



## DIPLOMARBEIT Master Thesis

# Energiebedarfsanalyse am Beispiel eines Doppelstock- Reisezugwagens

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades  
eines Diplom-Ingenieurs/ einer Diplom-Ingenieurin

unter der Leitung von

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Norbert Ostermann

E320

Institut für Verkehrswissenschaften

eingereicht an der Technischen Universität Wien  
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Elisabeth Chwatal

0326177

Mitterteichstraße 377  
3945 Hoheneich

Wien, am 5.März 2010

# Kurzfassung

In vorliegender Diplomarbeit wird der Energiebedarf anhand von aufgezeichneten Messdaten eines Doppelstock-Reisezugwagens untersucht. Zu diesem Zweck wurde ein Wagen von den Österreichischen Bundesbahnen mit Messeinrichtungen ausgerüstet, welche Innen- und Außentemperatur, sowie den Energieverbrauch erfassen. Weiters wurden für die Analyse, Daten über den genauen Einsatz im österreichischen Bahnnetz des Doppelstockwagens herangezogen. Der Beobachtungszeitraum erstreckte sich über 14 Monate, von Mai 2008 bis Juni 2009. Für eine effiziente und umfassende Auswertung, wurde eine Datenbank aufgebaut, aus welcher mittels Filterfunktionen spezifische Datensätze für weitere Betrachtungen entnommen werden können. Durch die Analyse der verschiedenen Daten können Rückschlüsse auf typische Energieverbräuche im Fahr- als auch im Abstellbetrieb des Wagens gemacht, sowie eine Abhängigkeit der Energie und der Temperaturdifferenz von Innen- und Außentemperatur aufgezeigt werden. Darüber hinaus wurden Auswirkungen von unterschiedlichen Ansätzen der Energieeinsparung, beispielsweise einer Absenkung der Innentemperatur, abgeschätzt.

## Abstract

In present diploma thesis the demand of energy is examined on the basis of logged measuring data of a double deck-travel train carriage. For this purpose a carriage was equipped by the Austrian Federal Railways with measuring devices which record inside and outside temperature, as well as the energy consumption. Furthermore data about the exact times of operation of the double deck carriage in the Austrian railway network were used for analysis. The examined period extends over more than 14 months, from May, 2008 to June, 2009. To get an efficient and comprehensive evaluation a data base was built up. For further considerations, specific sets of values can be taken by the use of filter functions. Conclusions on typical energy consumptions in traction operations as well as in stoppage operations of the carriage can be made by the analysis of the different records. Moreover, the dependence of the energy and the temperature difference between inside and outside temperature can be shown. In addition, effects of different approaches of energy saving (e.g. decrease of the inside temperature) were estimated.

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort .....	3
Abkürzungsverzeichnis .....	4
1. Aufgabenstellung .....	5
1.1. Motivation der Energieerfassung .....	5
1.2. Einflussfaktoren des Energiebedarfs .....	6
2. Grundlagen .....	8
2.1. Statistische Grundlagen .....	8
2.1.1. Absolute und relative Häufigkeit .....	8
2.1.2. Histogramm .....	8
2.1.3. Mittelwert .....	9
2.1.4. Varianz und Standardabweichung .....	10
2.1.5. Minimum und Maximum .....	10
2.1.6. Streudiagramm (Punktediagramm) und Korrelation .....	11
2.1.7. Lineare Regression .....	13
2.2. Doppelstockwagen .....	13
2.2.1. Allgemeine geschichtliche Entwicklung .....	13
2.2.2. Geschichte des Doppelstockwagens in Österreich .....	15
2.2.3. Allgemeine Daten des Doppelstockwagens (1997) .....	21
2.2.4. Energieversorgung des Doppelstockwagens .....	23
3. Messdatenerhebung .....	26
3.1. Messdaten .....	26
3.1.1. Energiedaten .....	26
3.1.2. Temperaturdaten .....	27
3.1.3. Einsatzdaten .....	29
3.2. Auslesung der Daten .....	30
4. Datenformat der Messdaten .....	33
4.1.1. Energiedaten .....	33
4.1.2. Temperaturdaten .....	35
4.1.3. Einsatzdaten .....	36
5. Analyse der Daten .....	38
5.1. Aufbau der Datenbank .....	38
5.2. Fahrbetrieb und Stehzeiten .....	40

---

5.3. Temperaturdaten .....	42
5.4. Absolute Energieaufnahmen .....	48
5.5. Zusammenhang zwischen Energie und Temperatur .....	55
5.6. Energieeinsparungen durch Temperaturabsenkung.....	64
5.6.1. Energieeinsparungen im Fahren .....	64
5.6.2. Energieeinsparungen im Stehen .....	69
5.7. Energieeinsparungen durch Außerbetriebnahme der Heizung.....	73
5.8. Dimensionen von erzielbaren Energieeinsparungen .....	74
5.8.1. Temperaturabsenkung im Betriebszustand des Fahrens .....	74
5.8.2. Temperaturabsenkung im Betriebszustand des Stehens .....	75
5.8.3. Außerbetriebnahme der Heizung.....	75
6. Zusammenfassung .....	76
7. Quellenverzeichnis.....	78
7.1. Literaturverzeichnis .....	78
7.2. Internetverzeichnis .....	79
7.3. Abbildungsverzeichnis .....	81

## Vorwort

Die Aufgabe in der vorliegenden Diplomarbeit besteht in der Analyse des Energiebedarfs eines modernen Personenwagens am Beispiel eines Doppelstock-Reisewagens. Derartige Betrachtungen gewinnen in der heutigen Zeit aufgrund des verstärkten, energiebewussten Denkens und ökologischen Handelns zunehmend an Bedeutung. Die Anzahl der eingesetzten Komfortsysteme im Personenverkehr steigt fortlaufend. Ebenso wächst auch der Energieverbrauch für den Betrieb dieser Systeme. Gerade die Klimatisierung, welche sowohl das Kühlen, als auch das Heizen des Fahrgastraumes umfasst, beansprucht hierbei einen wesentlichen Anteil des Gesamtenergieverbrauchs. Auch wenn das Reisen mit der Bahn im Vergleich zur Straße und zum Flugverkehr, energieeffizienter ist, so ist der Summenverbrauch aufgrund der hohen Anzahl von Zügen dennoch beträchtlich. Zusammenhänge des Energieverbrauchs mit Umweltparametern aufzuzeigen und darauf aufbauend den Energieverbrauch zu optimieren birgt folglich weiteres, signifikantes Einsparungspotential. Die Österreichischen Bundesbahnen waren schon in der Vergangenheit stets bestrebt, den Energieverbrauch zu verringern. Dies belegen zahlreiche Maßnahmen, welche in den letzten Jahren umgesetzt wurden. Diese Arbeit soll ein weiterer Baustein sein, die Bahn noch umweltfreundlicher werden zu lassen.

## Abkürzungsverzeichnis

ÖBB	Österreichische Bundesbahnen
StEG	Staats-Eisenbahn-Gesellschaft
NOB	österreichische Nordostbahn
GKB	Grazer-Köflacher Eisenbahn- und Bergbaugesellschaft
SGP	Simmering-Graz-Pauker
TAA	Temperaturabsenkanlage
du/dt-Filter	Filter zur Entstörung bzw. zur Begrenzung des Spannungsanstiegs
TEE	Trenn- und Erdungseinrichtung
USB	Universal Serial Bus

# 1. Aufgabenstellung

Für eine Optimierung des Energieverbrauches ist es notwendig, eine genaue Vorstellung über die Verbräuche und Abhängigkeiten zu kennen. Daher führten die Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB) eine Langzeitmessung im Rahmen einer Energiebedarfsanalyse am Beispiel eines Doppelstock-Reisezugwagens durch. Ziel war es, den Energiebedarf für Heizung bzw. Klimatisierung, sowie Beleuchtung und deren Zusammenhang mit den Einsatz- und Umgebungsparametern näher zu untersuchen. Die ÖBB installierten hierfür Messeinrichtungen in einem Doppelstockwagen, welche die Innen- und Außentemperatur, sowie den Energieverbrauch messen und aufzeichnen. Weiters wurden die genauen Einsatzdaten dieses Wagens über den Zeitraum von 14 Monaten festgehalten. In vorliegender Diplomarbeit wurden diese, von den ÖBB zur Verfügung gestellten Daten zusammengeführt, aufbereitet und anschließend analysiert.

## 1.1. Motivation der Energieerfassung

In Zeiten von Wirtschaftskrise und Klimaerwärmung wächst der ökologische und ökonomische Druck auf alle Verkehrsträger. Immer mehr wird darauf geachtet, dass weniger Treibstoff verbraucht und der CO<sub>2</sub> Ausstoß reduziert wird. Bei den öffentlichen Verkehrsmitteln, wie den Bussen und Bahnen ist der Energieverbrauch pro Kopf betrachtet im Vergleich zum Individualverkehr geringer. Wird der Gesamtverbrauch aller öffentlichen Verkehrsmittel betrachtet, so weisen sie aufgrund der hohen Beförderungsmengen einen nicht zu vernachlässigbaren Energiebedarf auf.

Um die Attraktivität der öffentlichen Verkehrsmittel zu steigern wird der Komfort in den Zügen für die Reisenden immer mehr verbessert. Vor allem die Klimatisierung in den Fahrzeugen besitzt große Bedeutung, da die thermische Behaglichkeit der Fahrgäste von enormem Wert ist. Bahnbetreiber versuchen stets den Energieverbrauch zu reduzieren, aber auch die Zusammenhänge und Wirkungsweisen zwischen dem Energieverbrauch und den Einsatz- und Umgebungsparametern herauszufinden. Um den Energiebedarf und damit den Verbrauch der elektrischen Energie feststellen zu können ist es wichtig, Daten aufzuzeichnen und zu analysieren. Aus diesem Grund heraus wurde ein Doppelstockwagen, welcher in Österreich auf den Eisenbahnstrecken unterwegs ist, mit Energie- und Temperaturmessern in einem gewählten Untersuchungszeitraum von 14 Monaten ausgestattet. Mit Hilfe der Temperaturwerte werden die herrschenden Umgebungsbedingungen erfasst. Während der

Fahrt ändern sich diese Bedingungen ständig und es ist schwer, eine genaue Leistungsaufnahme darstellen zu können. Da bei den Messungen der Energie jede Minute Daten gespeichert werden, ist dadurch eine sehr gute zeitliche Auflösung gegeben. Die Temperaturdaten werden alle fünf Minuten aufgezeichnet und zur Weiterverarbeitung gespeichert.

## 1.2. Einflussfaktoren des Energiebedarfs

Ein gutes Zusammenspiel von Heizung, Kühlung und Lüftung ist vor allem für die Behaglichkeit des Fahrgastes von großer Bedeutung. Doch es gibt verschiedene innere und äußere Störgrößen, wie in Abb. 1 ersichtlich, die sich nachteilig auf eine konstante Klimatisierung im Fahrgastraum und damit auf ein durchgängiges Wohlbefinden von Fahrgästen auswirken können.

- Innere Störgrößen:
  - Wärme- und Feuchtigkeitsabgabe durch Menschen
  - Wärmeabgabe durch Beleuchtungskörper
  - Schaltschränke
- Äußere Störgrößen:
  - Wärmestrom (Transmission) durch direkte oder diffuse Sonneneinstrahlung und
  - Enthalpie- und Feuchtigkeitsstrom durch ungewollten Luftwechsel

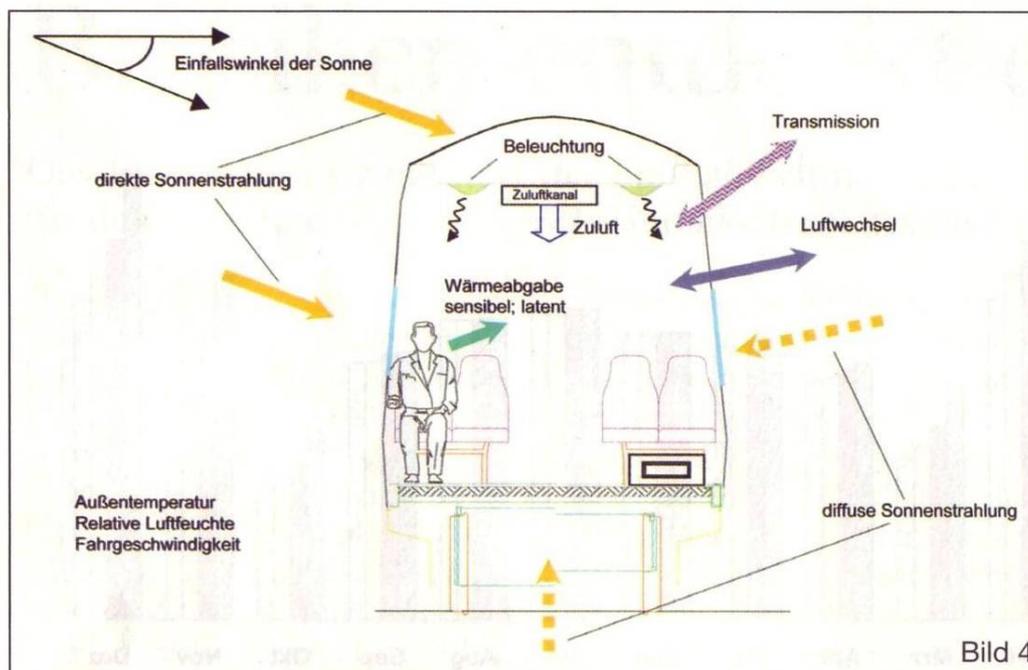


Abb. 1 Innere und äußere Störgrößen [4]

Für ein konstantes Raumklima ist den Auswirkungen dieser Einflussgrößen durch technische Maßnahmen (beispielsweise Regelungen von Temperatur und Frischluft) entgegenzuwirken. Meist unterscheiden sich die verschiedenen Maßnahmen im Betrieb durch aufzuwendende und eingesparte Energiemengen. Für seriöse Bewertung der Maßnahmen hinsichtlich ihres Energiebedarfs sind jedoch stets alle verursachenden Energiebeiträge zu berücksichtigen. Wird beispielsweise eine stärkere Wärmedämmung des Wagenkastens eingebaut, sinkt einerseits der Energiebedarf für die Klimatisierung. Andererseits hat dieser Einbau aber eine Gewichtszunahme des Fahrzeuges zur Folge, wodurch mehr Energie für die Traktion verbraucht wird. Bei gesamtenergetischer Betrachtung wäre der Einsparungseffekt bei diesem Beispiel geringer oder vielleicht überhaupt nicht vorhanden. Daher ist für eine Energieeinsparung stets eine gesamtsystemische Betrachtung und Optimierung notwendig.

Beispiele von Energiesparpotenzialen reichen von einfachen Maßnahmen wie

- besetzungsabhängige, geregelte Frischluftmenge,
- intelligente, optimierte Klimaregelung und
- bedarfsbezogene Sollwertanpassung

bis hin zu Neukonzepten wie

- optimierte Wärmedämmung des Wagenkastens und/oder Kanalsystems,
- aktive Isolierung, beispielsweise Nutzung der Abluftwärme zum Erwärmen von Wagenkastenflächen,
- Abluftwärmerückgewinnung,
- lastabhängige Kälteanlage und
- Wärmepumpe.

