen wird die Motortemperatur, wie in Kapitel 2.1 (siehe Seite 17) beschrieben, berechnet (siehe orange dargestellter Bereich in Abbildung 20).
- Weiter werden die Trafo, Stromrichter und Maschinenraum-Temperaturen gemessen (siehe blau dargestellter Bereich in Abbildung 20).
- Anhand dieser berechneten und gemessenen Temperaturen wird im dritten Teil (siehe grau dargestellter Bereich in Abbildung 20) die Verarbeitung durchgeführt.

Die Verarbeitung basiert auf Parametern, welche spezifisch für jede Komponente (Motor, Trafo, Stromrichter, Maschinenraum) entsprechend der Temperatur die entsprechende Ventilationsstufe anfordern. Bei der Superposition der einzelnen Ventilationsstufenanforderungen zählt grundsätzlich das Maximalprinzip, sodass die höchste Anforderung genommen wird. Dadurch kann ein Überhitzen der entsprechenden Komponenten verhindert werden.

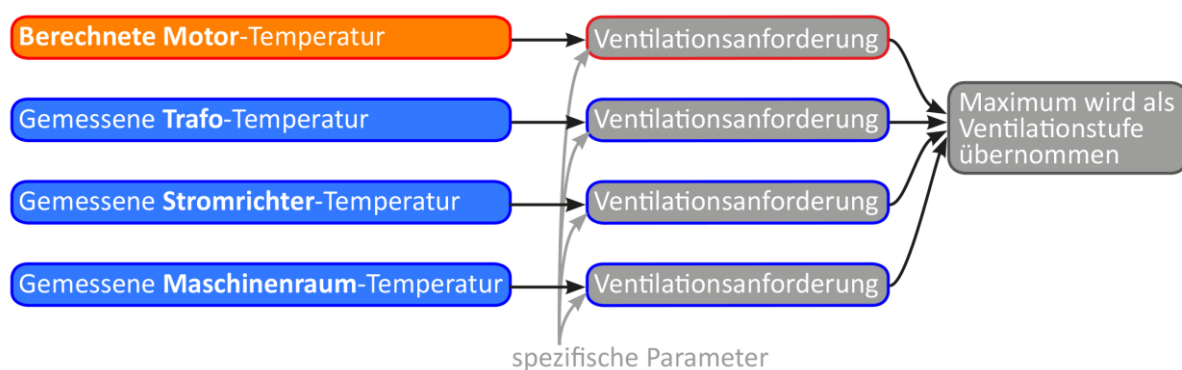


Abbildung 20 – Aufbau des Steuerungskonzepts, welches anhand der Temperaturen die Ventilationsstufe festlegt

3.2 Implementierung in der Lok

Die Implementierung der Ventilationssteuerungssoftware wird in Abschnitt 3.2.1 kurz beschreiben und wurde auf einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) realisiert. Den benötigten Eingangssignalen zur Temperaturmessung widmet sich der Abschnitt 3.2.2 (ab Seite 25). Der Abschnitt 3.2.3 (ab Seite 27) erläutert in seinen Unterabschnitten die Struktur und auszugsweise Programmteile der Software. In Abschnitt 3.2.4 (ab Seite 30) wird kurz beschrieben, dass die Inbetriebsetzung dank eines Parallelsystems erheblich vereinfacht und beschleunigt werden konnte.

3.2.1 Speicherprogrammierbare Steuerung

Durch die effiziente Temperaturberechnung benötigt die Ventilationssteuerungssoftware relativ wenig Rechenleistung. Dadurch zeigte sich, während des Projektes, dass es möglich ist, die gesamte Ventilationssteuerungssoftware in die SPS (Speicherprogrammierbare Steuerung) in eine bestehende Steuerung zu integrieren (Abbildung 21). Hierzu musste die bestehende SPS lediglich um zusätzliche Module für die Signal-Ein- und Ausgänge erweitert werden³.



Abbildung 21 – Ansicht der Speicherprogrammierbaren Steuerung, welche die Ventilationssteuerungssoftware ausführt und dafür erweitert wurde (Foto: M.Nold)

Softwaremässig handelt es sich aber bei der Ventilationssteuerungssoftware jedoch um ein separates Softwaremodul, welches sequentiell gekapselt zur bestehenden Dualbremssoftware auf der SPS ausgeführt wird.

Durch diese Integrierung ergeben sich die folgenden Vor- und Nachteile (siehe Tabelle 4):

³ Das Fahrzeug verfügt über 4 Speicherprogrammierbare Steuerungen. Es gibt 2 SPS älterer Generationen, welche nicht mehr anpassbar sind und es gibt 2 SPS von Selectron, die neuer sind und modifiziert und erweitert werden können.

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> - Der Umbauaufwand und die Kosten sind deutlich geringer, da auf die bestehende SPS aufgebaut werden kann. Dadurch ist der Umbau für bestehende Fahrzeuge deutlich attraktiver. - Bei einer Softwareinstallation und Inbetriebsetzung muss nur einmal die SPS neu installiert werden, da immer die gesamte Software als Gesamtpaket/Release installiert wird. 	<ul style="list-style-type: none"> - Durch den Aspekt, dass die Software immer als Gesamtpaket/Release installiert wird, ist die Vorgehensweise bei Anpassungen nicht so flexibel, da stets eine Koordination der verschiedenen Zuständigkeitsbereiche bzw. Programmierer erforderlich ist.

Tabelle 4 - Vor- und Nachteile der Integration der Ventilationssteuerungssoftware auf eine bestehende SPS

3.2.2 Signale und deren Einbindung

Für die Ventilationsteuerung werden einmal Temperatursignale gemessen (siehe Abschnitt 3.2.2.1) und zum anderen bekannte Signale der bestehenden Fahrzeugsteuerung eingelesen (siehe Abschnitt 3.2.2.2).

3.2.2.1 Temperaturen

Die Motortemperatur wird berechnet, da eine Messung in den Motoren wie in Abschnitt 1.5 (auf Seite 15) beschrieben, nicht zielführend ist.

Die Temperaturmessung der Komponenten innerhalb der Lok ist jedoch zielführend und einfach zu realisieren. Hierzu stellt die Abbildung 22 eine Übersicht des Kühlsystems auf der Ge 4/4 II dar. Daraus wird deutlich, dass die für die gesamte Kühlung zwei Ventilatoren verwendet werden. Jeder dieser Ventilatoren kühlt ein Drehgestell und gleichzeitig das Trafoöl, das Stromrichteröl. Zusätzlich findet durch die Ventilation ein geringer Luftaustausch im Maschinenraum statt. Eine separate Kühlung dieser Komponenten wäre grundsätzlich aus energieoptimierenden Aspekten sinnvoller. Technisch wäre diese jedoch hinsichtlich des Bauraums und Aufwands bei diesen Altfahrzeugen kaum realisierbar.

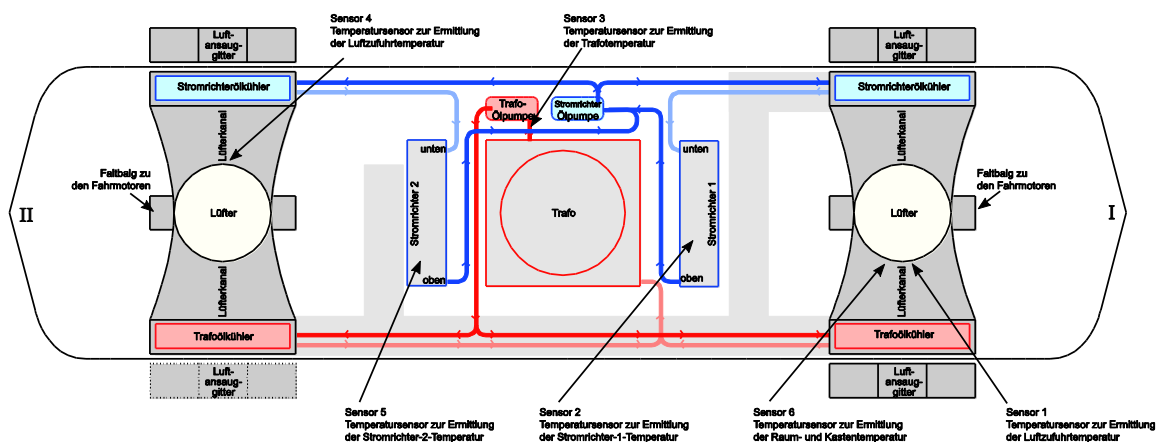


Abbildung 22 – Ansicht des Kühlluftsystems auf der Ge 4/4 II und der Sensorpositionen für die Ventilationssteuerung (Skizze: M.Nold)

Die Temperatursensoren zur Messung der Umgebungs- bzw. Kühlluft befinden sich direkt im Lüftungsschacht. Die Stromrichtertemperatur wird direkt an jedem Stromrichter gemessen. Dabei wurden die Sensoren bewusst an der wärmeren Seite und nicht am Öleingang angebracht. Bei der Messung der Trafotemperatur wurde genauso gehandelt, damit nicht versehentlich eine zu tiefe Temperatur gemessen wird.

Die Maschinenraumtemperatur wird bewusst an einem Aluminiumbauteil gemessen, dessen Temperatur der Maschinenraumlufttemperatur, wie Vergleichsmessungen gezeigt haben, sehr nahe kommt.

Ausgeführt wurden alle Temperaturmessungen mit PT1000 Sensoren, welche nach dem 3-Leiterprinzip angeschlossen wurden um die Messgenauigkeit zu erhöhen.

3.2.2.2 Einführung von Leittechnikdaten

Um eine aufwendige Messung fahrzeugspezifischer Daten, wie bspw. des Fahrmotorstroms zu vermeiden, wurden die Daten aus der bestehenden Leittechnik einbezogen. Die Ge 4/4 II verfügt jedoch nur über eine digitale Leittechnik älterer Generation zur Fahrzeugsteuerung, dessen Herstellersupport mittlerweile eingeschränkt wurde, sodass Modifikationen der Leittechnik nicht mehr möglich sind.

Diese Fahrzeugsteuerung gibt diverse fahrzeugspezifischen Daten als analoge -10 Volt bis + 10 Volt Spannungssignale aus. Diese Spannungssignale dienen den analogen Anzeigeinstrumenten im Führerraum. Für die hier notwendige Anwendung wurden diese galvanisch getrennt, in die Leittechnik der Ventilationsteuerung eingelesen. Dabei ist bspw. die Genauigkeit des Motorstroms, dessen Skala bis 950 Ampere geht, hiermit auf ± 10 Ampere genau und somit hinreichend.

Grundsätzlich ist dies technisch nicht die eleganteste Variante, Daten auf diese Art einzubeziehen. Sie ist jedoch zielführend und verdeutlicht, dass es pragmatische Wege gibt, so eine Ventilationsteuerung effizient und günstig in Bestandsfahrzeuge zu implementieren.

3.2.2.3 Verzicht auf Sensoren zur Luftdruckmessung

Die Kühlwirkung ist unter anderem von der Kühlluftmasse abhängig. Bei einer konstanten Ventilation hängt diese wiederum von dem Luftdruck ab, der sich jedoch mit der Höhenlage ändert. Es ist erforderlich in höhergelegenen Gebieten stärker zu ventilieren um die notwendige Kühlung zu erhalten.

Auf der anderen Seite muss der Luftdruck gemessen werden. Die dafür benötigten Sensoren müssen eine hohe Genauigkeit und Zuverlässigkeit aufweisen und in regelmässigen Abständen kalibriert werden. Mögliche Sensorfehler müssen in einer Fehlerrechnung berücksichtigt werden. Dabei müssen konservative Annahmen getroffen werden um bei einem Sensorfehler nicht zu wenig zu ventilieren und Überhitzungen zu verursachen.

Des Weiteren entstehen durch die Sensorausfälle und das Kalibrieren zusätzliche Aufwände, welche die neue Steuerung für den Unterhalt unattraktiv machen.

Letztendlich wurde daher auf eine kontinuierliche Messung des Luftdrucks verzichtet und mit einem Luftdruck welche, circa 1400 Meter Meereshöhe entspricht, gerechnet um das System robust und einfach unterhaltbar zu gestalten.

Bedingt durch eine Aufwandsreduktion, wurde auch darauf verzichtet mittels GPS Sensoren und einer Streckenkarte Rückschlüsse zur Höhe und des Luftdrucks zu machen.

3.2.3 Software

Die Programmierung der Ventilationsteuerung wurde direkt durch den Entwickler durchgeführt, sodass dadurch eine effiziente Implementierung ohne personelle Schnittstellen realisiert werden konnte. Um die Softwarewartung für Werkstattmitarbeiter und zukünftige Programmierer zu vereinfachen wurde die Programmierung mit einer VPL (= visual programming language -> visuellen Programmiersprache) erstellt.

Die Software strukturiert sich in 32 Blöcke, die jeweils wieder Unterfunktionen mit weiteren Blöcken beinhalten können. Im Folgenden wird die Software daher nur auszugsweise mit einzelnen Beispielen beschrieben. Hierbei wird zuerst auf die Strukturierung eingegangen (siehe Abschnitt 3.2.3.1). Darauf wird kurz erläutert wie das Steuerungskonzept implementiert wurde (siehe Abschnitt 3.2.3.2), sodass letztendlich noch ein Beispiel zur Umsetzung der Temperatursteuerung gebracht wird (siehe Abschnitt 3.2.2.3 auf Seite 26).

3.2.3.1 Strukturierung

Die folgende Gliederung beschreibt den Aufbau und die Struktur der Ventilationssteuerungssoftware:

- Initialteil
 - o Einlesen der Signaleingänge
 - o Diverse Kontrollen ob die Eingangsdaten plausibel sind, um zu erkennen, ob das Programm normal ausgeführt werden oder ob alternativ notwendige Massnahmen getroffen werden müssen (Fehlermeldungen, Ersatzwerte, Zwangsventilation)
 - o Erkennen und verhindern von Zahlenraum- und Datums-Problemen, sodass das Programm stabil arbeiten kann (erst ab dem Datum/Jahr 2105 ist ein Variablenüberlauf ähnlich dem Millennium Problem möglich)
 - o Speicherverlusttests
- Motortemperaturberechnung
- Steuerung
 - o Erfassung von Zeitgrössen für die Steuerung (bspw. Stillstandszeiten zur automatischen Reduktion im Bahnhof oder auf Abstellanlagen)
 - o Ermittlung der Temperaturanforderung, der einzelnen Komponenten (Motortemperatur, Stromrichtertemperatur, etc.)
 - o Superposition der angeforderten Ventilationsstufen
 - o Stufenwahl
- Störungs- und Diagnoseaufbereitung

Die notwendigen Variablen werden gespeichert und stehen je nach Kategorie entweder bei der nächsten Ausführung oder auch dauerhaft nach einer Stromunterbrechung zur Verfügung.

3.2.3.2 Umsetzung des Steuerungskonzeptes und zusätzlicher Sicherheitssysteme

Die Abbildung 23 verdeutlicht die Superposition der Signale, wie sie in Abschnitt 3.1 (siehe Seite 23) beschrieben wurde. Zum einen wird deutlich, dass eine Maximalfunktion die Werte zusammenfasst.

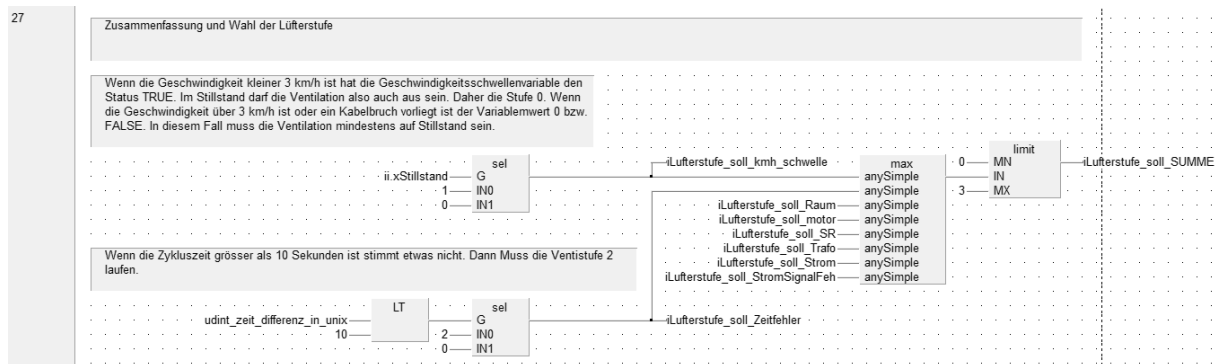


Abbildung 23 – Softwareauszug – Die Wahl der Ventilationsstufe erfolgt nach dem Maximalprinzip der einzelnen Anforderungen

Zusätzlich wird deutlich, dass auch Sicherheitsfunktionen eingebaut wurden.