Auch eine regelmäßige Wartung und Überprüfung der vorgesehenen Maßnahmen können den Energieverbrauch senken. [4]

## 2. Grundlagen

### 2.1. Statistische Grundlagen

#### 2.1.1. Absolute und relative Häufigkeit

Eine Häufigkeit ist definiert als eine Anzahl, mit der ein bestimmtes Ergebnis bzw. Ereignis innerhalb eines Zeitraums vorkommt. Die zwei unterschiedlichen Arten der Häufigkeit sind:

- Absolute Häufigkeit: Diese ist das Ergebnis einer einfachen Zählung und gibt an, wie viele Daten mit der gleichen Eigenschaft vorhanden sind. Die absolute Häufigkeit kann nur eine natürliche positive Zahl sein, da eine negative Anzahl von Daten nicht möglich ist.
- Relative Häufigkeit: Diese gibt die Anzahl an Daten einer Teilmenge relativ zur Grundmenge an. Sie wird berechnet, indem die absolute Häufigkeit durch die Anzahl der Daten geteilt wird. Die relative Häufigkeit ist also eine Bruchzahl und hat einen Wert zwischen 0 und 1. [17]

#### 2.1.2. Histogramm

Ein Histogramm dient zur grafischen Darstellung der Häufigkeitsverteilung und veranschaulicht die Art der Verteilung der Daten. Diese werden in mehrere Intervalle, welche auch als Klassen bezeichnet werden, eingeteilt und die Anzahl der Werte wird in jedem dieser Intervalle bestimmt. Die Klassen müssen folgende Bedingungen erfüllen:

- Alle Klassen müssen die gleiche Breite aufweisen.
- Die Anzahl der Klassen sollte nicht kleiner als 6 sein, vorzugsweise werden die Werte in Klassen zwischen 10 und 16 eingeteilt. Für mehr als 100 Messwerte kann  $\sqrt{n}$  als Richtwert genommen werden.
- Die Wahl der Intervallsgrenzen muss so erfolgen, dass jeder Datenwert unzweideutig zugeordnet werden kann.

Auf der x-Achse eines Histogramms werden die Intervalle aufgetragen und auf der y-Achse die zugeordneten absoluten oder relativen Häufigkeiten. [8]

### 2.1.3. Mittelwert

Der arithmetischer Mittelwert ist in [2] definiert: „Der Mittelwert ist ein arithmetisches Mittel und bildet sich aus der Summe der Datensätze durch die Anzahl der Datensätze.“

#### Arithmetisches Mittel einer Datenreihe

Liegt eine Datenreihe, welche aus  $N$  Werten besteht vor und bei welcher  $x_i$  den  $i$ -ten Wert der Reihe beschreibt, dann wird das arithmetische Mittel wie folgt berechnet:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot (x_1 + x_2 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i$$

$x_i$ ...  $i$ -ter Datenwert aus der einer Stichprobe

$n$ ... Anzahl der Datenwerte  $x_i$  einer Stichprobe

Grundgesamtheit.... Diese stellt eine Gesamtheit einer Datenreihe dar, welche dieselben Eigenschaften in sachlicher, zeitlicher oder örtlicher Hinsicht besitzen.

Stichprobe.... Diese wird mit Hilfe einer Zufallsauswahl aus der Grundgesamtheit gezogen.

#### Arithmetisches Mittel für Häufigkeitsverteilungen

Eine Häufigkeitsverteilung ist eine Funktion, die zu jedem vorgekommenen Wert einer Datenreihe angibt, wie häufig dieser Wert vorgekommen ist.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^m h_j \cdot x_j$$

$h_j$ ... absolute Häufigkeit von  $x_j$

$n$ ... Summe der absoluten Häufigkeiten

$j$ ... Anzahl der Eigenschaften von  $x_j$

Man nennt  $\bar{x}$  meistens den Mittelwert und lässt den Zusatz arithmetisch weg. Wird das Mittel nicht aus einer Stichprobe, sondern aus einer Grundgesamtheit berechnet, dann kürzt man es mit  $\mu$  ab. [2], [8]

### 2.1.4. Varianz und Standardabweichung

Varianz und Standardabweichung sind Maße für die Streuung von Werten um deren arithmetisches Mittel. Die Varianz wird mit  $s^2$  abgekürzt, wenn die Berechnung aus einer Stichprobe erfolgt und mit  $\sigma^2$ , wenn sie die Streuung einer Grundgesamtheit kennzeichnet.

#### Varianz einer Stichprobe

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

$x_i$ ...  $i$ -ter Datenwert aus der Stichprobe

$n$ ... Anzahl der Datenwerte  $x_i$  einer Stichprobe

$\bar{x}$ ... Arithmetischer Mittelwert

#### Varianz einer Grundgesamtheit

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2$$

$x_i$ ...  $i$ -ter Datenwert aus der Grundgesamtheit

$N$ ... Umfang der Grundgesamtheit.

$\mu$ ... Arithmetischer Mittelwert

Die Wurzel aus der Varianz ist die Standardabweichung. Zum Unterschied zur Varianz ist die Standardabweichung kein quadrierter Wert und dadurch besser als statistische Kennzahl zur Charakterisierung der Streuung geeignet. [9], [8]

$$s = \sqrt{s^2} \text{ bzw. } \sigma = \sqrt{\sigma^2}$$

### 2.1.5. Minimum und Maximum

Das Minimum und das Maximum sind jeweils der kleinste und der größte Wert der betrachteten Datenmenge  $X$ . Somit kann die Spannweite  $\Delta$  der Daten durch die Differenz dieser beiden Werte dargestellt werden. [2]

$$\Delta = \max(X) - \min(X)$$

### 2.1.6. Streudiagramm (Punktediagramm) und Korrelation

Ein Streudiagramm ist eine graphische Darstellung von beobachteten Werten zweier statistischer Merkmale. Die erhaltenen Werte im Punktediagramm bilden eine 2-dimensionale oder bivariate Verteilung, da jeder Messpunkt aus zwei Variablen (=Veränderlichen) besteht. Die Maßeinheiten der Werte können unterschiedlich sein. Die Darstellung einer bivariaten Verteilung erfolgt mit einem x-y-Punktediagramm (scatter plot), indem die Wertepaare in ein kartesisches Koordinatensystem eingetragen werden, wodurch sich eine Punktwolke ergibt. Die Darstellung der Wertepaare im Streudiagramm kann durch verschiedene kleine Symbole, wie beispielsweise Punkte oder Sterne, erfolgen.

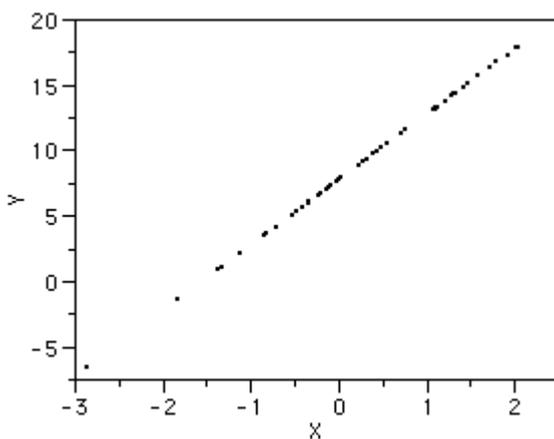


Abb. 2 Streudiagramm mit linearem Zusammenhang zwischen den Variablen x und y [19]

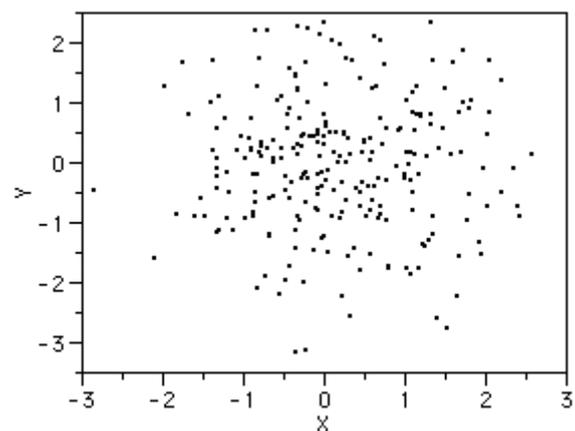


Abb. 3 Streudiagramm mit keinem linearen Zusammenhang zwischen den Variablen x und y [19]

Abb. 2 und Abb. 3 stellen zwei verschiedene Streudiagramme dar. In Abb. 2 zeigt sich durch eine lineare Ansammlung von Punkten, dass ein statistischer Zusammenhang zwischen den Variablen x und y besteht. In Abb. 3 stellt das Streudiagramm keinen Zusammenhang zwischen den beiden Variablen dar, was durch die unterschiedliche Anordnung der Punkte im Koordinatensystem erkennbar ist.

Wenn ein statistischer Zusammenhang zwischen zwei Variablen durch ein Streudiagramm veranschaulicht wird, kann der Grad der linearen Abhängigkeit mit dem Korrelationskoeffizienten  $r$  ausgedrückt werden. Der Korrelationskoeffizient  $r$  ist ein statistischer Schätzwert für den „wahren“ Korrelationskoeffizienten und liegt zwischen den Werten -1 und +1. Das Vorzeichen vor dem Korrelationskoeffizienten gibt an, ob der Koeffizient gleichläufig oder gegenläufig ist.

Wert von r	Interpretation
r nahe bei Null	Kein linearer Zusammenhang zwischen x und y
r positiver Wert	die beiden Variablen steigen und fallen zusammen
r negativer Wert	eine Variable steigt, die andere fällt, oder umgekehrt
r=1 / r=-1	perfekte positive respektive negative Korrelation

Für normalverteilte Messdaten wird der Korrelationskoeffizient  $r_{xy}$  nach Pearson mit folgenden Gleichungen berechnet.

$$r_{xy} = \frac{s_{xy}^2}{(s_x * s_y)}$$

mit

$$s_{xy}^2 = \frac{1}{n-1} \sum (x_i - \bar{x}) * (y_i - \bar{y})$$

$s_x, s_y$  Standardabweichungen von x und y.

Eine besondere Bedeutung bei der Korrelation hat das Bestimmtheitsmaß. Dieses ist der quadrierte Korrelationskoeffizient von Pearson:  $r_{xy}^2$ . Dieser Wert ist immer positiv und wird maximal 1. Er gibt den Anteil der gemeinsamen Varianz der beider Variablen x und y an. Beträgt  $r^2=0,71$ , heißt dies, dass 71% der Varianz von x und y gemeinsam getragen wird, oder anders ausgedrückt: 71% der Varianz der y-Werte können durch die Änderung der x-Werte erklärt werden (erklärte Varianz), 29% sind nicht durch Veränderung der x-Werte erklärbar (unerklärte Restvarianz). [8]

Für keine normalverteilten Messdaten, Messdaten mit Ausreißern oder ist die Verteilung der Daten aufgrund zu kleiner Stichprobenanzahl nicht bekannt, wird der Rangkorrelationskoeffizient  $r_s$  von Spearman angewendet. Die Daten werden dabei in Ränge umgewandelt und die Differenz  $D$  zwischen den Rängen beider Variablen berechnet. Anschließend wird mit folgender Gleichung der Koeffizient  $r_s$  ermittelt.

$$r_s = 1 - \frac{6 \cdot \sum D_i^2}{n(n^2 - 1)}$$

$D$ ... Differenz zwischen den Rängen von x und y einer Beobachtung

$n$ ... Anzahl der Wertepaare [8]

### 2.1.7. Lineare Regression

Die Korrelationsanalyse liefert einen Hinweis auf die Stärke und Richtung eines linearen Zusammenhanges zwischen zwei Variablen. Die Regressionsanalyse soll hingegen Aufschluss über die Art des Zusammenhanges liefern. Wenn nun ein Streudiagramm einen linearen Zusammenhang zwischen zwei Variablen  $x$  und  $y$ , wie in Abb. 2 zeigt, kann eine lineare Regression angewendet werden. Mit Hilfe dieser wird der Zusammenhang formelmäßig erfasst. Dies bedeutet, dass versucht wird eine Gleichung zu finden, nach derer aus der Kenntnis des Wertes der Variablen  $x$ , der zu erwartende Wert der zweiten Variable  $y$  bestimmt werden kann. Diese Gleichung ist eine Geradengleichung und beschreibt das Verhalten zwischen den  $x$ - und  $y$ -Werten. Dabei ist zu beachten, welche der beiden gegebenen Variablen als abhängige Variable gilt, da diese auf die Ordinate aufzutragen ist. Die Koeffizienten der Geradengleichung sind  $a$  und  $b$  und werden Regressionskoeffizienten genannt.

#### Geradengleichung der Regressionsgeraden

$$y = b \cdot x + a$$

- $a$ ..... Ordinatenabstand und gibt den Punkt an, an dem die Regressionsgerade die  $y$ -Achse schneidet
- $b$ ..... gibt den Tangens des Steigungswinkels der Regressionsgeraden an (das Vorzeichen richtet sich nach zugehöriger Korrelationskoeffizienten: ist  $b$  positiv, steigt die Gerade)
- $x$ ..... abhängige Variable
- $y$ ..... unabhängige Variable

Die Regressionsgerade wird definiert als Gerade, für welche die Summe der Quadrate der Abweichungen aller Punkte von dieser Geraden ein Minimum wird (Abstände parallel zur Ordinate). [8]

## 2.2. Doppelstockwagen

### 2.2.1. Allgemeine geschichtliche Entwicklung

Ein Kriterium bei der Konstruktion eines Personenwagens ist, ein hohes Fassungsvermögen an Passagieren ohne Verlust von Komfort und bei gegebener Wagenlänge zu erzielen. Eine Möglichkeit dieser Forderung gerecht zu werden, ist eine zweistöckige Architektur. Dieses

Prinzip stammt von den Postkutschen, siehe Abb. 4, bei denen sich der Kutschbock auf dem Dach befand und dort auch des Öfteren Passagiere zusätzlich befördert werden konnten. Auch wurde diese Art der Konstruktion bereits früher bei den Straßenbahnen und Omnibusse entwickelt und als „Doppeldecker“ gebaut. Anschließend wurde dies auch bei den ersten mit Pferden gezogenen Personenwagen auf Schienen umgesetzt. [16]



Abb. 4 Postkutsche mit Oberdecksitzen [16]



Abb. 5 Doppelstock-Wagen 1876 [16]

Bereits im Jahre 1868 wurden für die Altona-Kieler Eisenbahn, eine Aktiengesellschaft mit Dänemark Personalunion verbundenen Herzogtum Holstein in Deutschland, ein Doppelstockwagen geliefert und in Betrieb genommen. Dieser Reisewagen hatte Platz für 50 Personen im unteren Bereich, sowie für 32 Personen im oberen Stock.

Im selben Jahr wurden in Dänemark weitere, größere Doppelstockwagen für die Sjaellandske Jernbaneselskab, eine Eisenbahngesellschaft, angeschafft. In diesen Wagen war Platz für 60 Passagiere im unteren Wagenteil und 40 im Oberdeck.

Im Jahre 1873 hatten die Staats-Eisenbahn-Gesellschaft (StEG) und dann auch die österreichische Nordostbahn (NOB) Doppelstöcker angefordert und eingesetzt.

Zwölf „Etagenwagen“ bestellte in Deutschland die Niederschlesisch-Märkische Eisenbahn im selben Jahr. Diese Wagen, welche erst 1876 zum Einsatz kamen, waren die ersten Fahrzeuge auf der Ringbahn in Berlin.

In Frankreich benutzte die französische Bayonne-Biarritz-Bahn die Doppelstockwagen im Jahre 1876, welchen in Abb. 5 zu sehen sind. Diese Wagen hatten offene Sitzplätze auf dem Dach, welche mit Drahtkäfigen gesichert waren. Auch die Staatsbahn État und die französische Ostbahn Est setzten ab 1879 solche Wagen ein. Zu gleicher Zeit wurden auch in Österreich die ersten Doppelstockwagen entwickelt und anschließend in Betrieb genommen. [16]

## 2.2.2. Geschichte des Doppelstockwagens in Österreich

### Doppelstockwagen vor 1900

Die geschichtlichen Anfänge des Doppelstockwagens in Österreich machte 1873 ein Wagen nach französischem Vorbild (siehe Abb. 6). Diese Wagen, insgesamt acht zweiachsige Abteilwagen mit einer aussenliegenden Treppe zum Oberstock, wurden von der Staats-Eisenbahngesellschaft (StEG) als die ersten „Doppelstöcker“ bestellt und eingesetzt. Durch die damalige gesellschaftliche Klasseneinteilung war auch der Wagen in Klassen unterteilt. Ein Doppelstockwagen dieser Bauart hatte 3 Plätze für die Erste Klasse, 16 Plätze für die Zweite Klasse und 54 Plätze für die Dritte Klasse. Es gab aber auch reine, Dritte Klasse Wagen, welche eine Kapazität von 90 Plätzen aufwies. Nach 10 Jahren wurden zwei weitere Wagentypen mit einem Oberstock von der Firma Milde entwickelt. Diese Wagen, zu sehen in Abb. 7, hatten eine Breite von 1,85m. Sie waren für die Lokalbahn Schwechat – Mannersdorf bestimmt und als Mittelgangwagen mit wagenmittig angeordnetem Aufstieg ausgeführt. Dieser hatte eine Klassenunterteilung in Zweiter und Dritter Klasse.