Beispielsweise wird immer während der Fahrt - also wenn die 3 km/h Schwelle überschritten worden ist – mit mindestens der Ventilationsstufe 1 ventiliert. Diese Funktion wurde bei der manuellen Ventilation durch Relais implementiert um einen Totschaden zu verhindern, wenn der Lokführer einige Zeit versehentlich vergisst zu ventilieren.

In der neuen Software wurde diese Funktion beibehalten. Der Grund ergibt sich daher, dass der Motorstrom bei komplett deaktivierter Ventilation schnell zu deutlichen Motorerwärmungen führen kann. Gleichzeitig braucht Kabelbruchererkennung jedoch Zeit, da der Motorstrom, wie im Abschnitt 3.2.2.2 (siehe Seite 26) beschrieben als 0 bis 10 Volt Signal übertragen wird. Denn daher kann die Kabelbruchererkennung (siehe Abbildung 24) nur nach dem Prinzip arbeiten, dass es nicht plausibel ist, wenn das Fahrzeug eine gewisse Zeit fährt und gleichzeitig kein Motorstrom für das Fahren oder Bremsen vorhanden ist.

Da sowieso fast immer während der Fahrt mindestens Stufe 1 angefordert wird, ist die Verknüpfung mit der 3 km/h Schwelle eine sinnvolle Variante, um einen Motorschaden zu verhindern, bis der Stromsignalfehler erkannt wurde und dementsprechende Massnahmen ergriffen werden können.

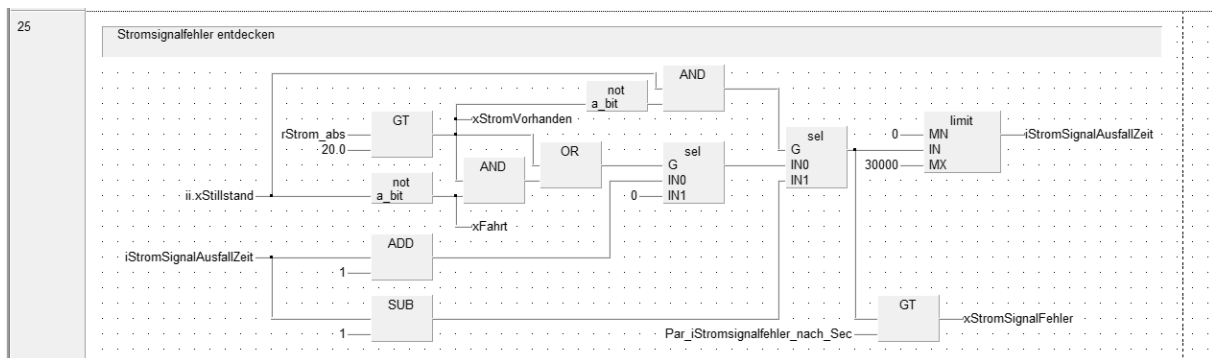


Abbildung 24 – Softwareauszug – Kabelbrucherkennung für den Motorstrom

Ein weiteres Sicherheitssystem, welches in Abbildung 23 zu sehen ist, schlägt bei Rechnerüberlastung Alarm und fordert eine Ventilation an. Die Rechnerüberlastung wird anhand der Differenzzeit zwischen der aktuellen Ausführung und der vorigen Ausführung ermittelt.

Zusätzlich sind natürlich an vielen anderen Stellen der Software ähnliche Sicherheitssysteme implementiert worden um einen stabilen zuverlässigen und sicheren Betrieb zu ermöglichen.

Um zu verhindern, dass die Überlagerung unterschiedlicher Anforderungen ein ständiges Hoch- und Runterschalten stattfindet, wurde diesem Softwareblock eine zeitliche Glättung nachgeschaltet.

3.2.3.3 Umsetzung der Temperatursteuerung anhand des Beispiels des Stromrichters

Die Abbildung 25 zeigt ein Beispiel für die Temperatursteuerung, wie sie in ähnlicher Form mehrfach innerhalb des Programms implementiert wurde.

Als Eingangsgröße wird hier auf die entsprechende Temperatur zurückgegriffen. Grundsätzlich zählt hierbei die wärmste Temperatur. Wenn ein Sensor defekt ist wird dieser genullt, sodass nur noch die Temperatur des intakten Sensors verwendet wird. Dieses Prinzip wird angewandt um zu verhindern, dass bspw. ein Sensor mit einem Wackelkontakt die Regelung durcheinander bringt. Wenn der unwahrscheinliche Fall eintritt, dass beide Sensoren gleichzeitig defekt sein sollten, wird vorsichtshalber mit vorgegebener Stufe stärker ventiliert um eine Überhitzung zu verhindern. Zusätzlich wird schon bei einem fehlerhaften Sensor eine Meldung gemacht.

In der normalen Betriebssituation findet eine Stufenauswahl mit oberen und unteren Schwellen statt. Diese Auswahl wurde in den Funktionsblock FB_XV_StufenSetReset programmiert. Die Aufgabe dieses Funktionsblocks ist es, beim Überschreiten einer Temperatur T_1 die Ventilation zu erhöhen, und sie erst beim Unterschreiten einer Temperatur $T_2 < T_1$ zu reduzieren um ein ständiges Hoch- und Runterschalten zu verhindern, wenn sich die Temperatur gerade im Bereich der Schaltschwelle befindet.

Weiter wird in der Abbildung 25, zwischen dem Fahrbetrieb und dem Stillstand unterschieden. Dies ist grundsätzlich erforderlich um im Bahnhof weniger zu ventilieren. Zum einen wird im Stillstand üblicherweise kein Strom bezogen, sodass die Ventilationsstufe reduziert werden kann. Zum anderen verursacht die Ventilation auch Lärm und dieser soll im Bahnhof oder bei Abstellanlagen gering gehalten werden um keine Reklamation hinsichtlich der Ruhestörung zu erhalten.

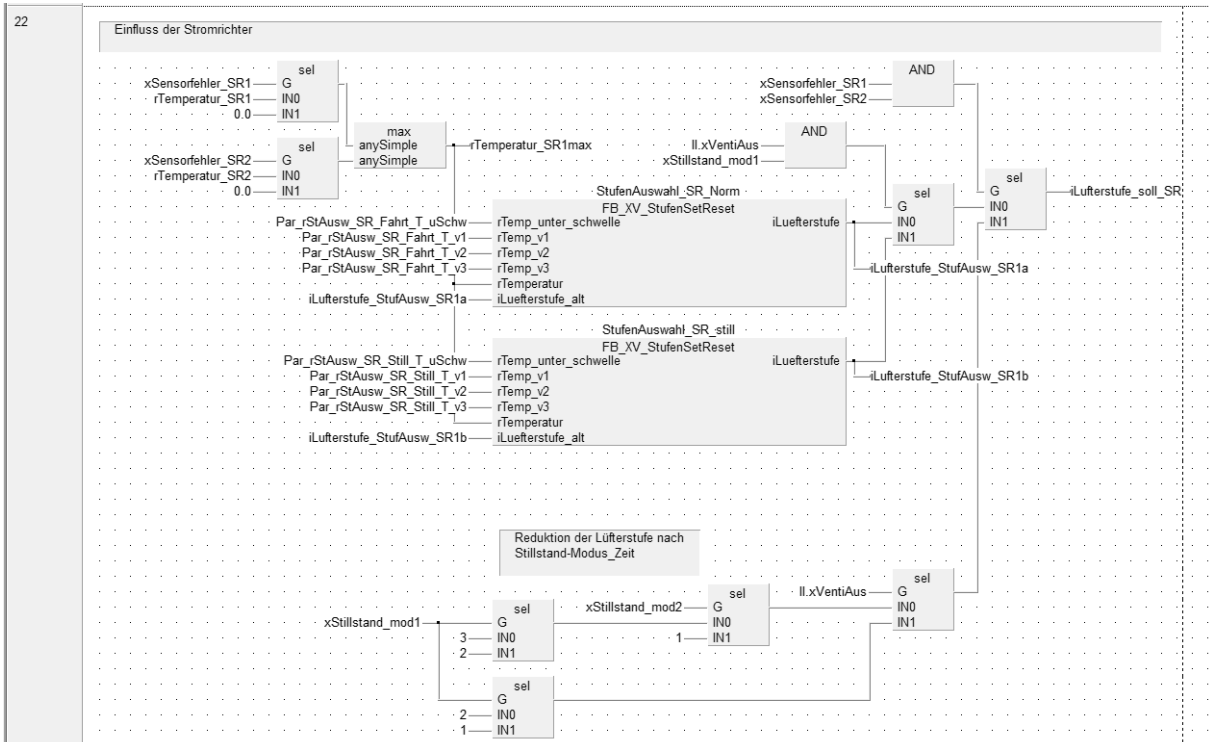


Abbildung 25 – Softwareauszug – Temperatursteuerung für die Stromrichter

3.2.4 Inbetriebsetzung und Optimierung

Für die Inbetriebsetzung und Validierung der Ventilationsteuerungssoftware wurde ein Parallelsystem aufgebaut. Dieses System dient dazu Tests auf normalen Fahrplanzügen durchzuführen und die Ventilationsteuerung unter realistischen Betriebsbedingungen zu optimieren.

Hierzu wurde eine speicherprogrammierbare Steuerung, die identisch der verbauten Version ist, auf einem mobilen tragbaren Rahmen installiert und auf die Lok mitgenommen. Die Signaleingänge der SPS wurden galvanisch getrennt, an die Lok angeschlossen um die aktuellen Daten zu erhalten. Ausgänge wurden jedoch keine an die Lok angeschlossen, sodass die SPS keinen Einfluss auf die Lok hatte. Die Ventilationsstufenwahl erfolgt von Hand über den Bedienschalter (Abbildung 3 Seite 9) anhand der berechneten Daten des Parallelsystems.

Durch dieses Parallelsystem, war es möglich, ohne die verschiedenen Varianten unter betriebsnahen Bedingungen, die Software auszuprobieren und anzupassen, sowie teure Inbetriebsetzungsfahrten zu vermeiden.

4 Validierung

Im Rahmen der Inbetriebnahme der Ventilationssteuerung wurde eine Validierung der Temperaturberechnung durchgeführt. Hierzu wurde bei der Prototypenlok die Betriebstemperatur in den Motoren gemessen und diese mit der berechneten Temperatur verglichen. Dabei kam es zu dem in Abbildung 26 dargestellten Ergebnis.

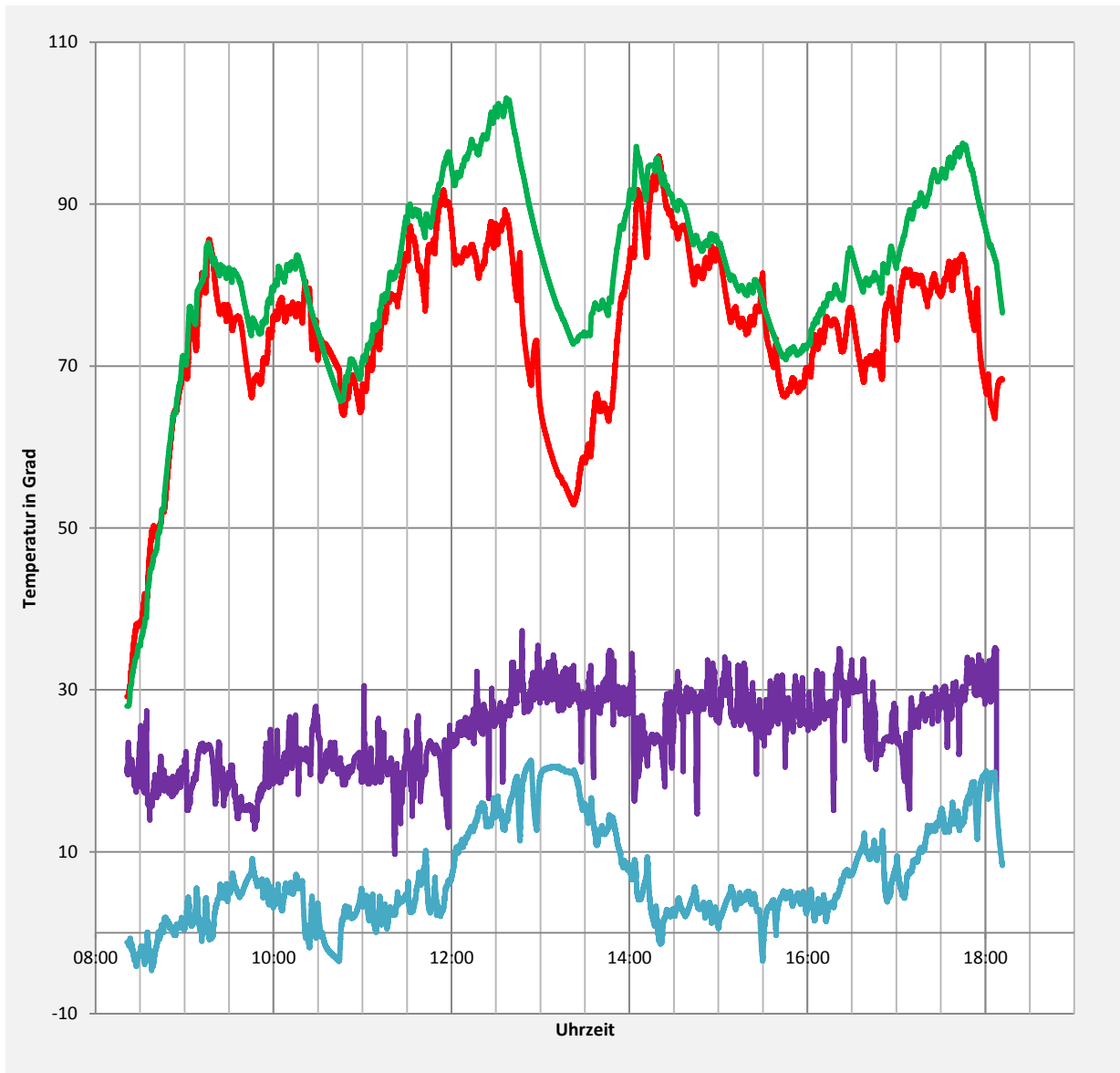


Abbildung 26 – Validierungsmessung des Motortemperaturberechnungsalgorithmus der Ventilationssteuerung (rote Linie: Messung der max. Motortemperatur | grüne Linie: berechnete Temperatur anhand des Motortemperaturberechnungsalgorithmus | violette Linie: gemessene Aussentemperatur | blaue Linie: Differenz zwischen der berechneten und gemessenen Temperatur)

Aus der Abbildung 26 wird deutlich, dass die berechnete Temperatur der gemessenen Temperatur relativ ähnlich ist. Abweichungen entstehen, wenn sich das Fahrzeug in einer geringeren Höhe befindet, dass durch den zunehmenden Druck Kühlung steigt. Nur mit dem Einsatz von Luftdrucksensoren oder mit einer Höhenbestimmung lässt sich diese Abweichung, welche schon in Abschnitt 3.2.2.3 (ab Seite 26) erörtert wurde, reduzieren.

5 Effizienzsteigerung & Energiekostenreduktion

Dieses Kapitel betrachtet die Energieersparnis mit dem ökonomischen Teil. Hierzu wird zuerst auf die Effizienz und den Wirkungsgrad der Abkühlung eingegangen (siehe Abschnitt 5.1). Anschliessend wird die Energieersparnis erörtert (siehe Abschnitt 5.2), sodass abschliessend die Energiekostenreduktion dargelegt werden kann (siehe Abschnitt 5.3).