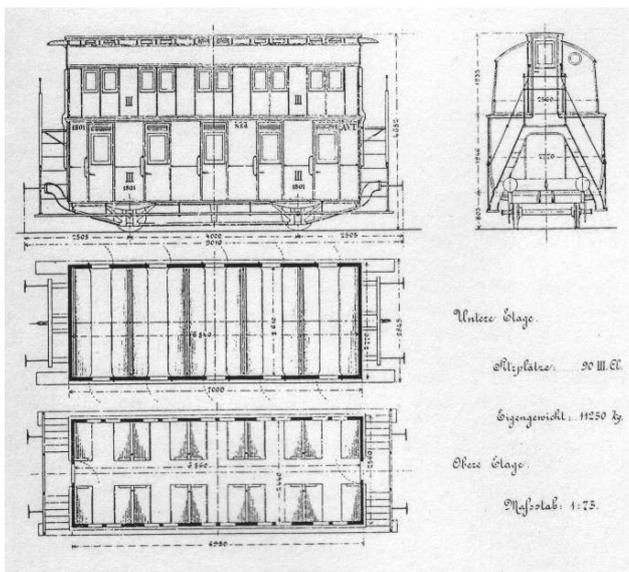


Abb. 6 Doppelstöcker 1873 [6]

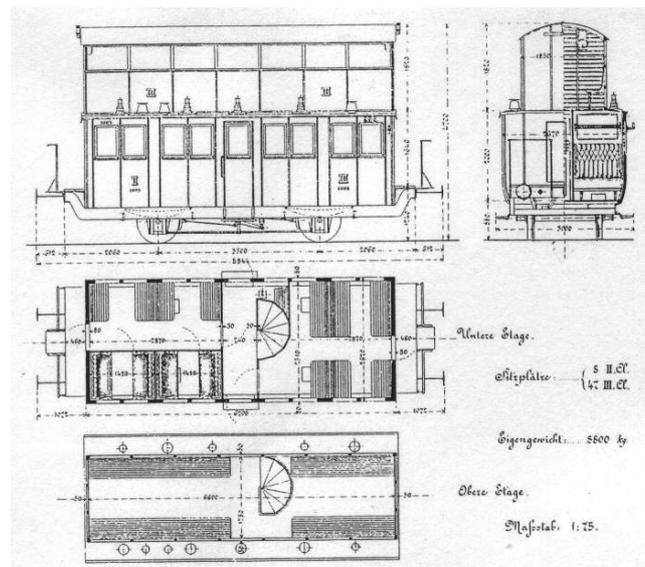


Abb. 7 Doppelstöcker 1883 [6]

1880 baute die Simmeringer Waggonfabrik eine weitere Variante eines Doppelstockwagens für die Kremsthal-Bahn. Diese Wagen, zu sehen in Abb. 8 und Abb. 9, wurden vierachsig gebaut und für die Dritte Klasse verwendet. [6]

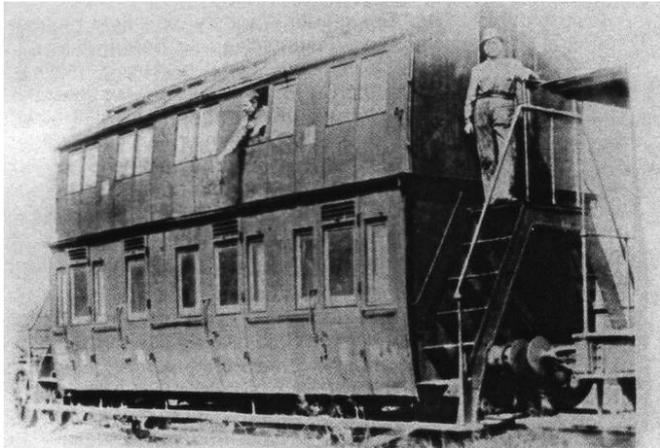


Abb. 8 Doppelstöcker 1880 [6]

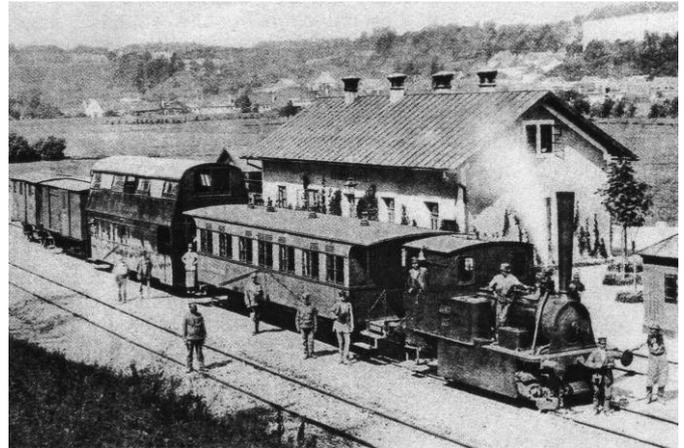


Abb. 9 Doppelstöcker der Kremsthal-Bahn 1880 [6]

### Doppelstockwagen nach 1900

Im Jahre 1950 wurde die Einführung eines neuen Doppelstockwagens geplant und in Fachzeitschriften publiziert (siehe Abb. 10). Allerdings wurde die Einführung aus unbekanntenen Gründen nicht in die Realität umgesetzt. [6]

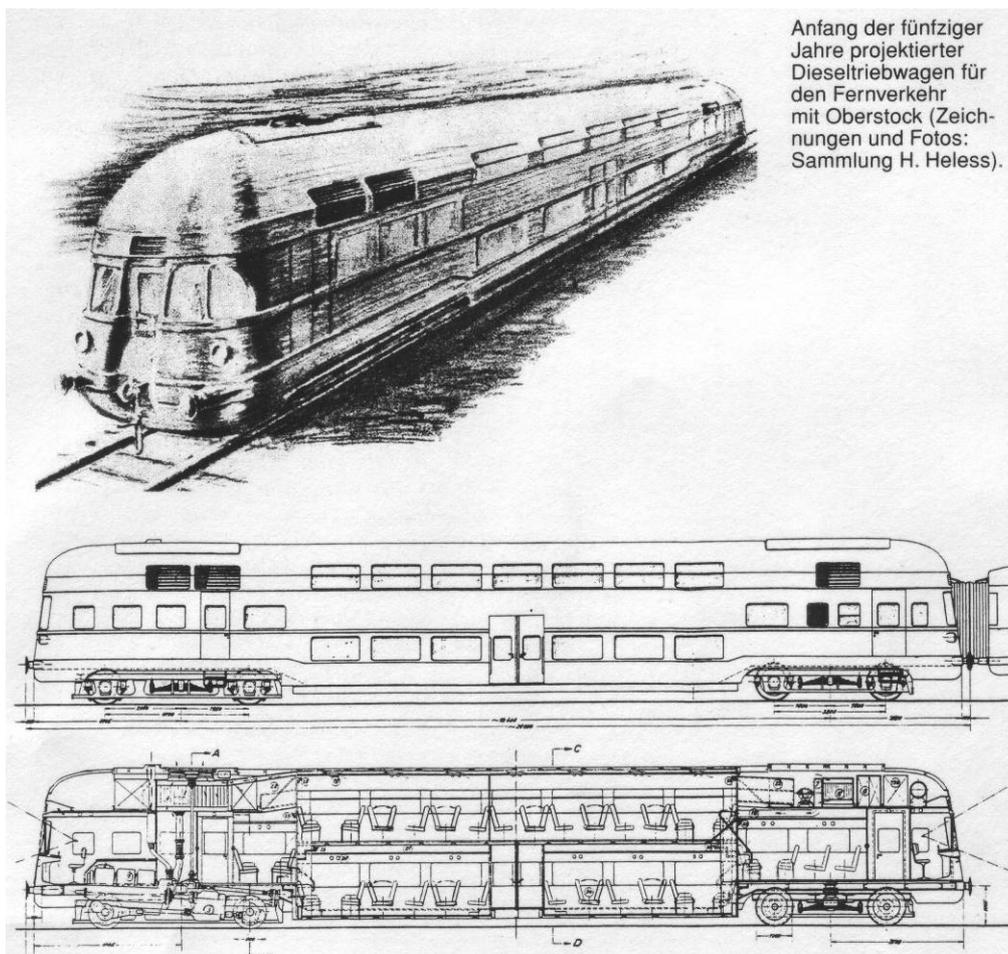


Abb. 10 „Stockwerkswagen in Österreich“ 1950 [6]

In anderen Ländern wurden immer wieder neue Fahrzeuge mit Oberstock entwickelt und produziert. In Österreich kam der Wandel in der Beschaffung und im Einsatz der Doppelstockwagen erst durch die Grazer-Köflacher Eisenbahn- und Bergbaugesellschaft (GKB), die erste österreichische Bahngesellschaft. Diese erkannte die Vorteile eines Doppelstockwagens im Nahverkehr und nahm solche Wagen am 2. April 1993 in Betrieb. Im Jahre 1993 wuchs daher der Anteil von Doppelstockwagen an Personenwagen-Beschaffungsprogrammen der Bahnen. Vor allem im Nah-, Vorort- und Berufsverkehr wurde er häufig eingesetzt, und hatte gegenüber den einstöckigen Wagen wesentliche Vorteile, wie beispielsweise:

- Höhere Sitzplatzanzahl bei gleicher Wagenlänge, wodurch der Sitzplatz um 20% weniger kostet als in anderen Wagen
- Geringere Fahrzeugmasse je Sitzplatz (ca. 25%), da weniger Stahl pro Sitzplatz verbaut wird
- Höhere Festigkeit wegen seines größeren Querschnittes
- Wirtschaftlichere Energieausnutzung
- Geringere Beschaffungs- und Instandhaltungskosten je Sitzplatz
- Bahnsteiglänge für einen Doppelstockwenzug beträgt nur 120m, anstelle 210m
- Hohe Biegesteifigkeit und ein gutes Laufverhalten der Wagen [4]

Die Fertigung des Doppelstockwagens erfolgte nach der Bauart SGP-Talbot (Vorbild für den Wagenkasten) im Werk Graz der SGP (Simmering-Graz-Pauker). Es wurden von der SGP fünf Doppelstocksteuerwagen und zehn Doppelstockwagen geliefert. Eine Garnitur besteht jeweils aus einer Lokomotive, drei Doppelstockwagen und einem Doppelstocksteuerwagen. Diese sind auch für den Wendezugverkehr geeignet, da eine Multiplex-Signalübertragung vom Steuerwagen zur Lokomotive möglich ist. [10]

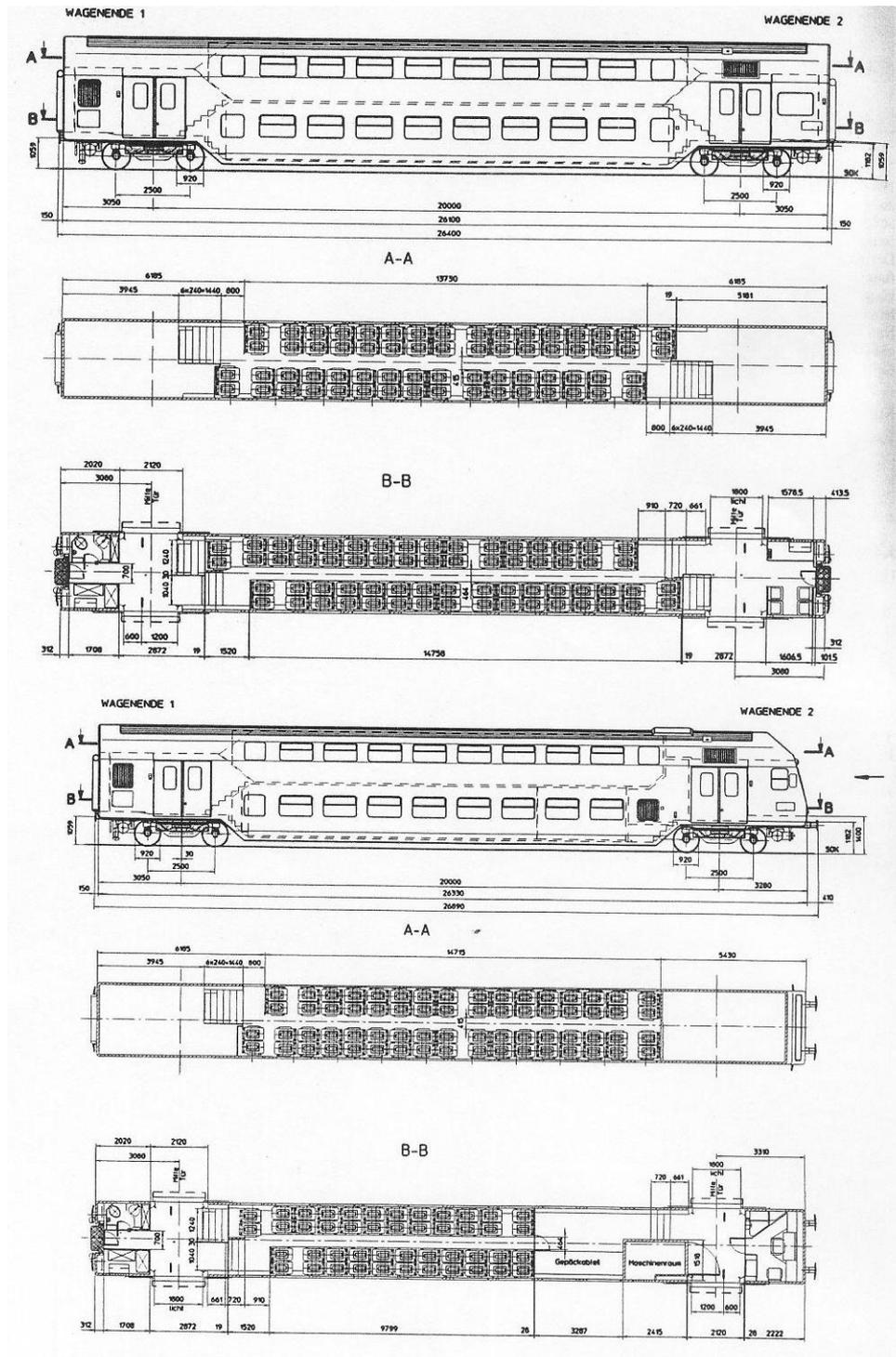


Abb. 11 Aufriss und Grundriss des Doppelstockwagens 1993 [10]

In jedem Doppelstockwagen befinden sich zwei Einstiege (Abb. 11) mit einer lichten Türweite von 1,80m. Eine Einstiegsstufe wird automatisch beim Öffnen heruntergeklappt und die Fahrgäste gelangen vom Einstiegsraum entweder über vier Stufen in den Unterstock oder über sieben Stufen in den Oberstock. Die neue Sitzplatzanreihung entspricht zum Teil einer

Vierplatzsitzgruppierung und zum Teil einer Reihenbestuhlung, wie sie in Reisebussen üblich ist. An einem der beiden Wagenenden befindet sich ein Mehrzweckabteil mit vier Klappsitzen. Der Wagen bietet 132 Sitzplätze und erreicht eine maximale Geschwindigkeit von 120km/h.