5.1 Effizienz & Wirkungsgrad

Eine der sinnvollsten Methoden Energie zu sparen ist eine Optimierung des Wirkungsgrades. Im Folgenden wurden hierzu zwei Einflüsse betrachtet, welche den Wirkungsgrad des Systems erhöhen.

Bei dem ersten handelt es sich um den Abkühlfaktor (siehe Abschnitt 5.1.1). Die zweite hier genutzte Variante ergibt sich aus der Temperaturabhängigkeit bei der Wärmeübertragung und wird in Abschnitt 5.1.2 beschrieben.

5.1.1 Abkühlfaktor

Im Rahmen der mathematischen Modellbildung wurden Abkühlfaktoren ermittelt. Diese Abkühlfaktoren skalieren die Abkühlung der jeweiligen Ventilationsstufe. Dabei nehmen sie mit zunehmender Ventilationsstufe zu.

Ein Vergleich des Energieverbrauchs mit dem Abkühlfaktor zeigt jedoch, dass der Energieverbrauch mit zunehmender Ventilationsstufe stärker zunimmt als der Abkühlfaktor.

Aus dem Verhältnis zwischen dem Energieverbrauch und dem Abkühlfaktor lässt sich ein normierter Wirkungsgrad berechnen. Dieser Wirkungsgrad beschreibt in Relation zur Ventilationsstufe 1 wie effizient die Stufe 2 und Stufe 3 ist. Daraus wird deutlich, dass aus 1 kW Energie bei einer höheren Ventilationsstufe weniger Abkühlung erreicht werden kann, also der Wirkungsgrad mit zunehmender Ventilationsstufe schlechter wird.

Name der Stufe	Energieverbrauch	Normierter Abkühlfaktor	Normierter Wirkungsgrad
Stufe 1 (Stillstand)	2 mal 3.0 kW	3.0	1.00
Stufe 2 (Schwach)	2 mal 5.5 kW	4.7	0.85
Stufe 3 (Stark)	2 mal 8.5 kW	7.0	0.82

Tabelle 5 – Energieverbrauch, Abkühlung und normierter Wirkungsgrad der einzelnen Ventilationsstufen

Dies bedeutet, dass bei einer geringeren Ventilation nicht nur der Energieverbrauch geringer wird, sondern auch noch der Wirkungsgrad bzw. das Kosten-Nutzen-Verhältnis.

5.1.2 Temperaturabhängigkeit der Wärmeübertragung

Von der Konsumation eines Heissgetränks ist es wohl jedem bekannt, dass dieses eine unterschiedliche temperaturabhängige Abkühlgeschwindigkeit hat. Wenn das Getränk noch sehr

heiss ist, kühlt es sehr schneller ab. Wenn es schon kälter ist, ist auch die Abkühlgeschwindigkeit geringer.

Dies liegt an dem physikalischen Zusammenhang, dass der Wärmestrom proportional zum Temperaturgradienten ist [3][4][5]. Dies bedeutet, im hier angewandten Fall, dass doppelt so viel Wärme von einem Motor abgeführt wird, wenn die Temperaturdifferenz zwischen der Motortemperatur und Kühlluft doppelt so hoch ist. Daher wird bei einer geringeren Ventilationsstufe der gleiche Wärmestrom, wie bei einer höheren Temperatur abgeführt.

Die Abbildung 27 veranschaulicht für diesen Aspekt eine Beispielsimulation für eine Stunde. Dabei wird veranschaulicht, dass bei gleicher Wärmezufuhr und unterschiedlicher Ventilationsstufe jeweils die Gleichgewichtstemperatur erreicht wird.

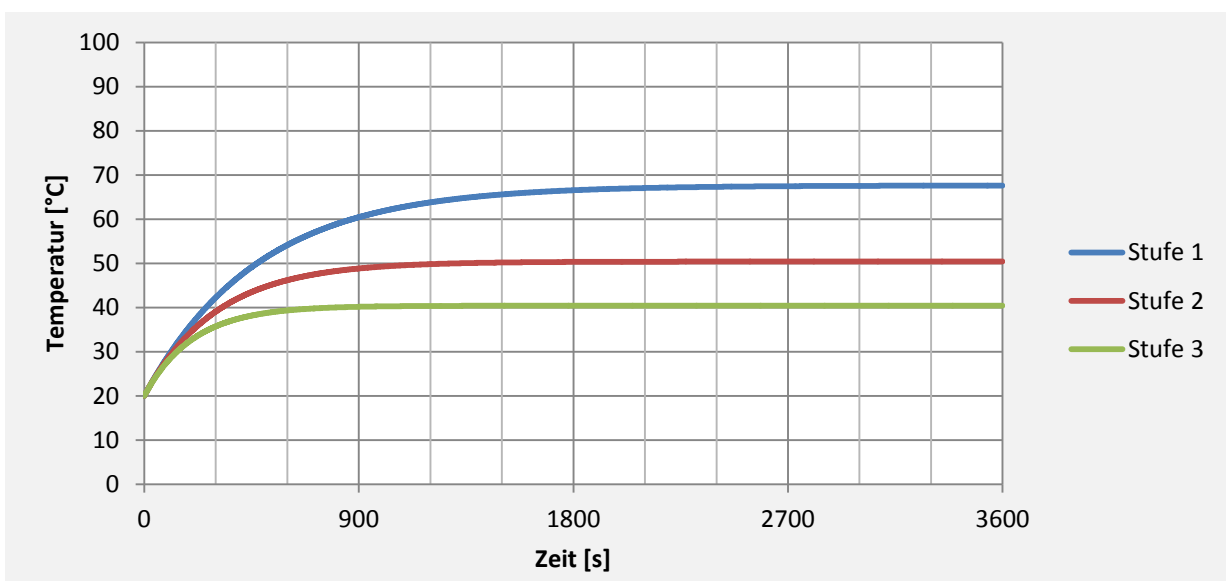


Abbildung 27 – Beispielsimulation der sich ergebenden Motortemperatur bei konstanter Wärmezufuhr und dem Einsatz verschiedener Ventilationsstufen

Beim Erreichen der Gleichgewichtstemperatur wird mit jeder Ventilationsstufe genauso viel Wärme abgeführt wie in diesem jeweiligen Moment zugeführt wird. Dadurch wird deutlich, dass bei Ventilationsstufe 1 mit nur 6 kW (2 mal 3 kW) genauso viel abgeführt wird, wie bei Ventilationsstufe 3 mit 19 kW (2 mal 8.5 kW). Der einzige Unterschied besteht darin, dass die Temperaturdifferenz zwischen der Kühlluft gegenüber der Motortemperatur grösser ist. Solange sich aber die höhere Motortemperatur im normalen Betriebsbereich bewegt, ist dies kein Problem.

Durch die Ausnutzung dieser physikalischen Gesetzmässigkeit kann der Energieverbrauch bzw. Wirkungsgrad des Systems deutlich verbessert werden. So würden in obigem Fall alleine in dieser einen Stunde 13 kW gespart werden, was einer Ersparnis von über 68 % entspricht.

Ein weiterer vorteilhafter physikalischer Zusammenhang ergibt sich aus der Wärmestrahlung. Nach dem Stefan-Boltzmann'schen Gesetz nimmt die abgestrahlte Wärmeleistung mit T^4 zu [3]. Das bedeutet, dass mit zunehmender Temperatur zusätzlich zur stoffbasierten Wärmübertragung weitere Wärme an die Umgebung abgestrahlt wird ohne zu ventilieren.

5.2 Energieersparnis

Die Energieersparnis setzt sich aus zwei Teilen zusammen. Zum einen wird während der Fahrt weniger stark ventiliert. Dies wird in Abschnitt 5.2.1 beschrieben. Weiter ergibt sich durch die Ventilationssteuerung auch noch die Möglichkeit auf dem Abstellgleis Energie zu sparen (siehe Abschnitt 5.2.2 ab Seite 35).

5.2.1 Während der Fahrt

Der Vergleich zwischen der Abbildung 28 und Abbildung 29 verdeutlicht, den Unterschied durch den Betrieb mit der hier beschriebenen Ventilationssteuerung gegenüber dem manuellen Betrieb. Dabei wird deutlich, dass der Anteil der starken Ventilation (Stufe 3) deutlich zurückgeht und dafür der Anteil in der schwachen (Stufe 2) und Stillstandventilation (Stufe 1) zunimmt.

Abbildung 30 zeigt den Energieverbrauch für die drei Szenarien:

- ursprünglich → Manueller Ventilationsbetrieb (mittlerer Wert, der hochgerechnet wurde)
- geplant → Annahme vor Projektbeginn
- erreicht → Erreichter Energieverbrauch, welcher im Rahmen der Inbetriebsetzungsphase gemessen und hochgerechnet wurde.

Aus Abbildung 30 wird deutlich, dass die geplante Energieverbrauchsreduktion übertroffen wurde.

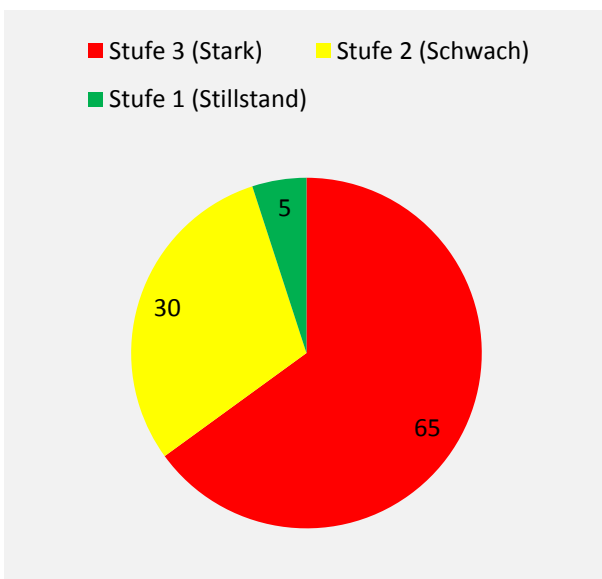


Abbildung 28 – Mittleres Ventilationsverhältnis bei manueller Bedienung durch den Lokführer.

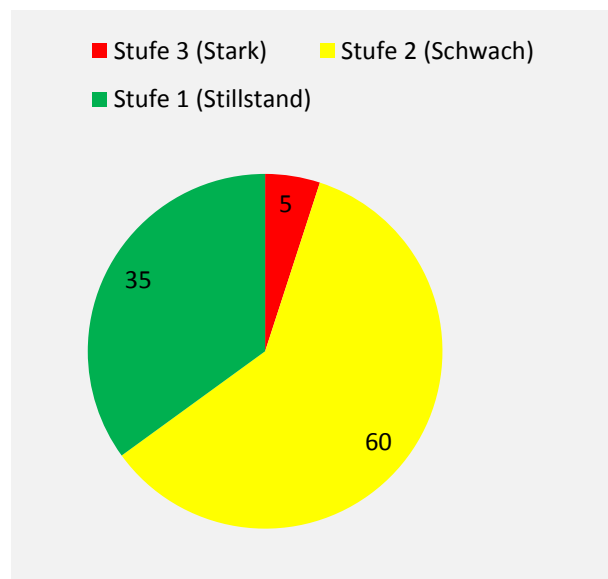


Abbildung 29 – Mittleres Ventilationsverhältnis, welches im Rahmen der Inbetriebsetzung mit der neuen Ventilationssteuerung erreicht wurde.

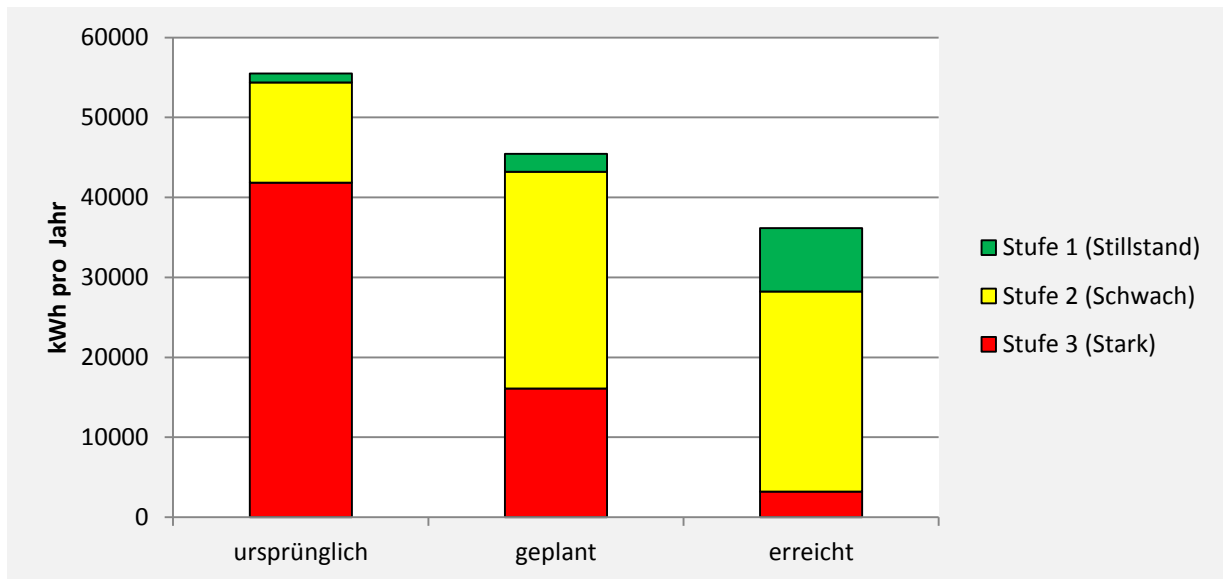


Abbildung 30 – Energieverbrauch durch die jeweilige Ventilationsstufe und die sich daraus ergebende Summe bei 320 Betriebstagen im Jahr.

5.2.2 Zusatzerparnis auf dem Abstellgleis

Bedingt durch den Betrieb mit den neuen Albulagliederzügen, welche durch ihren Energieverbrauch den Trafo der Ge 4/4 II erwärmen muss, kann neuerdings auch auf dem Abstellgleis ventiliert werden (siehe Abschnitt 1.3.5 auf Seite 13).

Eine manuelle Ventilation ist nicht bedarfsgerecht und ventiliert konstant durch, obwohl nach ersten Untersuchungen nur ungefähr 10 % ventiliert werden muss. Dadurch können pro Lok, welche mit einem Albulagliederzug abgestellt ist, an einem Tag 65 kWh an Energie gespart werden.

Hochrechnungen auf ein Jahr sind hier nicht sauber machbar, da das Betriebskonzept bzw. das Traktionskonzept der Albulagliederzüge noch nicht abschliessend geklärt ist. Die Zahlen bewegen sich daher pro Ge 4/4 II mit AGZ bei circa 20800 kWh pro Jahr.

5.3 Energiekostenreduktion

Durch die automatische Ventilationssteuerung gibt es zwei Einsatzgebiete in denen Energie gespart wird. Beim ersten handelt es sich um die Fahrt. Und wird in Abschnitt 5.3.1 beschrieben.

Zusätzlich ergab sich durch den Einsatz des AGZ ein weiterer Vorteil für die Ventilationssteuerung und zwar in Form einer bedarfsgerechten Ventilation auf dem Abstellgleis (siehe Abschnitt 5.3.2).

In beiden Fällen wird im Folgenden die Energiekostenberechnung basieret auf einem Preis von 0.11 CHF pro Kilowattstunde durchgeführt. Dieser Preis entspricht dem momentanen Stromkostenpreis der RhB.

5.3.1 Während der Fahrt

Die Tabelle 6 beschreibt die Energiesummen, Energiekosten, Energieersparnis und Kostenersparnis für eine Lokomotive der Serie Ge 4/4 II. Hierbei werden einmal die ursprünglichen Werte dargelegt. Anschliessend wird das geplante Minimum gezeigt und letztendlich der erreichte Wert. Dabei basieren alle Werte auf Messungen, welche auf ein Jahr hochgerechnet wurden.