[10], [1]

Im Jahre 1996 wurde der Doppelstockwagen aus dem Jahr 1993 weiterentwickelt und auch verbessert, beispielsweise durch den Einbau einer Klimaanlage. 1997 wurde erstmals eine Bauart der ostdeutschen Tiefflur-Einstiegsbauart bei den Österreichischen Bundesbahnen eingesetzt (Abb. 12). So stieg die Anzahl der im Einsatz befindlichen Doppelstockwagen in Österreich auf 120 Stück. [11]

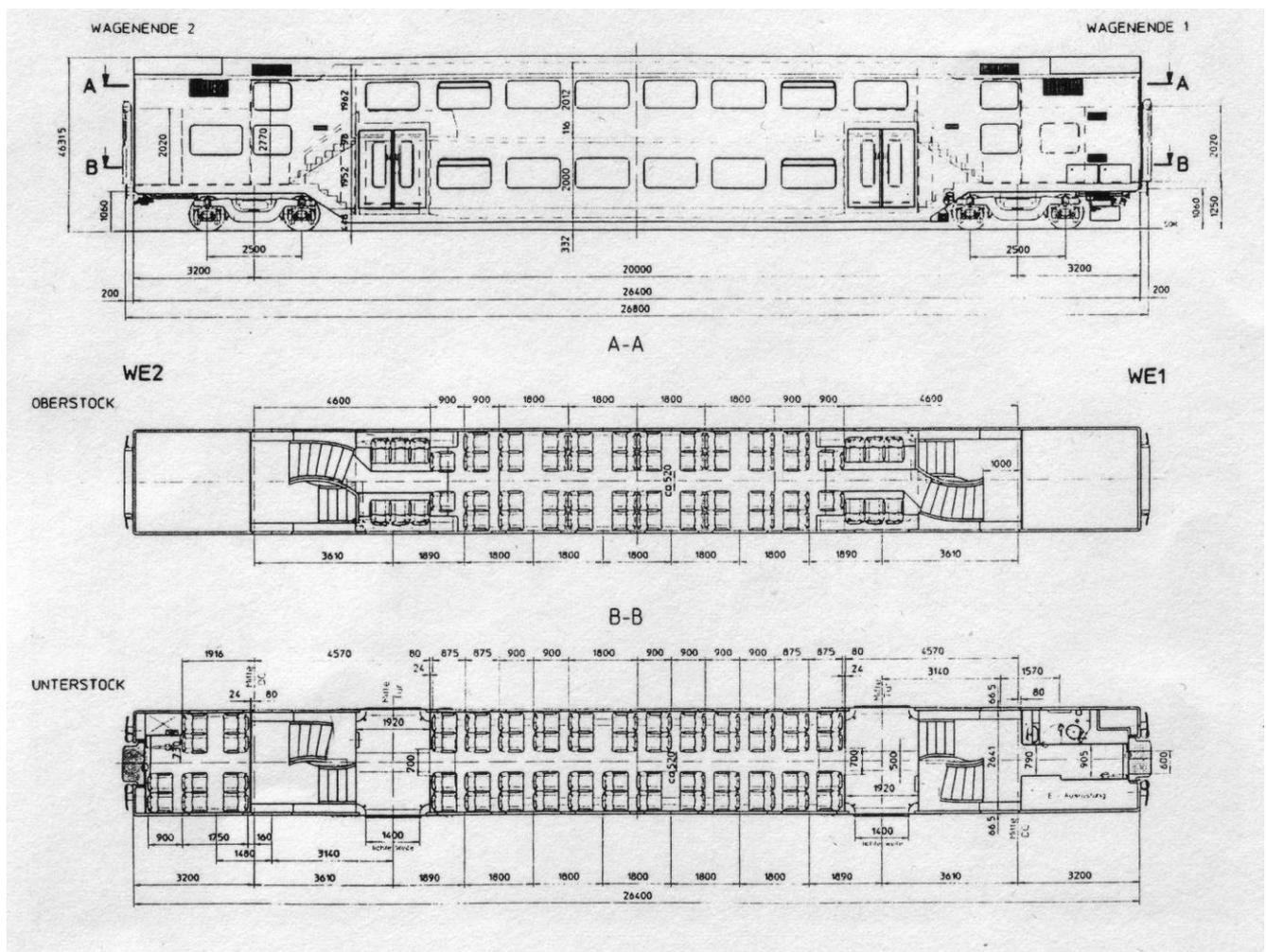


Abb. 12 Grundriss und Aufriss eines Doppelstockwagen 1997 [11]

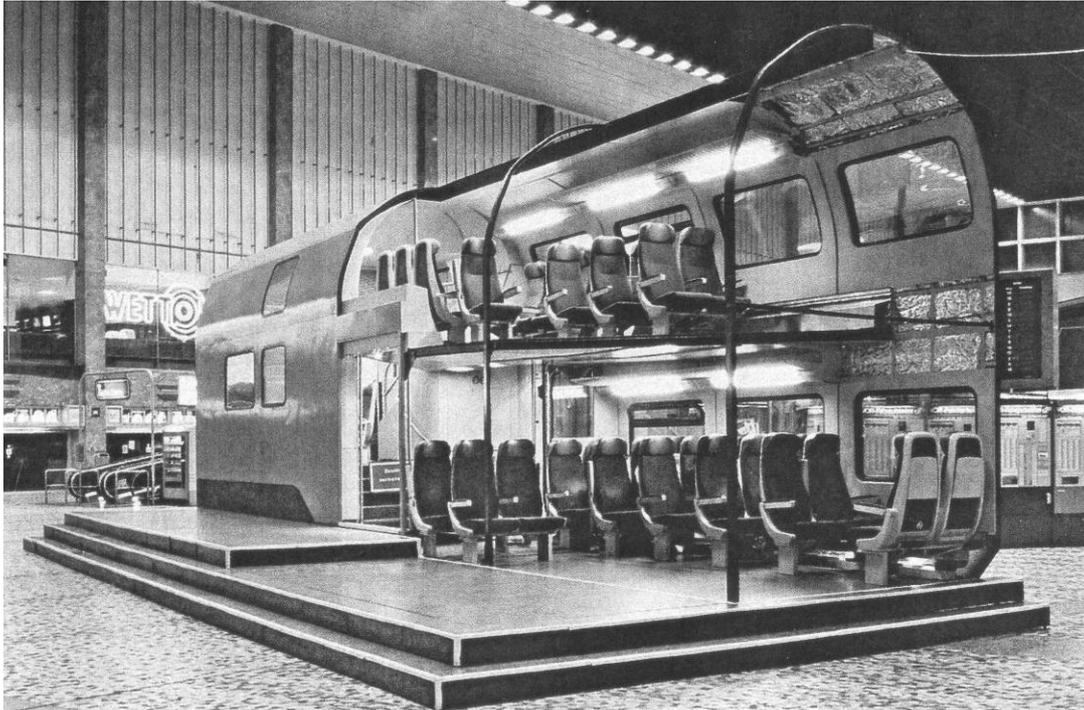


Abb. 13 1:1 Abbildung eines Doppelstockwagens 1997 [1]

Abb. 13 zeigt eine 1:1 Darstellung eines Doppelstockwagens und wurde in der Kassenhalle des Wiener Südbahnhofes ausgestellt. Der Doppelstockwagen dieser Baureihe wird sowohl im Wendezug-Verband mit Steuerwagen mit bis zu sieben Mittelwagen, als auch in normaler Lok-Zug Konstellation bei den Österreichischen Bundesbahnen betrieben. [1]

Zu Jahresende 2007 befanden sich bereits 264 Doppelstockwagen in ganz Österreich im Einsatz. Diese sind vor allem in der Ostregion in Betrieb.

Da der Doppelstockwagen viele Vorteile mit sich brachte, wurden bei den ÖBB weiter auf die Modernisierung der Nahverkehrsflotte gesetzt. Aus diesem Grund wurden bis Juni 2009 weitere Doppelstockwagen produziert. In jenem Monat wurde der letzte Wagen dieser Baureihe in der Werkstätte in Wien Floridsdorf gefertigt und ausgeliefert. Damit war die im Jahre 2001 begonnene Modernisierung der ÖBB-Nahverkehrsflotte mit einer Anzahl von 324 Wagen abgeschlossen. Somit sind auf Österreichs Schienen 64 Züge mit Doppelstockwagen im Einsatz, wobei 90 Prozent in Wien, Niederösterreich und im Burgenland im Betrieb sind. [14]

### 2.2.3. Allgemeine Daten des Doppelstockwagens (1997)

Der Doppelstockwagen vom Typ „Viaggio Twin“ stammt von der Firma Siemens und wird in Österreich seit Jahren bei den ÖBB eingesetzt.

#### Fahrzeugdaten

- Spurweite 1.435mm
- Höchstgeschwindigkeit 140km/h
- Wagenlänge 26,8m
- Wagenbreite 2.774mm
- Fahrzeughöhe über SOK 4.632mm
- Drehzapfenabstand 20,0m
- Radsatzabstand im Drehgestell 2.500mm
- Leergewicht gemäß DIN25008 48t
- Radsatzlast maximal 17t
- Batteriespannung 24V +/- 30%
- Bestuhlung (ca. 40% Reihenbestuhlung) 2+2
- Sitzplatzanzahl gesamt 114
- Sitzbreite mind. 450mm
- Gangbreite ca. 520mm
- Sitzteiler, Fensterteiler 1.800mm
- Raumhöhe Fahrgastabteil 2.010mm
- Fenstergröße Fahrgastabteil 1.400 x 800mm
- Türbreite (lichte Weite) 1.400mm



Abb. 14 Bestuhlung in oberer Etage [11]



Abb. 15 Bestuhlung in unterer Etage [11]

Weitere Daten eines Doppelstockwagens:

## • Sitzplätze:

Doppelstock-Steuerwagen: 102 Sitzplätze (davon 6 Klappsitze)

Doppelstock-Zwischenwagen: 114 Sitzplätze

Doppelstock-Zug (5 Wagen): 558 Sitzplätze (davon 6 Klappsitze)

In einem Steuerwagen kann sich auch ein Mehrzweckabteil befinden, welches für den Fahrradtransport benutzt wird. Dadurch reduziert sich die Sitzplatzzahl in einem 5-Wagen-Zug um 8 Plätze auf 550 Sitzplätze (davon 30 Klappsitze).

## Sitzplatzabstand:

Gegenüber: 1800mm

Hintereinander: 900 mm bzw. 875 mm

- Tiefeinstieg in das Untergeschoss - Barrierefrei zugängliche und breite Einstiege mit einer Einstiegshöhe von 605mm über Schienenoberkante
- Luftheizung mit Temperaturabsenkanlage
- WC-Anlage: geschlossenes System, eines pro Wagen
- Reine Nichtraucherfahrträume
- Integrierte Deformationszonen schützen den Fahrgast bei Zugunfällen
- In Zukunft: Behindertengerechter Einbau der Toiletten und einer Auffahrrampe

[8], [11], [13]

Das Klima in einem Reisewagen wird mit Hilfe einer Heizungs- und Klimaanlage automatisch gesteuert, wobei die Energieversorgung direkt von der Zugsammelschiene erfolgt. Abhängig von der Versorgungsspannung wird die Zugsammelschiene mit einer 1.000 Volt Nennwechselspannung der Frequenz von 16,7 Hz bzw. 50Hz gespeist.

Die Heizungsanlage ist als Einkanalluftheizung ausgeführt, wobei eine Temperaturabsenkanlage (TAA), ein Kaltdampfsystem und eine Direktverdampfung inkludiert sind. Die umgewälzte Luftmenge wird in Abhängigkeit von der Außentemperatur geregelt, wobei die Frischluft über Filter im Dachbereich angesaugt wird. Die Umluft wird hingegen im Heizungsbetrieb aus dem Treppenbereich entnommen. Die Temperaturabsenkanlage wird grundsätzlich im Mischluftbetrieb betrieben, jedoch wird im Vorheiz- und Vorkühlbetrieb und bei tiefen Außentemperaturen auf Umluft umgeschaltet. Das System besitzt zwei getrennte Luftaufbereitungsanlagen, bestehend aus je einem Heizung/Lüftungsaggregat und einem Verdampferaggregat. Ein Kälteaggregat ist jeweils am Wagenende situiert. Die Energieversorgung der Lüfter erfolgt jeweils über einen spannungs- und frequenzvariablen

Umrichter. Als Kältemittelkompressor kommt ein vollhermetischer Schraubenverdichter zum Einsatz. Die Heizungs-/Lüftungsaggregate, sowie die Verdampfungsaggregate sind im Dachbereich an beiden Wagenenden angeordnet, wodurch Wartungsarbeiten von außen her durchgeführt werden können. Das Kälteaggregat in Schrankform ist ebenfalls an beiden Wagenenden angeordnet und von außen für Reinigung- und Wartungsarbeiten zugänglich. Das Heizungssystem wurde von der Firma Friedmann/Liebherr und das Kältesystem von der Firma Sütrak entwickelt. In der Praxis hat sich gezeigt, dass kleine Probleme entstehen können, weil beide Systeme von verschiedenen Firmen stammen. Dadurch fallen die optimale Zusammenarbeit der Systeme und die ideale Energienutzung schwieriger aus. [8]

#### **2.2.4. Energieversorgung des Doppelstockwagens**

Die Energieversorgung der Verbraucher innerhalb eines Doppelstockwagens erfolgt über eine einphasige Zugsammelschiene, mit einer Nennwechselspannung von 1.000 Volt. Diese Spannung wird von der Energieversorgungsanlage (EVA) in ihrem Spannungsniveau und/oder Frequenz umgeformt und an den Ausgängen in geeigneter Spannung und Frequenz den verschiedenen Verbrauchern bereitgestellt. Ein Netzleistungsfaktor von zirka 0,95 bei Vollbetrieb der Heizung und zirka 0,65 ohne Heizung wird erreicht. Im Hochspannungsschrank werden die Spannungen auf die einzelnen Verbrauchern verteilt. Im unteren Teil des Hochspannungsschranks (Abb. 16) hinter einer Plexiglasabdeckung befindet sich ein Spannungsumwandler und eine Trenn- und Erdungseinrichtung (TEE). Die TEE ist eine Galvanische Kopplung und gewährleistet eine sichere Trennung der Hochspannungsstromkreise mit bzw. von der Zugsammelschiene. Mit Hilfe des Spannungsumwandlers wird die Hochspannung von 1.000V auf niedrigere Spannungen für die einzelnen Verbraucher umgewandelt. Die beiden Türen des Hochspannungsschaltgeräteschranks sind mit einem Vierkantschlüssel zu öffnen. Die obere Tür lässt sich jedoch nur dann öffnen, wenn die Trenn- und Erdungseinrichtung in der Erdstellung steht, wodurch der gesamte Doppelstockwagen geerdet ist. Zur weiteren Sicherheit kann die TEE bei offener oberer Tür nicht betätigt werden.



Abb. 16 unterer Teil des Hochspannungs-Schaltgeräteschranks

Die Energieversorgungsanlage des Doppelstockwagens kann nur eine Wechselspannung von 1.000V in zwei unterschiedlichen Frequenzen verarbeiten. Das Versorgungsnetz der ÖBB basiert für den Betrieb auf einer Frequenz von 16,7 Hz. Daher tritt diese Frequenz im Doppelstockwagen auf, wenn die Energieversorgung durch eine elektrische Lokomotive aus dem ÖBB-Netz vorhanden oder der Doppelstockwagen an eine Vorheizanlage auf den elektrifizierten Strecken angeschlossen ist. Eine Frequenz von 50 Hz ist durch eine ÖBB-Diesel-Lokomotive der Baureihe 2016 vorhanden oder wenn der Doppelstockwagen mit einer elektrischen Lokomotive im Betrieb der Raaberbahn AG gewesen ist. Die Strecke der Raaberbahn auf der der Doppelstockwagen vor allem eingesetzt wurde, führt von Ebenfurt in Niederösterreich nach Sopron in Ungarn.