Pro Lok und Jahr	ursprünglich	geplantes Minium	erreicht
Anteil Stufe 3 (Stark) in kWh	41862 kWh	16101 kWh	3220 kWh
Anteil Stufe 2 (Schwach) in kWh	12502 kWh	27087 kWh	25004 kWh
Anteil Stufe 1 (Stillstand) in kWh	1137 kWh	2273 kWh	7956 kWh
Summe in kWh	55501 kWh	45461 kWh	36180 kWh
Summe in CHF	6105 CHF	5001 CHF	398 CHF 0
Ersparnis in kWh		10'040 kWh	19'321 kWh
Ersparnis in CHF		1'104 CHF	2'125 CHF

Tabelle 6 – Energiesumme, Energiekosten, Energieersparnis und Kostenersparnis für eine Lokomotive der Ge 4/4 II Serie im Jahr

Die Tabelle 7 rechnet die Werte aus der Tabelle 6 auf die Flotte und Jahre hoch. Hierbei wird zuerst eine Lok betrachtet. Anschliessend wird die zweite und jüngere Serie der Ge 4/4 II gezeigt, diese befindet sich aktuell schon im Umbau. Weiter wird die gesamte Flotte der Ge 4/4 II mit ihren 23 Lokomotiven dargelegt.

Ersparnis bezogen auf die Serie	1 Jahr	10 Jahre	25 Jahre
Pro Lok	19'321 kWh	193'210 kWh	483'025 kWh
13 Lokomotiven	251'173 kWh	2'511'730 kWh	6'279'325 kWh
23 Lokomotiven	444'383 kWh	4'443'830 kWh	11'109'575 kWh
Pro Lok	2'125 CHF	21'253 CHF	53'133 CHF
13 Lokomotiven	27'629 CHF	276'290 CHF	690'726 CHF
23 Lokomotiven	48'882 CHF	488'821 CHF	1'222'053 CHF

Tabelle 7 –Ersparnis für eine Lokomotive, die zweite Ge 4/4 II Serie (13 Lokomotiven) die gesamte Ge 4/4 II Flotte (23 Lokomotiven) für 1 Jahr, 10 Jahre und 25 Jahre

5.3.2 Zusatzerparnis auf dem Abstellgleis

Für die Zusatzerparnis ist eine Berechnung nicht sauber machbar, da das zukünftige Einsatzkonzept noch nicht abschliessend definiert ist. Daher sind die folgenden Werte lediglich als möglicher grober Anhaltspunkt und Maximalwerte zu interpretieren.

Ersparnis bezogen auf den Einsatz der Ge 4/4 II mit dem Albulagliederzug (AGZ)	1 Jahr	10 Jahre	25 Jahre
1 AGZ	20'800 kWh	208'000 kWh	520'000 kWh
3 AGZ	62'400 kWh	624'000 kWh	1'560'000 kWh
6 AGZ	124'800 kWh	1'248'000 kWh	3'120'000 kWh
1 AGZ	2'288 CHF	22'880 CHF	57'200 CHF
3 AGZ	6'864 CHF	68'640 CHF	171'600 CHF
6 AGZ	13'728 CHF	137'280 CHF	343'200 CHF

Tabelle 8 – Ersparnis bezogen auf den Einsatz der Ge 4/4 II mit dem Albulagliederzug (AGZ) für 1 Jahr, 10 Jahre und 25 Jahre

6 Fazit / Conclusion

Grundsätzlich gibt es verschiedene Varianten Energie zu sparen. Die häufiger erwähnte Variante ist es den Verbrauch zu reduzieren indem etwas bzw. eine Leistung gedrosselt wird. Bei Schienenfahrzeugen wäre dies eine Geschwindigkeitsreduktion. Die damit verbundenen Fahrzeitverlängerungen und mögliche Kapazitätsreduktionen machen den öffentlichen Verkehr aber weniger attraktiv, sodass Fahrgäste auf den Individualverkehr umsteigen und gesamtschweizerisch die Energiebilanz verschlechtert.

Eine andere Methode Energie zu sparen besteht darin Triebfahrzeuge effizienter zu gestalten, indem die Wirkungsgrade erhöht werden. Dadurch wird der öffentliche Verkehr sogar attraktiver, weil er effizienter und kostengünstiger wird.

Im Bahnsystem gibt es hierbei noch sehr viele ungenutzte Möglichkeiten, die Wirkungsgrade zu verbessern und den Energieverbrauch zu reduzieren.

Eine dieser Varianten ist die hier im Entwicklungsprojekt beschriebene Optimierung der Ventilationssteuerung. Dabei konnte mit diesem Projekt vieles gezeigt werden.

- Es ist möglich auf Altfahrzeugen spürbare Mengen an Energie zu sparen (ca. 19'300 kWh pro Jahr und Lok was ca. 2100 CHF entspricht) und gleichzeitig die Lebenserwartung der Fahrmotoren dieser Fahrzeuge zu erhöhen. Dabei wird doppelt gespart und die Nachhaltigkeit erhöht indem nicht teuer in Neufahrzeuge investiert werden muss um Energie zu sparen und gleichzeitig Ressourcen und Energie gespart werden können, wenn auf Neufahrzeuge verzichtet wird.
- Es ist möglich ohne Motortemperatursensoren relativ genau und damit deutlich besser wie erwartet die Motortemperatur zu berechnen.
- Es ist möglich mit sehr einfachen und kostengünstigen Mitteln so ein Projekt erfolgreich umzusetzen.

Die Umbaukosten (ohne Entwicklungskosten) betragen pro Lok rund 10'000 CHF und ist somit nach 5 Jahren refinanziert. Nach 25 Jahren werden pro Lok ca. 480'000 kWh an Energie gespart. Das entspricht circa 53'000 CHF. Auf die Flotte hochgerechnet sind es über 11 Millionen Kilowattstunden und somit über 1.2 Millionen Schweizer Franken, was die Umbau- und Entwicklungskosten um ein Vielfaches übersteigt.

Alleine aus diesen Aspekten hat sich dieses Projekt schon ökonomisch und ökologisch rentiert.

Zusätzlich ergeben sich noch mögliche weitere Ersparnisse beim Einsatz mit dem Albulagliederzug von über 20'000 kWh pro AGZ und Jahr, wenn dieser mit einer Ge 4/4 II abgestellt wird. Das sind über 2200 CHF pro Jahr. Ob diese relevant sind hängt jedoch davon ab, wie viele AGZ Züge zukünftig mit der Ge 4/4 II betrieben werden.

Abschliessend ist zu reflektieren, dass diese Entwicklung erfolgreich durchgeführt werden konnte, den Entwicklungsstandort Schweiz erweitert hat und eine spürbare Energieersparnis zur Folge hatte.

Conclusion

There are several ways to save energy. It is often tried to save energy by throttling the power. For rail vehicles, this would be a speed reduction. But the associated travel time extensions and possible capacity reductions make public transport less attractive. The consequences are that passengers switch to individual transport. Through Switzerland, the energy balance deteriorates.

The other way to save energy is, to increase the energy efficiency form the traction vehicles. Thereby, the individual transport will be more attractive, because it will be more efficient and more economical.

In the railway system, there are still many unused opportunities to improve efficiencies and reduce energy consumption.

One of these variants is the optimization of the ventilation control, described here in the development project. Thereby, the project could be shown a lot:

- *On old vehicles, it's possible to save a lot of energy (approx.. 19'300 kWh per year and locomotive, which corresponds approx. CHF 2100). At the same time, the life expectancy of the traction motors can be increased. This saves twice. In addition, sustainability is increased, because it's not necessary to buy new vehicles for saving energy. This also saves resources.*
- *It is possible to calculate the engine temperature relatively accurately without motor temperature sensors. And this much better, as expected.*
- *It is possible to implement such a project successfully with very simple and cheap.*

After 5 years, the approx. 10'000 CHF construction costs (excluding development costs) per locomotive are refinanced. After 25 years, approx. 480'000 kWh of energy are saved per locomotive. This corresponds to around CHF 53'000. Extrapolated to the fleet, there are over 11 million kilowatt hours and thus more than 1.2 million Swiss francs. That exceeds the construction and development costs many times over.