Wird durch die Zugsammelschiene eine andere Spannungsform verteilt (beispielsweise Gleichspannung oder nicht sinusförmigen Spannungen), kann es zur Beschädigung der Anlage oder sogar zu Personenschäden führen.

Die Ausgangsspannungen für die Verbraucher sind wie folgt:

- 4x 1.000V 16,7 oder 50 Hz für Hochspannungsheizung
- 2x 230V 16,7 oder 50 Hz für Niederspannungsheizung
- 3x 300V 65 Hz, f/U-variabel,  
Pulsweitenmodulation (PWM), du/dt-Filter Drehrichter 1 (DR1) für  
Luftbehandlungsaggregat

- 3x 400V 50 Hz, PWM, du/dt-Filter
- 1x 340V 16,7 oder 50 Hz
- 3x 322V 70 Hz, f/U-variabel, PWM, du/dt-Filter
- 24V Batterieladung

Drehrichter 2 (DR2) für  
Führerstandsklimagerät  
(nur im Steuerwagen)  
für Kälteumrichter - Drehrichter  
Kälte (DRK)  
DRK für Temperaturabsenk-  
anlage (TAA)  
Batterieladung und Bordnetz

[8], [5]

## 3. Messdatenerhebung

### 3.1. Messdaten

Bei den Messdaten, die im Doppelstockwagen erfasst wurden, handelt es sich um Temperatur- und Energiedaten. Diese Daten wurden in einem Zeitraum von 14 Monaten (7. Mai 2008, 13:25 bis 30. Juni 2009 um 21:30 Uhr) gesammelt und gespeichert.

#### 3.1.1. Energiedaten

Um Energiedaten eines im Einsatz befindlichen Doppelstockwagens analysieren zu können, ist es notwendig, diese aufzuzeichnen. Diese Daten werden mit Hilfe eines Energiezählers, welcher speziell für den Schienenverkehr entwickelt wurde, mit der Bezeichnung EM4T (Energy Meter For Traction) der Firma LEM festgehalten. Der Energiezähler speichert die aufgenommene und rückgespeiste Energie, zusammen mit der Uhrzeit und Ereignissen wie beispielsweise einem Netzwechsel. Das Gerät hat eine Genauigkeitsklasse 0,5%. Der Energiezähler wurde von den ÖBB in den Hochspannungs-Schaltgeräteschrank eingebaut, und misst den Gesamtenergieverbrauch des Doppelstockwagens in Abständen von einer Minute. In diesem Verbrauch wird nicht nur die Heizung und die Kühlung betrachtet, sondern auch die Beleuchtung, die Lüftung und alle weiteren Energieverbraucher im Doppelstockwagen. Deshalb ist speziell bei den Auswertungen zu achten, dass die Energiedaten größtenteils den Verbrauch für die Klimatisierung darstellen, aber auch andere Verbraucher die Energiedaten beeinflussen. [20]

Der Energiezähler ist so eingestellt, dass er nur Energiemengen bei Versorgung mit einer Frequenz von 16,7 Hz aufzeichnet, was der Frequenz vom ÖBB-Bahnstromnetz (15 kV, 16,7 Hz) entspricht. Es besteht auch die Möglichkeit, dass der Doppelstockwagen mit einer Frequenz von 50Hz versorgt wird. Dies ist zum Beispiel im Bahnstromnetz der Raaberbahn (25 kV, 50 Hz) der Fall sowie bei Fahrten mit der ÖBB-Diesel-Lokomotive der Baureihe 2016. Bei Betrieb des Doppelstockwagens in diesen Regionen zeichnet der Energiezähler daher keine Messwerte auf, wodurch bei diesen Fahrten keine Rückschlüsse auf den jeweiligen Energieverbrauch gezogen werden können.

Im Schrank befinden sich auch die 70A-Hauptsicherung für den Hochspannungstrafo und der Energiezähler, welcher direkt auf der Seitenwand des H2 Schrankes montiert ist. Dabei ist der

Energiezähler im Schaltkreis des Hochspannungsschranks zwischen dem Spannungsumwandler und dem Stromwandler positioniert.

Der Energiezähler benötigt eine Versorgung von 24V/DC. Dabei wurde die Energieversorgung des Händetrockners und des elektrischen Wasserauslasses der Toilette herangezogen.

### 3.1.2. Temperaturdaten

Bei den Temperaturdaten handelt es sich um die Aufzeichnung zweier verschiedener Temperaturen, nämlich der Umlufttemperatur, diese stellt die Temperatur im Wageninneren dar, und der Frischlufttemperatur, welche die Außentemperatur widerspiegelt. Um diese aufzeichnen zu können, wurden zwei Temperaturlaufzeichnungsgeräte mit USB-Schnittstelle an zwei unterschiedlichen Stellen im Wagon positioniert. Bei den Temperaturfühlern handelt es sich um ein Luftfeuchte-, Temperatur- und Taupunkt-USB-Datenerfassungsgerät mit der Bezeichnung EL-USB 2 der Firma Lascar Electronics (siehe Abb. 17). Dieses Gerät misst eine Temperatur in einem Messbereich von  $-35^{\circ}$  bis  $+80^{\circ}\text{C}$  und eine relative Luftfeuchte in einem Bereich von 0 bis 100%. Die Genauigkeit der Temperaturmessung beträgt minimal  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  und maximal  $\pm 2,5^{\circ}\text{C}$ . Die Daten werden direkt im Temperaturfühler gespeichert, welcher eine Speicherkapazität von je 16.383 Werten aufweist. Die Erfassungsrate und die Startzeit können durch anschließen an einem Computer mit Hilfe der Kontroll-Software EasyLog jederzeit eingerichtet oder verändert werden. Die Energieversorgung des Datenerfassungsgerätes ist durch eine Batterie, welche Aufzeichnungen bis zu einem Jahr ermöglicht, gewährleistet. [18]

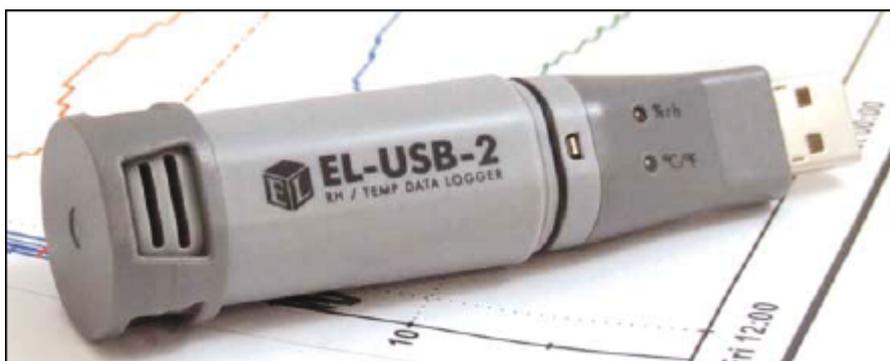


Abb. 17 Temperaturfühler zur Messung von Temperatur und relativer Luftfeuchte, welcher im Doppelstockwagen zur Erfassung der Frisch- und Umlufttemperatur eingebaut wurde. [18]

Der Temperaturfühler, welcher die Frischlufttemperatur erfasst, ist über dem WC im Frischluftkanal positioniert und in Abb. 18 ersichtlich. Die Ansaugung der Frischluft erfolgt hingegen im Dachbereich (siehe Abb. 19).



Abb. 18 Frischlufttemperaturfühler über dem WC



Abb. 19 Frischluftansaugung an der Außenseite eines Doppelstockwagens

Der zweite Temperaturfühler befindet sich im Umluftkanal und hat seinen USB-Anschluss über der abgehängten Decke im Gangbereich vor dem WC (siehe Abb. 20 und Abb. 21). Grundsätzlich wird die Temperaturabsenkanlage im Mischluftbetrieb betrieben. Der Anteil der

Frischlufte ist aber immer höher als der Anteil der Umlufte, um eine ausreichende Sauerstoffzufuhr gewährleisten zu können. Im Vorheiz- oder Vorkühlbetrieb und bei tiefen Außentemperaturen wird aber vor allem in den ersten fünf bis zehn Minuten der Anteil der Umlufte wesentlich erhöht, um weniger Energie für die Klimatisierung des Innenraums zu verbrauchen. Danach stellt die automatische Klimasteuerung auf Mischluftebetrieb zurück. Die Umlufte wird aus dem Treppenhaus des Doppelstockwagens entnommen. Die Innentemperatur wird im Werk für den Wagen separat eingestellt. Diese kann aber vom Zugbegleiter während der Fahrt jederzeit korrigiert oder neu eingestellt werden. Die einzelnen Temperaturwerte werden bei beiden Fühlern alle fünf Minuten aufgezeichnet und im Datenerfassungsgerät gesichert.



Abb. 20 Gangbereich vor WC



Abb. 21 Umluftenergiefühler

### 3.1.3. Einsatzdaten

Die Einsatzdaten sind eine Dokumentation jeder Fahrt des Doppelstockwagens und stellen dar, welche Zugfolge der Wagen jeden Tag gehabt hat. Weiters umfassen sie den Zeitpunkt der Abfahrt, der Ankunft, die Kilometeranzahl der zurückgelegten Strecke, den Abfahrtsbahnhof, den Ankunftsbahnhof, die Zugnummer des Zugverbandes in dem der Doppelstockwagen gefahren ist und die Wagennummer. Diese Daten sind für die Energiebedarfsanalyse ebenfalls von großer Bedeutung, da dadurch genau herausgelesen werden kann, ob der Doppelstockwagen in Betrieb gewesen ist oder nicht. Die Einsatzdaten stellen Ist-Daten des Doppelstockwagens dar und wurden von den Österreichischen Bundesbahnen erstellt.

## 3.2. Auslesung der Daten

Die einzelnen Messeinrichtungen im Doppelstockwagen arbeiten eigenständig und legen die erfassten Werte in interne Speicher ab. Diese haben nur eine begrenzte Speicherkapazität, welcher nicht für die gesamte Messdauer ausreicht, weshalb eine periodische Auslesung notwendig ist. Diese wird in regelmäßigen Abständen von zirka 3 bis 4 Wochen durchgeführt.

Die Aufzeichnungen der Temperaturdaten erfolgen mit Hilfe eines Temperaturfühlers mit USB-Anschluss. Zum Auslesen wird ein Laptop mit dem Kontrollprogramm „EasyLog“ angeschlossen und die Temperaturdaten werden durch das Programm auf den Laptop übertragen und gleichzeitig mit Hilfe eines Diagramms auf deren Fehlerfreiheit überprüft. Die gesammelten Daten werden als txt-Datei, welche die Temperaturwerte im fünf Minuten Rhythmus beinhaltet, gespeichert. Anschließend wird der Temperaturfühler neu formatiert, sodass neue Daten vom Auslesezeitpunkt an wieder aufgezeichnet werden können.

Der Auslesevorgang der Energiedaten erfolgt über den Energiezähler. Dieser ist im Hochspannungsschrank, ersichtlich in Abb. 22, eingebaut. Um Zugriff auf den Energiezähler zu bekommen, muss die untere Klappe im Hochspannungsschrank geöffnet werden, um dort den Zugheizungshauptschalter auszuschalten, wodurch der gesamte Wagen geerdet wird. Danach kann die obere Klappe aufgemacht werden, wo an der Seitenwand der Energiezähler positioniert ist. Die Energiedaten werden einmal pro Minute aufgezeichnet und im Energiezähler abgespeichert. Das Gerät speichert die Daten über einen Zeitraum von 3 Wochen, darüber hinaus werden die abgelegten Daten überschrieben. Nachdem der Wagen nicht immer zur Auslesung in Wien zur Verfügung stand, ergaben sich zwangsweise Aufzeichnungslücken. Dies ist in Abb. 23 ersichtlich. Diese Abbildung zeigt einen Kalender der Energiedaten über den kompletten Messzeitraum, von Mai 2008 bis Juni 2009. Darin ersichtlich sind gelb und weiß gekennzeichnete Tage. Die gelben Felder stellen einen Tag dar, an dem Energieverbrauchsdaten vorhanden sind. An weiß markierten Tagen ist dies nicht der Fall. Weiters enthalten manche Tage eine Uhrzeit, welche die Anfangs- oder die Endzeit der Energiemessung widerspiegelt. In Abb. 23 werden die Aufzeichnungslücken genau ersichtlich und es ist dadurch erkennbar an wie vielen Tagen im Monat Energiedaten existieren.



Abb. 22 Energiezähler

Die Datenübertragung für die Ablesung des Energiezählers erfolgt über eine galvanisch getrennte, serielle Schnittstelle, die auf der Frontplatte angebracht ist. Die Energiedaten werden mittels im Laptop als ASCII Zeichencodes in einer dat-Datei abgespeichert. [21]

Kalender von Energiedaten von Mai 2008 bis Juni 2009

	26 Tage	20 Tage	27 Tage	16 Tage	22 Tage	25 Tage	22 Tage	26 Tage	13 Tage	19 Tage	16 Tage	16 Tage	15 Tage
5 Tage	26 Tage	20 Tage	27 Tage	16 Tage	22 Tage	25 Tage	22 Tage	26 Tage	13 Tage	19 Tage	16 Tage	16 Tage	15 Tage
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19
20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23
24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26
27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28
29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29
30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31

Abb. 23 Zeittafel über die Aufzeichnung der Energiedaten

Zeichenerklärung:

- Messungen der Energie
- keine Messungen der Energie

z.B. 04:01 .....Anfangs- oder Enduhrzeit der Energiemessungsaufzeichnung

## 4. Datenformat der Messdaten

Als Beispiel für die verschiedenen Datensätze, werden ein Tag im Winter bzw. ein Tag im Sommer, aus dem betrachteten Zeitraum von 14 Monaten herangezogen und dargestellt.

Sommertag = 16.07.2008

Wintertag = 20.01.2009

### 4.1.1. Energiedaten

```

Date: 2008/06/10 10:10                                EMRO Version: 1.9

Device Address: 0x07250002                            Statusword: 0x0000                            Device ID: V1.33_LEM
Train Number: 0x11223344                             Functional Error: 0x00000000                 Manufacturer ID: LEM
Vehicle Number: 0x00556677                           Registration Period [min]: 1                  Program Version: 0x9620

Rated Voltage                                         Parameterisation
Phase 1 50 Hz [V]: 200                               Std. Data Record: 0x1F3F0F00
Phase 1 16 2/3 Hz [V]: 100                          Parameter Record 50: 0x008F003F
Phase 1 DC [V]: 200                                 Parameter Record 51: 0x05050400
Phase 2 DC [V]: 200                                 Parameter Record 52: 0x00020100
                                                    Parameter Record 53: 0x01F403E8
                                                    Parameter Record 54: 0x00563A98
                                                    Parameter Record 55: 0x00000001

Rated Current
Phase 1 50 Hz [mA]: 1000
Phase 1 16 2/3 Hz [mA]: 1000
Phase 1 DC [mA]: 1000
Phase 2 DC [mA]: 1000

Instr. Transformer Ratios
Channel 1: 1,0000000E+1
Channel 2: 1,0000000E+2
Channel 3: 1,0000000E+0
Channel 4: 1,0000000E+0

Load profiles from 2005/07/07 11:00 to 2008/06/10 10:02

Date          Time          1.08 [MWh] 2.08 [MWh]    3.08 [Mvarh] 4.08 [Mvarh] 34.04 [Hz]
27.05.2008   04:01:00    0,068      1,448          0             0,344
27.05.2008   04:02:00    0,068      1,448          0             0,344
27.05.2008   04:03:00    0,068      1,448          0             0,344
27.05.2008   04:04:00    0,068      1,448          0             0,344

```

Abb. 24 Auszug aus den aufgezeichneten Informationen der Energiemessung im dat-Format

Abb. 24 zeigt den Beginn einer dat-Datei, welche in ASCII Zeichencodes abgespeichert ist und in der die einzelnen Spalten jeweils durch Tabulatoren getrennt sind. Die ersten 27 Zeilen enthalten allgemeine Informationen, die bei der Energiemessung zusätzlich aufgezeichnet wurden. Erst ab der 28. Zeile werden die Energiedaten mit Datum, Uhrzeit (im Abstand von einer Minute) und dem Energiewert dargestellt. Für die Energiemessung sind nur der Werte in der rot umrandeten vierten Spalte und die blau eingefasste Frequenz von 16,7Hz, wenn

vorhanden ausschlaggebend. Der Energiewert wird in der Einheit Megawattstunden (MWh) angegeben und entspricht der im 1-Minuten-Intervall verbrauchten Energie. Der Wert in der dritten Spalte ist ein gleichbleibender Energiewert, der für Auswertungen nicht in Betracht gezogen wird. Die Spalten fünf und sechs stellen konstante Blindenergien dar, die ebenfalls in der Analyse nicht berücksichtigt werden.