Alone from these aspects, this project has already paid off economically and ecologically.

In addition, there are still possible further savings when used with the Albulagliederzug. More than 20'000 kWh can be saved per AGZ and year if it is parked with a Ge 4/4 II. That's over 2200 CHF per year. Whether these are relevant, however, depends on how many AGZ trains will be operated in future with the Ge 4/4 II.

Finally, the conclusion can be made that this development was a success, because a significant amount of energy and energy could be saved.

7 Verzeichnisse

7.1 Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 1 – Die Ge 4/4 II der Rhätischen Bahn mit einem Albulagliederzug im Fahrplanbetrieb (Foto: M.Nold)</i>	8
<i>Abbildung 2 – Übersicht des Führerraums und des Bedienpults (Foto: M.Nold)</i>	9
<i>Abbildung 3 – Schalter zur manuellen Bedienung der Ventilation (Foto: M.Nold)</i>	9
<i>Abbildung 4 – Übersicht des Energieverbrauches der einzelnen Ventilationsstufen</i>	10
<i>Abbildung 5 – Auszug aus einem Dienstplan für die Ge 4/4 II (Quelle: RhB)</i>	11
<i>Abbildung 6 – Mittleres Ventilationsverhältnis bei manueller Bedienung durch den Lokführer.</i>	12
<i>Abbildung 7 – Konservative Annahme für ein zukünftiges Ventilationsverhältnis.</i>	12
<i>Abbildung 8 – Erreichtes Ventilationsverhältnis der Prototypenlokomotive</i>	12
<i>Abbildung 9 – Durch einen Stromüberschlag geschädigter Motor einer Ge 4/4 III, welcher durch Kondenswasserbildung im Vereinatunnel entstanden ist (Foto: M.Nold)</i>	14
<i>Abbildung 10 – Aufbau des implementierten Fahrmotortemperaturberechnungsmodells</i>	17
<i>Abbildung 11 – Stator des Reihenschlussmotors der RhB Ge 4/4 II mit kolorierten Wicklungen. Rot sind die Wendepolwicklungen, grün sind die Wicklungen für die Serienfelderregung und die blauen Leitungen führen zu den Statorwicklungen (Foto & Montage: M.Nold)</i>	18
<i>Abbildung 12 – Stator des Reihenschlussmotors der RhB Ge 4/4 II mit kolorierten Wicklungen. Violett sind die Fremdfeldwicklungen (Foto & Montage: M.Nold)</i>	18
<i>Abbildung 13 – Wicklungsschema der Ge 4/4 II Fahrmotoren.</i>	19
<i>Abbildung 14 – Temperatursensor an der Fahrmotor-wendepolwicklung der Ge 4/4 II (Foto: M.Nold)</i>	19
<i>Abbildung 15 – RhB Ge 4/4 II 629 + RhB Ge 4/4 III 642 im Vereinatunnel (Foto: M.Nold)</i>	19
<i>Abbildung 16 – Zugkraft der RhB Ge 4/4 II (blau und rot) und Bremskraft der RhB Ge 4/4 III (grün) sowie die maximal wirkende Kraft (violett), welche von der Ge 4/4 III abgebremst werden muss [2].</i>	20
<i>Abbildung 17 – Rohdaten der Erwärmungsmessung bei 650 A Motorstrom und Ventilationsstufe 1 (Stillstandsventilation) (blau Wendepolwicklung, rot Kollektor, orange Maschinenraum, grün Erregerwicklung)</i>	21
<i>Abbildung 18 – Rohdaten der Erwärmungsmessung bei 650 A Motorstrom und Ventilationsstufe 2 (schwache Ventilation) (blau Wendepolwicklung, rot Kollektor, orange Maschinenraum, grün Erregerwicklung).</i>	21
<i>Abbildung 19 – Abkühlung bei Ventilationsstufe 2 (schwache Ventilation) und 0 A Motorstrom (blau Wendepolwicklung, rot Kollektor, orange Maschinenraum, grün Erregerwicklung)</i>	22
<i>Abbildung 20 – Aufbau des Steuerungskonzepts, welches anhand der Temperaturen die Ventilationsstufe festlegt</i>	23
<i>Abbildung 21 – Ansicht der Speicherprogrammierbaren Steuerung, welche die Ventilationssteuerungssoftware ausführt und dafür erweitert wurde (Foto: M.Nold)</i>	24
<i>Abbildung 22 – Ansicht des Kühlluftsystems auf der Ge 4/4 II und der Sensorpositionen für die Ventilationssteuerung (Skizze: M.Nold)</i>	25

<i>Abbildung 23 – Softwareauszug – Die Wahl der Ventilationsstufe erfolgt nach dem Maximalprinzip der einzelnen Anforderungen</i>	28
<i>Abbildung 24 – Softwareauszug – Kabelbrucherkennung für den Motorstrom</i>	29
<i>Abbildung 25 – Softwareauszug – Temperatursteuerung für die Stromrichter</i>	30
<i>Abbildung 26 – Validierungsmessung des Motortemperaturberechnungsalgorithmus der Ventilationssteuerung (rote Linie: Messung der max. Motortemperatur grüne Linie: berechnete Temperatur anhand des Motortemperaturberechnungsalgorithmus violette Linie: gemessene Aussentemperatur blaue Linie: Differenz zwischen der berechneten und gemessenen Temperatur)</i>	31
<i>Abbildung 27 – Beispielsimulation der sich ergebenden Motortemperatur bei konstanter Wärmezufuhr und dem Einsatz verschiedener Ventilationsstufen</i>	33
<i>Abbildung 28 – Mittleres Ventilationsverhältnis bei manueller Bedienung durch den Lokführer.</i>	34
<i>Abbildung 29 – Mittleres Ventilationsverhältnis, welches im Rahmen der Inbetriebsetzung mit der neuen Ventilationssteuerung erreicht wurde.</i>	34
<i>Abbildung 30 – Energieverbrauch durch die jeweilige Ventilationsstufe und die sich daraus ergebende Summe bei 320 Betriebstagen im Jahr.</i>	35

7.2 Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1 - Übersicht des Energieverbrauches der einzelnen Ventilationsstufen und prozentualer Vergleich dieser Stufen zueinander.</i>	10
<i>Tabelle 2 – Vor- und Nachteile des Nachrüstens, einer Ventilationssteuerung mit Motortemperatursensoren</i>	15
<i>Tabelle 3 - Vor- und Nachteile des Nachrüstens, einer Ventilationssteuerung mit einem Motortemperaturmodell</i>	15
<i>Tabelle 4 - Vor- und Nachteile der Integration der Ventilationssteuerungssoftware auf eine bestehende SPS</i>	25
<i>Tabelle 5 – Energieverbrauch, Abkühlung und normierter Wirkungsgrad der einzelnen Ventilationsstufen</i>	32
<i>Tabelle 6 – Energiesumme, Energiekosten, Energieersparnis und Kostenersparnis für eine Lokomotive der Ge 4/4 II Serie im Jahr</i>	36
<i>Tabelle 7 – Ersparnis für eine Lokomotive, die zweite Ge 4/4 II Serie (13 Lokomotiven) die gesamte Ge 4/4 II Flotte (23 Lokomotiven) für 1 Jahr, 10 Jahre und 25 Jahre</i>	36
<i>Tabelle 8 – Ersparnis bezogen auf den Einsatz der Ge 4/4 II mit dem Albulagliederzug (AGZ) für 1 Jahr, 10 Jahre und 25 Jahre</i>	37

7.3 Quellen

- [1] Nold, Michael;
VEROMA Traktionsstudie;
RhB; 2013;
- [2] Henn, Nils; Furgler, Hans;
Die Lokomotiven Ge 4/4 III 641 -649 der Rhätischen Bahn;
Schweizer Eisenbahn-Revue; 1994;
- [3] Tipler, Paul A.; Mosca, Gene;
Physik;
Springer-Verlag; 2015;
- [4] Gerthsen, Christian; Meschede, Dieter;
Gerthsen Physik;
Springer Berlin Heidelberg; 2006
- [5] Baehr, Hans Dieter; Stephan, Karl;
Wärme- und Stoffübertragung;
Springer Berlin Heidelberg; 2010;