16.07.2008	09:30:00	0,068	2,948	0	0,945	16
16.07.2008	09:31:00	0,068	2,948	0	0,945	16
16.07.2008	09:32:00	0,068	2,948	0	0,945	16
16.07.2008	09:33:00	0,068	2,948	0	0,945	16
16.07.2008	09:34:00	0,068	2,948	0	0,945	16

Abb. 25 Energiedaten an einem typischen Sommertag mit einem konstantem Energiewert

Die vierte Spalte in Abb. 25 zeigt den Energiewert mit einem Wert von 2,948 MWh. Da die Abbildung nur einen kurzen fünfminütigen Auszug aus den auszuwertenden Daten wiedergibt, ist in dieser Abbildung der Energiewert konstant. Einerseits könnte es sein, dass genau zu dieser Zeit keine Energie verbraucht wurde. Andererseits ist es aber auch möglich, dass der Energiezähler einen gleichbleibenden Wert aufzeichnete, obwohl ein Energieverbrauch vorhanden gewesen ist. Diese Situation tritt dann auf, wenn die Energieversorgung des Doppelstockwagens zum Zeitpunkt der Messwertaufnahme von einem Netz mit einer Frequenz von 50Hz erfolgte, da in diesem Fall der Energiezähler den Verbrauch nicht registrierte. In der siebten Spalte (blau umrandet) kann man die Frequenz von 16,7Hz der Spannung erkennen. Dieser Wert bedeutet, dass die Energieversorgung durch das ÖBB-Bahnnetz vorhanden gewesen ist, und dass die Energie durch den Energiezähler aufgezeichnet und gespeichert wurde.

20.01.2009	00:00:00	0,068	55,377	0,003	10,251	16
20.01.2009	00:01:00	0,068	55,378	0,003	10,251	16
20.01.2009	00:02:00	0,068	55,378	0,003	10,251	16
20.01.2009	00:03:00	0,068	55,379	0,003	10,251	16
20.01.2009	00:04:00	0,068	55,379	0,003	10,251	16

Abb. 26 Energiedaten an einem typischen Wintertag mit einem fortlaufendem, steigendem Energiewert

Die vierte Spalte in Abb. 26 zeigt den ansteigenden Energiewert beginnend bei 55,377 MWh. Dies sagt aus, dass der Doppelstockwagen zu angegebenen Zeitpunkten Energie verbraucht hat, und diese vom Energiezähler festgehalten wurde.

### 4.1.2. Temperaturdaten

```
EasyLog USB,Time,Celsius(°C),High Alarm,Low Alarm,Humidity(%rh),High Alarm rh,Low
Alarm rh,dew point(°C),Serial Number
2560,16/05/2008 10:37:31,22.0,50.0,-20.0,37.5,80.0,20.0,6.8
2561,16/05/2008 10:42:31,22.0,50.0,-20.0,37.5,80.0,20.0,6.8
```

Abb. 27 Auszug aus den aufgezeichneten Informationen der Temperaturmessung im txt-Format

Abb. 27 zeigt den Beginn einer txt-Datei der Temperaturdaten, welche in ASCII Zeichencodes gespeichert wurde. Die einzelnen Spalten sind jeweils durch einen Beistrich voneinander getrennt. Die Daten wurden durch ein Luftfeuchte-, Temperatur- und Taupunkt USB-Datenerfassungsgerät aufgezeichnet und mit dem Programm „EasyLog“ heruntergeladen. Die erste Zeile zeigt die Beschriftung der einzelnen Spalten mit

- dem Namen des Kontrollprogrammes,
- der Art der Schnittstelle,
- dem Zeitpunkt der Messung (in Datum und Uhrzeit),
- der Temperatur in °C,
- der oberen benutzerprogrammierten Alarmgrenzen für die Temperatur,
- der unteren benutzerprogrammierten Alarmgrenzen für die Temperatur,
- der Luftfeuchte,
- der oberen benutzerprogrammierten Alarmgrenzen für die Luftfeuchte,
- der unteren benutzerprogrammierten Alarmgrenzen für die Luftfeuchte und
- den errechneten Taupunkt durch das Programm „EasyLog“ an.

Die erste Spalte enthält eine fortlaufende Nummerierung der Zeilen. Danach werden das Datum, die Uhrzeit (in 5 Minutensprüngen) und die Temperatur in Grad Celsius dargestellt. Alle anderen Daten sind für die Energiebedarfsanalyse irrelevant.

```
22,16/07/2008 11:57:22,33.5,50.0,-20.0,33.5,80.0,20.0,15.2
23,16/07/2008 12:02:22,33.5,50.0,-20.0,32.0,80.0,20.0,14.5
24,16/07/2008 12:07:22,34.0,50.0,-20.0,30.0,80.0,20.0,14.0
25,16/07/2008 12:12:22,34.5,50.0,-20.0,29.5,80.0,20.0,14.1
26,16/07/2008 12:17:22,34.5,50.0,-20.0,32.0,80.0,20.0,15.4
```

Abb. 28 Frischluftdaten eines typischen Sommertags

Die vierte Spalte in Abb. 28 zeigt den Frischluftwert mit einem Wert zwischen 33,5 und 34,5 °C an.

```

5598,16/07/2008 00:01:00,23.5,60.0,-20.0,44.5,80.0,20.0,10.7
5599,16/07/2008 00:06:00,23.5,60.0,-20.0,44.5,80.0,20.0,10.7
5600,16/07/2008 00:11:00,23.0,60.0,-20.0,44.5,80.0,20.0,10.3
5601,16/07/2008 00:16:00,23.0,60.0,-20.0,45.0,80.0,20.0,10.4
5602,16/07/2008 00:21:00,23.0,60.0,-20.0,45.0,80.0,20.0,10.4

```

Abb. 29 Umluftdaten eines typischen Sommertags

Die vierte Spalte der Abb. 29 zeigt den Umluftwert mit einem Wert von 23,5 und 23,0 °C an.

### 4.1.3. Einsatzdaten

Datum	Zugnr	Bsc	Ank	Abf	Km	Wgn_abf	Wgn_ank
02.01.2009	2221	Mi	08:45:00		98317		50812633069
02.01.2009	2221	S		07:02:00		0 50812633069	
02.01.2009	2222	Mi		09:45:00		0 50812633069	
02.01.2009	2222	R	11:12:00		90575		50812633069
02.01.2009	2241	Mi	13:45:00		90575		50812633069
02.01.2009	2241	R		12:18:00		0 50812633069	

Abb. 30 Auszug aus den aufgezeichneten Informationen der Einsatzdaten im xls-Format

Die Einsatzdaten werden in einer Excel-Datei abgespeichert und wurden von den ÖBB monatsweise zur Verfügung gestellt. Abb. 30 zeigt die ersten sieben Zeilen aus einer Excel-Datei, in der die Einsatzdaten des Doppelstockwagens aufgezeichnet wurden. Die erste Zeile zeigt die Bezeichnungen der einzelnen Spalten. Zu Beginn wird das Datum dargestellt, an welchem Tag der Doppelstockwagen im Einsatz gewesen ist. Dem Doppelstockwagen wird bei jeder Fahrt eine vierstellige Zugnummer zugewiesen, die in der zweiten Spalte eingetragen ist. Eine Fahrt wird durch jeweils zwei Zeilen mit ein und derselben Zugnummer beschrieben. Alle weiteren Daten für die einzelne Fahrt setzen sich aus den Angaben der einzelnen Spalten zusammen. Dabei zeigt die dritte Spalte das Kürzel des Abfahrts- und Ankunftsbahnhofes, beispielsweise Mi für Wien Meidling, an und die vierte und fünfte Spalte die Ankunfts- und Abfahrtszeit. Des Weiteren ist in der Datei in der sechsten Spalte genau vermerkt, welche Strecklänge der Doppelstockwagen während einer Fahrt zurückgelegt hat. Dieser Wert wird für eine Fahrt jeweils in der Zeile der Ankunft eingetragen und hat beispielweise eine Länge von 98.317 Meter. Im Gegensatz zu der lauteten Überschrift der Spalte sechs entspricht die Einheit der Strecklänge nämlich Meter und nicht Kilometer. Die letzten beiden Spalten enthalten die 11stellige Wagennummer bei Abfahrt und bei Ankunft des Doppelstockwagens. Dieser Wert ist immer der Gleiche, da die Wagennummer zur Identifikation eines Wagens in der ÖBB-Verkehrsflotte verwendet wird.

19.01.2009	2410	Mi		15:33:00	0	50812633069	
20.01.2009	2347	F		16:08:00	0	50812633069	
20.01.2009	2347	Nb	17:15:00		58003		50812633069
20.01.2009	2356	F	18:49:00		58003		50812633069
20.01.2009	2356	Nb		17:40:00	0	50812633069	
20.01.2009	2359	F		19:08:00	0	50812633069	
20.01.2009	2359	Nb	20:15:00		58003		50812633069
20.01.2009	2368	Beh	22:57:00		128440		50812633069
20.01.2009	2368	Nb		20:40:00	0	50812633069	
20.01.2009	2498	F	08:31:00		25993		50812633069
20.01.2009	2498	Fws		07:54:00	0	50812633069	
20.01.2009	2499	Fws	07:21:00		97731		50812633069
20.01.2009	2499	Laa		05:25:00	0	50812633069	
21.01.2009	2305	Beh		04:32:00	0	50812633069	

Abb. 31 Beispiel der Einsatzdaten

Abb. 31 zeigt ein Beispiel für die Einsatzdaten des Doppelstockwagens. Es ist in der Abbildung ersichtlich, dass der Doppelstockwagen am 20. Jänner 2009 für sechs Fahrten während des Tages im Einsatz gewesen ist. Die erste Fahrt an diesem Tag startete um 5:25 Uhr in Laa an der Thaya (Laa) mit der Zugnummer 2499 und dauerte bis 7:21 Uhr an, wo er nach 97,731km am Flughafen Wien Schwechat (Fws) ankam.

## 5. Analyse der Daten

Um eine Analyse der Zusammenhänge der einzelnen Daten (Temperatur-, Energie- und Einsatzdaten) zu erstellen, müssen diese gemeinsam betrachtet und ausgewertet werden. Für die Auswertungen wurde das Programm Matlab (Version 7.7.0.471 - R 2008b, September 17, 2008) verwendet. Matlab ist ein Programm zur Simulation und Analyse von dynamischen Systemen sowie zur Synthese von Regelungen. Es ist sehr effizient beim Umgang mit großen Vektoren. Aus diesem Grund wurde das Programm für die Auswertung der Daten gewählt.

Die Daten wurden in einem Zeitraum von 14 Monaten, vom Mai 2008 bis Juni 2009, erfasst. Da für den Mai 2008, aufgrund des Beginns der Datenerfassung am 27. Mai 2008, nur wenige Energiedaten vorhanden waren, wurde dieser Monat bei den Analysen nicht berücksichtigt. Des Weiteren wurde für manche Auswertungen auf ein Jahr zurückgerechnet, wodurch Jahreswerte ermittelt werden konnten. Diese Werte ermöglichen Hochrechnungen über eine Zeitspanne von mehreren Jahren bzw. können sie für die Betrachtungen weiterer Auswertungen herangezogen werden.

### 5.1. Aufbau der Datenbank

Die verschiedenen Daten aus dem Doppelstockwagen weisen eine unterschiedliche Formatierung auf (siehe Kapitel 4). Diese sollen in einer gemeinsamen Datenbank erfasst werden, um für diverse Analysen einen einfachen Zugriff auf all diese Daten zu ermöglichen. Die Referenz der Daten stellt die Zeit dar, welche durch die Einführung einer eigenen Zeitbasis für die Datenbank angezeigt wird. Die Datumszahl als Zeitbasis ist so definiert, dass sie am 1.1.2000 um 00:00:00 Uhr beginnt. Dies bedeutet, dass der 1.1.2000 den Referenzwert darstellt, und ab diesem Wert jeder Zeitpunkt als Differenz zum Referenzwert umgerechnet wird (Einheit: Minuten).

Der Grund für den Einsatz dieser Datumszahl ist die Notwendigkeit das Datum und die Uhrzeit gemeinsam durch einen einzigen Zahlenvektor auszudrücken und dadurch die Verwendung in Matlab vereinfachen zu können. Weitere Vorteile der Datumszahl sind der geringere benötigte Speicherplatz, die rasche Berechnung von Zeitdifferenzen und die einfache chronologische Anordnung. Ein Nachteil ist jedoch, dass die Datumszahl für den Menschen nur schwer interpretierbar ist und deshalb eine Rückrechnung auf eine gebräuchliche, für den Nutzer verständliche Schreibweise (Jahr – Monat – Tag – Stunde – Minute – Sekunde) notwendig ist. Für die chronologische Anordnung der Datumszahl wurde ein fünf Minuten Intervall gewählt,

da die Datenerfassung des Energieverbrauches in diesem zeitlichen Ablauf erfolgte. Um in der Datenbank die Temperaturwerte, die jede Minute aufgezeichnet wurden, den jeweiligen Energiewerten zuordnen zu können, mussten je fünf Messwerte zusammengefasst und anschließend gemittelt werden.

Beim Aufbau einer Datenbank wird zunächst deren Größe genau definiert. Die Festlegung der Größe erleichtert das Arbeiten mit Matlab enorm, da es ineffizient arbeitet, wenn große Vektoren um Elemente erweitert werden müssen. Daher wird zuerst die Größe der Datenbank bestimmt und anschließend die Daten elementweise an die richtige Stelle eingetragen. Da die Datenbank einer Matrix gleichkommt, werden die Zeilen und Spalten durch die einzelnen Werte der unterschiedlichen Daten dargestellt. Die Anzahl der Zeilen ergibt sich durch die Zeit, in der Werte aufgezeichnet wurden. Hierbei ist es wesentlich das Anfangs- und Enddatum von jedem Datensatz zu bestimmen, um den frühesten und den spätesten Zeitpunkt abgrenzen zu können. Diese Zeitangaben werden an erster bzw. letzter Stelle in die Datenbank eingetragen. Zwischen den beiden Stellen wird die Datumszahl aufsteigend in Abständen von jeweilig fünf Minuten eingegeben. Der Zeitraum der mit der fortlaufenden Datumszahl in der Datenmatrix abgedeckt wird, ist vom 7. Mai 2008 um 13:25:00 Uhr bis zum 30. Juni 2009 um 21:30:00 Uhr. Die Anzahl der Zeilen beträgt daher 120.770. Die Spalten der Datenmatrix ergeben sich durch gewählte Informationen, die sich in den Temperatur-, Energie- und Einsatzdateien befinden und durch errechnete Daten wie der Geschwindigkeit des Doppelstockwagens. Die Geschwindigkeit wurde errechnet indem die gefahrenen Kilometer pro Zugfahrt durch die einzelne Dauer einer jeden Zugfahrt dividiert wurden. Die gemessenen Daten des Doppelstockwagens werden anschließend nacheinander in die Datenbank eingespielt. Sind keine Daten zu den jeweiligen Zeitpunkten vorhanden, so werden an diese Stellen „Nan’s“ (Not a number) eingetragen. Dies kann vorkommen, da durch die Aufzeichnungslücken der Energiedaten oftmals keine Energiemessung stattgefunden hat, wobei jedoch Temperaturmessungen zu diesen Zeitpunkten existieren. Folglich erscheint zu diesem Zeitpunkt ein Wert, für beispielsweise die Frischlufttemperatur und eine „Nan“ für den Energieverbrauchswert. Die „Nan“ wurde gewählt, um bei den Auswertungen diese Stellen als ungültig zu erkennen. Die Anzahl der Spalten beträgt 12 und es befinden sich folgende Informationen des Doppelstockwagens darin:

- 1. Spalte = Datumszahl
- 2. Spalte = Zugnummer des Doppelstockwagens
- 3. Spalte = Abfahrtsbahnhof jeder einzelnen Zugfahrt
- 4. Spalte = Ankunftsbahnhof jeder einzelnen Zugfahrt

- 5. Spalte = Abfahrtszeit jeder einzelnen Zugfahrt
- 6. Spalte = Ankunftszeit jeder einzelnen Zugfahrt
- 7. Spalte = die gefahrenen Meter jeder einzelnen Zugfahrt
- 8. Spalte = gemessene Umlufttemperaturwerte (entspricht der Innentemperatur der Doppelstockwagens)
- 9. Spalte = gemessene Frischlufttemperaturwerte (entspricht der Außentemperatur)
- 10. Spalte = gemessener Energiewert des Doppelstockwagens
- 11. Spalte = errechnete Geschwindigkeit des Doppelstockwagens in km/h
- 12. Spalte = Frequenz der Energieeinspeisung

Die Datenbank ist die Grundlage für alle weiteren Analysen. Einzelne Daten werden aus der Datenbank herausgenommen und weiterbearbeitet.

## 5.2. Fahrbetrieb und Stehzeiten

Durch die Einsatzdaten ist der genaue Betrieb des Doppelstockwagens feststellbar. Es wird zwischen zwei Betriebsarten unterschieden, nämlich dem Fahren und dem Stehen. Diese Unterscheidung kann mit Hilfe der Berechnung der Geschwindigkeit, die sich in der Datenbank in der 11. Spalte befindet, getroffen werden. Die betrachtete Zeitspanne für den Doppelstockwagen ist vom 7. Mai 2008 13:25 Uhr bis zum 30. Juni 2009 21:30 Uhr. Für eine prozentuelle Darstellung der Fahr- und Stehzeiten des Doppelstockwagens pro Jahr werden folgende Gleichungen verwendet:

$$t_{B,Jahr} = t_B \cdot \frac{t_{Jahr}}{t_{gem}}$$

$t_{B,Jahr}$ .. Zeit im jeweiligen Betriebszustand pro Jahr

$t_B$ .... Zeit im jeweiligen Betriebszustand in der betrachteten Zeitspanne

$t_{gem}$ ... Gesamtzeit der betrachteten Zeitspanne (603.845 min)

$t_{Jahr}$ ... Gesamtzeit eine Jahres (525.600 min)

$$p = \frac{t_{B,Jahr}}{t_{Jahr}} \cdot 100\%$$

$p$ .... prozentueller Anteil des jeweiligen Betriebszustandes

### Fahrbetrieb

$$t_{Fahr,Jahr} = 175.315 \text{ min} \cdot \frac{525.600 \text{ min}}{603.845 \text{ min}} = 152.598 \text{ min}$$

$$p_{Fahr} = \frac{152.598 \text{ min}}{525.600 \text{ min}} \cdot 100\% \cong 29,0\%$$

### Stehzeit

$$t_{Steh,Jahr} = 428.530 \text{ min} \cdot \frac{525.600 \text{ min}}{603.845 \text{ min}} = 373.002 \text{ min}$$

$$p_{Steh} = \frac{373.002 \text{ min}}{525.600 \text{ min}} \cdot 100\% \cong 71,0\%$$

Das Resultat dieser Berechnungen ist ein Prozentsatz von 29,0% pro Jahr, die der Doppelstockwagen im Bahnnetz gefahren und 71,0% pro Jahr, die er still gestanden ist. Diese Prozentsätze zeigen, dass der Doppelstockwagen über das Jahr gesehen weniger gefahren ist als gestanden. Weiters wird durch eine zusätzliche Auswertung der Energiedaten verdeutlicht wie lange der Wagen in einem der beiden Betriebszustände gewesen ist und gleichzeitig der Energiezähler den Verbrauch gemessen hat. Diese Prozentsätze pro Jahr werden für beide Betriebsarten mit denselben Gleichungen wie in der vorigen Berechnung errechnet, indem nur die Eingangsdaten  $t_B$  und  $t_{gem}$ , welche durch eine Analyse der Datenbank ermittelt wurden, geändert werden. Die Ermittlung aus der Datenbank erfolgte für den Betriebszustand Fahren indem alle Energiedaten, die eine Geschwindigkeit aufweisen und bei einer Frequenz von 16,7 Hz gemessen wurden, bestimmt wurden. Die Energiedaten für den Betriebszustand des Stehens, wurden erhoben indem die Geschwindigkeit einen Wert von „Null“ aufweist und eine Frequenz von 16,7 Hz vorhanden gewesen ist.

### Fahrbetrieb und eine Spannung von 16,7Hz

$$t_{Fahr,Jahr} = 79.995 \text{ min} \cdot \frac{525.600 \text{ min}}{603.845 \text{ min}} = 69.629 \text{ min}$$

$$p_{Fahr} = \frac{69.629 \text{ min}}{525.600 \text{ min}} \cdot 100\% \cong 13,3\%$$

### Stehzeit und eine Spannung von 16,7Hz

$$t_{Steh,Jahr} = 132.495 \text{ min} \cdot \frac{525.600 \text{ min}}{603.845 \text{ min}} = 115.327 \text{ min}$$

$$p_{Steh} = \frac{115.327 \text{ min}}{525.600 \text{ min}} \cdot 100\% \cong 21,9\%$$

Das Resultat dieser Berechnungen ist ein Prozentsatz von 13,3% pro Jahr, die der Doppelstockwagen im Bahnnetz gefahren und 21,9% pro Jahr, die er still gestanden ist und der Energiezähler den Verbrauch aufgezeichnet hat. Diese Prozentsätze zeigen, dass sowohl weniger gefahren und gemessen wurde als auch, dass über das Jahr gesehen die Messungen des Doppelstockwagens einen geringen Anteil der Fahrten und der Stillstände ausmachen. Die Rückschlüsse, welche daraus gezogen werden können sind, dass der Energiezähler beim Fahren nur in etwa 46% der Zeit und beim Stehen in etwa 31% der Zeit aktiv gewesen ist. Den Rest der Zeit hat sich der Wagen im Einsatz befunden, jedoch liegen keine Energiemessungen für diese Zeiträume vor.

### 5.3. Temperaturdaten

Die Temperaturdaten, die im Doppelstockwagen durch Temperaturfühler aufgezeichnet wurden, entsprechen der Umlufttemperatur und der Frischlufttemperatur. Durch die Differenz der beiden Werte wird der Temperaturunterschied in Kelvin berechnet. Die Frischluft- und Umlufttemperaturen sind für Abb. 32 und Abb. 33 als Monatsmittelwerte, über den Zeitraum von 13 Monaten, dargestellt worden. Der Betrachtungszeitraum erstreckte sich vom Juni 2008 bis zum Juni 2009. Die Berechnung der Mittelwerte erfolgte über alle im fünfminütigen Abstand erfassten Werte eines Monats.

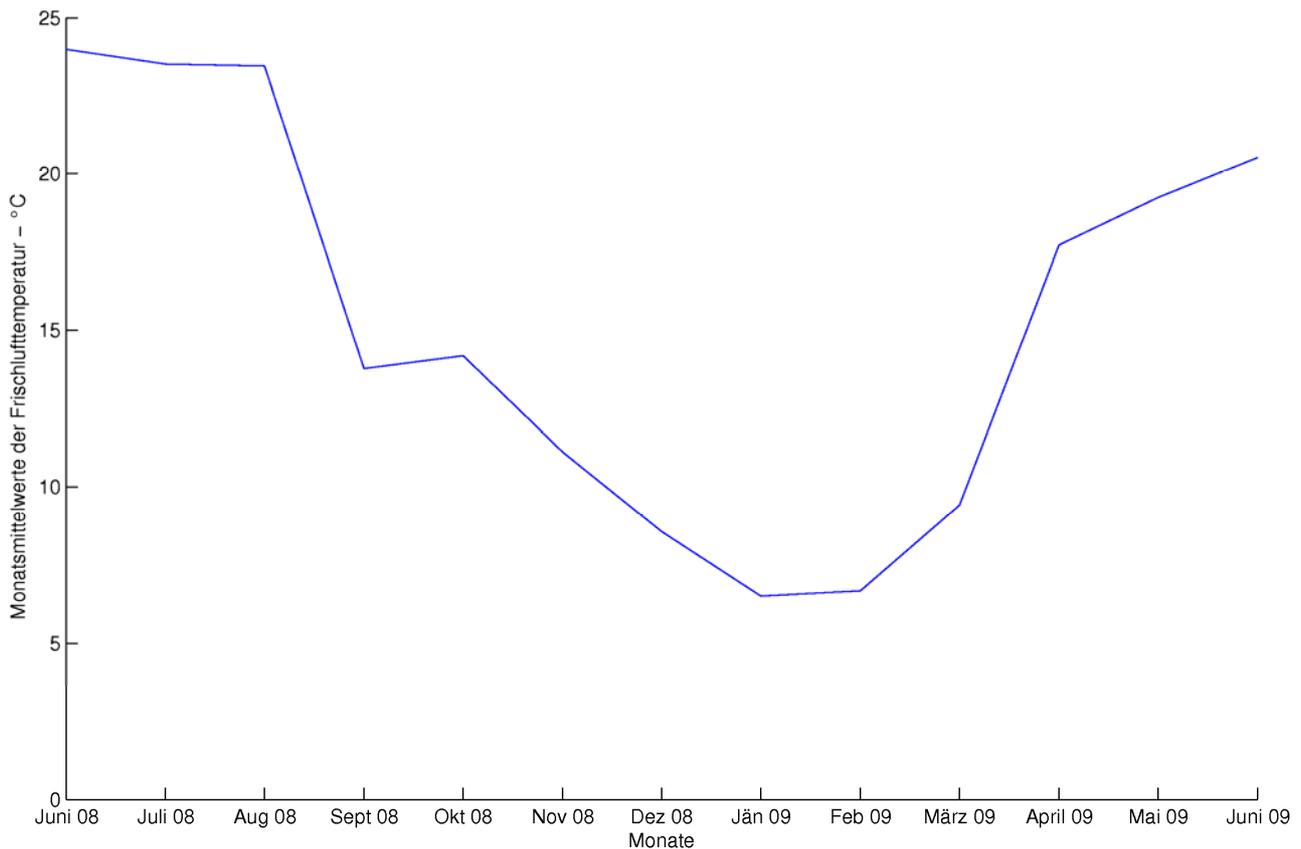


Abb. 32 Monatsmittelwerte der Frischlufttemperatur im Zeitraum von 13 Monaten

Die Kurve in der Abb. 32 zeigt, dass im Sommer 2008 der höchste Monatsmittelwert der Frischlufttemperatur  $T_F$  von zirka  $24^\circ\text{C}$  und im Winter 2008/09 der niedrigste von zirka  $6,5^\circ\text{C}$  aufgetreten ist. Diese Werte treten als Minimum im Jänner 2009 und als Maximum im Juni 2008 auf. Bei genauerer Betrachtung der zugrunde liegenden 5-Minuten-Frischlufftemperaturwerte zeigen sich des Öfteren größere Ausschläge hin zu höheren Temperaturwerten, speziell bei kalten Umgebungsbedingungen. Der Grund für diese Schwankungen wird in den Stehzeiten in Werkstätten oder unterirdischen Stationen vermutet. Beispielsweise in einer unterirdischen Station ist die Temperatur im Winter höher als außen. Dadurch spiegelt die Frischlufttemperatur nicht mehr die Außentemperatur wider, sondern die Stationstemperatur. Eine Verfälschung der Temperaturwerte tritt durch eine Wärmekopplung mit der Luft im Inneren des WC bei tiefen Temperaturen auf, da das WC, der Raum unter dem Frischluftkanal, geheizt wird und dadurch die Frischlufttemperatur womöglich steigt. Auch während den Fahrzeiten treten ständig wechselnde Temperaturen in den Aufzeichnungen auf. Diese sind auf unterirdische Fahrten zurückzuführen, da in den Tunneln die Luft durch die Wärmeabgabe der fahrenden Lokomotiven aufgeheizt wird. Durch all diese Einflüsse sind die Monatsmittelwerte, vor allem im Winter, höher als die tatsächliche Außentemperatur

ausgefallen (siehe Temperaturrückblick Jänner 2009 in [23]). Die Temperaturen werden jedoch für die Energiebetrachtungen verwendet, da durch die Temperaturschwankungen in den Stehzeiten, beispielsweise wegen eines Wagenaufenthalts in Werkstätten, der gesamte Einsatz des Doppelstockwagens widergespiegelt wird.

Die kälteste Außentemperatur wurde am 11. Jänner 2009 mit einem Fünfminutenwert der  $T_F$  von  $-6,5^\circ\text{C}$  aufgezeichnet. Das Maximum der gesamten Fünfminutentemperaturdaten beträgt  $44^\circ\text{C}$  und ist am 3. September 2008 aufgetreten.

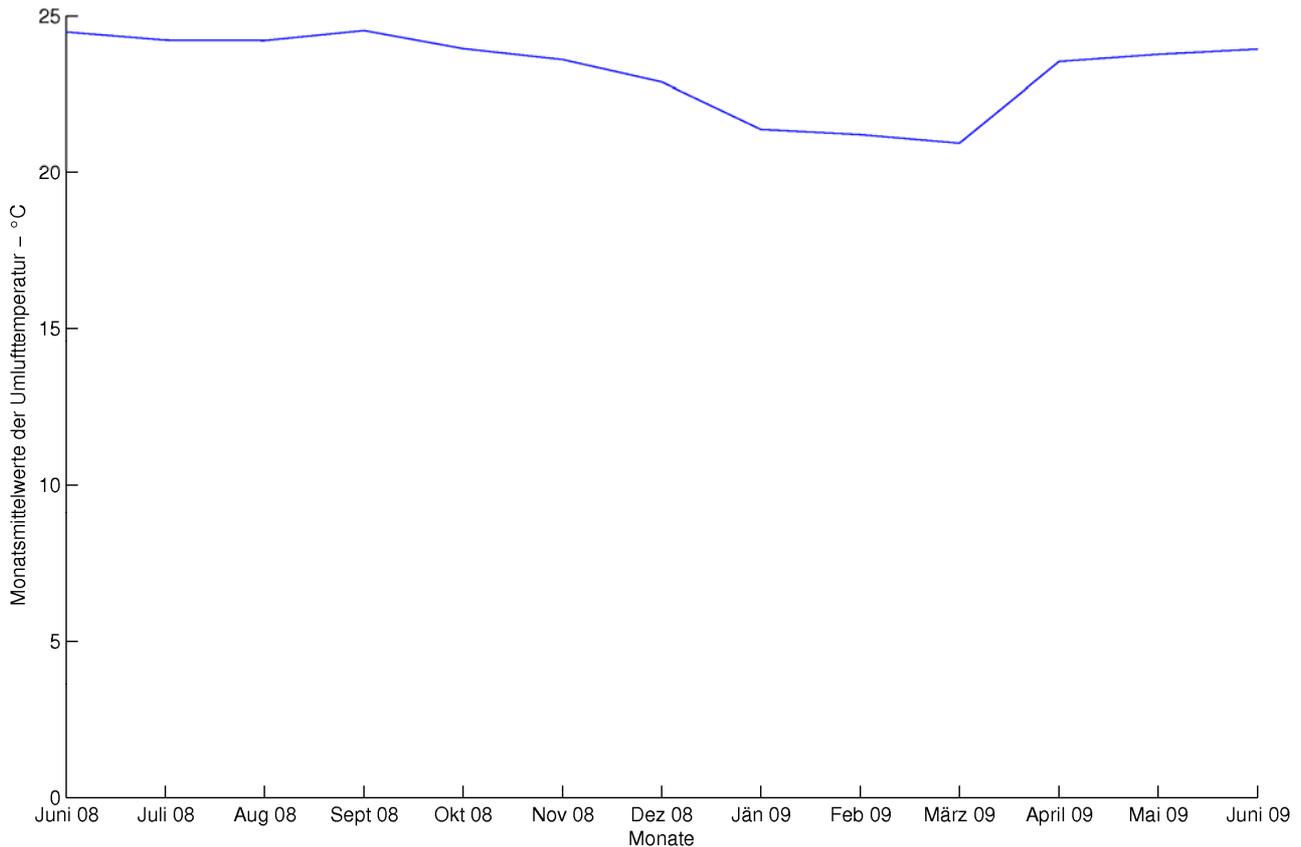


Abb. 33 Monatsmittelwerte der Umlufttemperatur im Zeitraum von 13 Monaten

In der Abb. 33 ist ersichtlich, dass im Doppelstockwagen im Mittel ein relativ konstanter Wert der Umlufttemperatur  $T_U$  vorhanden gewesen ist, da nur eine geringe Spannweite  $\Delta$  von  $3,6^\circ\text{C}$  besteht.

$$\Delta = \max(T_U) - \min(T_U)$$

Wobei der kleinste und der größte Wert der  $T_U$

- $20,9^\circ\text{C}$  als Minimum und
- $24,5^\circ\text{C}$  als Maximum betragen.

Diese Werte treten als Minimum im März 2009 und als Maximum im September 2008 auf. In der Kurve der Abb. 33 ist zu erkennen, dass in den Wintermonaten die Umlufttemperatur niedriger ist, als in den Sommermonaten. Diese wird für das Behaglichkeitsgefühl der Fahrgäste niedriger eingestellt, da im Winter die Reisenden mehr Kleidung tragen und deshalb der optimale Innentemperaturwert niedriger sein kann.

Der Mittelwert der  $T_U$  wurde durch die Fünfminutenwerte errechnet. Diese sind über den Zeitraum der 13 Monate fast durchgehend vorhanden. Es treten jedoch zwei Zeitabschnitte auf, in denen der Temperaturfühler im Umluftkanal defekt gewesen ist. Die erste Lücke der Umlufttemperaturdaten reicht von 26. August bis 11. September 2008. Der zweite Bereich an fehlenden Daten erstreckt sich von 1. bis 12. Jänner 2009. Diese nicht vorhandenen Daten haben auch Auswirkungen auf die Temperaturdifferenz, da diese durch die Subtraktion der Frischlufttemperatur  $T_F$  von der Umlufttemperatur  $T_U$  errechnet wird. Folglich hat die Temperaturdifferenz in den vorliegenden Lücken einen Wert von „Null“, da eine Berechnung nur dann erfolgte wenn Umluft- und Frischluftdaten vorhanden gewesen waren.

Das absolute Minimum der Umlufttemperaturwerte ist am 14. Februar 2009 mit einem Wert von 1°C. Das Maximum wurde am 27. Mai 2008 mit einer Temperatur von 39°C gemessen. Der Wagen befand sich zu diesen Zeiten im Betriebszustand des Stehens und der Innenraum kühlte sich ab bzw. heizte sich auf, aufgrund der entsprechenden Außentemperatur. Solche Werte sich im gesamten Messungszeitraum von 14 Monaten nur je einmal aufgetreten und wurden in den Analysen mitberücksichtigt.

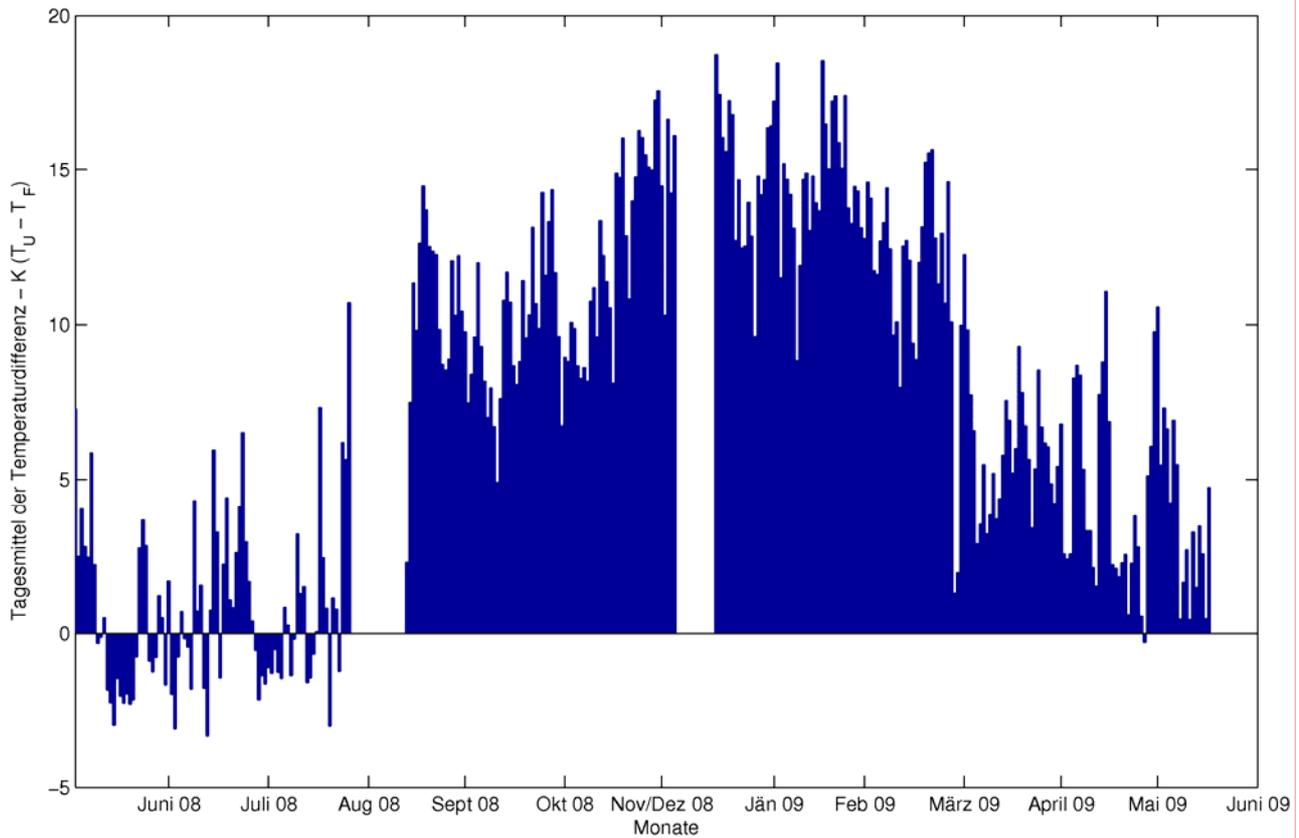


Abb. 34 Tagesmittel der Temperaturdifferenzen, welche durch Subtraktion der Frischlufttemperatur  $T_F$  von der Umlufttemperatur  $T_U$  berechnet wird, in Kelvin

In Abb. 34 sind die Tagesmittel der Temperaturdifferenzen ersichtlich. Diese werden berechnet, indem die Frischlufttemperatur  $T_F$  von der Umlufttemperatur  $T_U$  subtrahiert wird. Demzufolge bedeutet ein negatives Ergebnis, dass es außen heißer gewesen ist, als im Inneren des Doppelstockwagens, und ein positives Ergebnis, dass die Innentemperatur höher gewesen ist, als die Außentemperatur. Da der Anteil der positiven Temperaturdifferenzen überwiegt ist die Heizperiode im Doppelstockwagen ausgeprägter als die Kühlperiode. Nur an Tagen in den Monaten Juni bis August 2008 und Mai 2009 treten vermehrt negative Differenzen auf. Durch diese Werte ist darauf zu schließen, dass die Außentemperatur höher als die Innentemperatur und dass vor allem in diesen Tagen die Klimaanlage im Doppelstockwagen in Betrieb gewesen ist. Da es sich in der Abb. 34 um Tagesmittel handelt, kann auch bei geringfügig positiven Werten der Temperaturdifferenz die Klimaanlage eingeschaltet gewesen sein. Bei diesen Werten handelt es sich um Mittelwerte, welche durch beispielsweise tiefere Nachttemperaturen und höhere Tagestemperaturen errechnet wurden. Weiters sind in Abb. 34 die Lücken der Umlufttemperaturdaten durch den defekten Temperaturfühler in den Monaten August, September und Jänner genau ersichtlich, da zu

diesen Zeitpunkten die Temperaturdifferenz genau bei „Null“ liegt. Diese Bereiche wurden für Auswertungen nicht berücksichtigt.

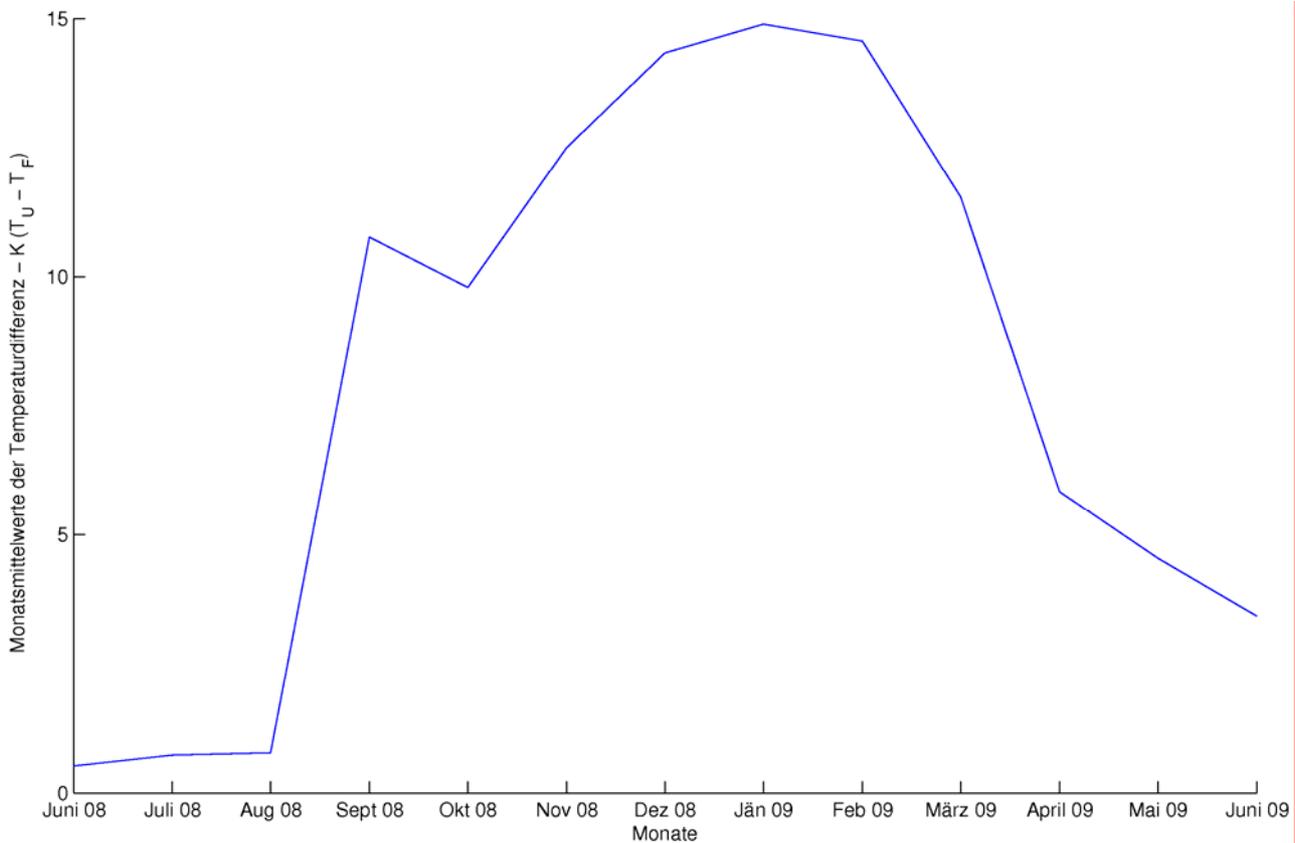


Abb. 35 Temperaturdifferenzen der Monatsmittelwerte, welche durch Subtraktion der Frischlufttemperatur  $T_F$  von der Umlufttemperatur  $T_U$  berechnet wird, in Kelvin

Abb. 35 zeigt die Kurve der Temperaturdifferenzen der Monatsmittelwerte, welche durch die Differenz der mittleren Umlufttemperatur  $T_U$  und der mittleren Frischlufttemperatur  $T_F$  berechnet wurde. Wie in Abb. 34 ist auch hier ersichtlich, dass von Juni bis August 2008 die Außentemperaturen in den Monaten hoch gewesen sind, mit einer durchschnittlichen Temperaturdifferenz von 0,7 Kelvin. In den weiteren Monaten ist ein starker Anstieg der Temperaturdifferenzen zu verzeichnen, bis hin zum Maximum. Der kleinste und der größte Wert der Monatsmittelwerte der Temperaturdifferenz sind

- 0,5K als Minimum und
- 14,9K als Maximum.

Diese Werte treten als Minimum im Juni 2008 und als Maximum im Jänner 2009 auf.

## 5.4. Absolute Energieaufnahmen

Die Energiewerte stammen aus der Energiemessung durch den Energiezähler. Die Aufzeichnungen erfolgten alle fünf Minuten und wurden zu gewissen Zeitabschnitten bei einer Frequenz von 16,7 Hz gespeichert. Die Zeiträume der Aufzeichnungen sind in der Abb. 23 ersichtlich. Zwischen diesen Zeiträumen bestehen oftmals Aufzeichnungslücken, da der Wagen zur Auslesung nicht immer in Wien zur Verfügung gestanden ist. Um den Energieverbrauch monatsweise darstellen zu können, konnte eine Berechnung durch Subtraktion des letzten aufgezeichneten Wertes von einem Monat mit dem ersten Energiewert desselben Monats nicht durchgeführt werden. Aufgrund der Zeitlücken ist dies nämlich nicht für alle Monate möglich, da zu gewissen 1. des Monats und Monatsletztem keine Energieaufzeichnungen vorhanden gewesen sind. Eine Interpolation der fehlenden Daten kam auch nicht in Betracht, da der Energieverbrauch des Doppelstockwagens nicht konstant stetig steigt. Die Energie ist gewissen Schwankungen unterzogen und auf Grund dieser Abweichungen wäre die Methode, um auf die Energiewerte zu kommen, sehr ungenau. Deshalb werden die fünfminütigen Energiewerte als Grundwerte herangezogen und der Mittelwert daraus berechnet. Dieser kann beliebig auf eine Stunde, einen Tag oder ein Monat hochgerechnet und dargestellt werden. Auf diese Weise sind die Energieverbräuche auf die Zeit bezogen ersichtlich. Durch diesen Ansatz wird bei der Ermittlung der absoluten Energiewerte nicht zwischen Fahrbetrieb und Stehzeit unterschieden. Es wird der gesamte Gesamtenergieverbrauch des Doppelstockwagens monatsweise dargestellt. Daher können keine differenzierten Folgerungen über das Verhalten des Verbrauches während der unterschiedlichen Betriebsarten getroffen werden, sondern nur über den Doppelstockwagen allgemein.

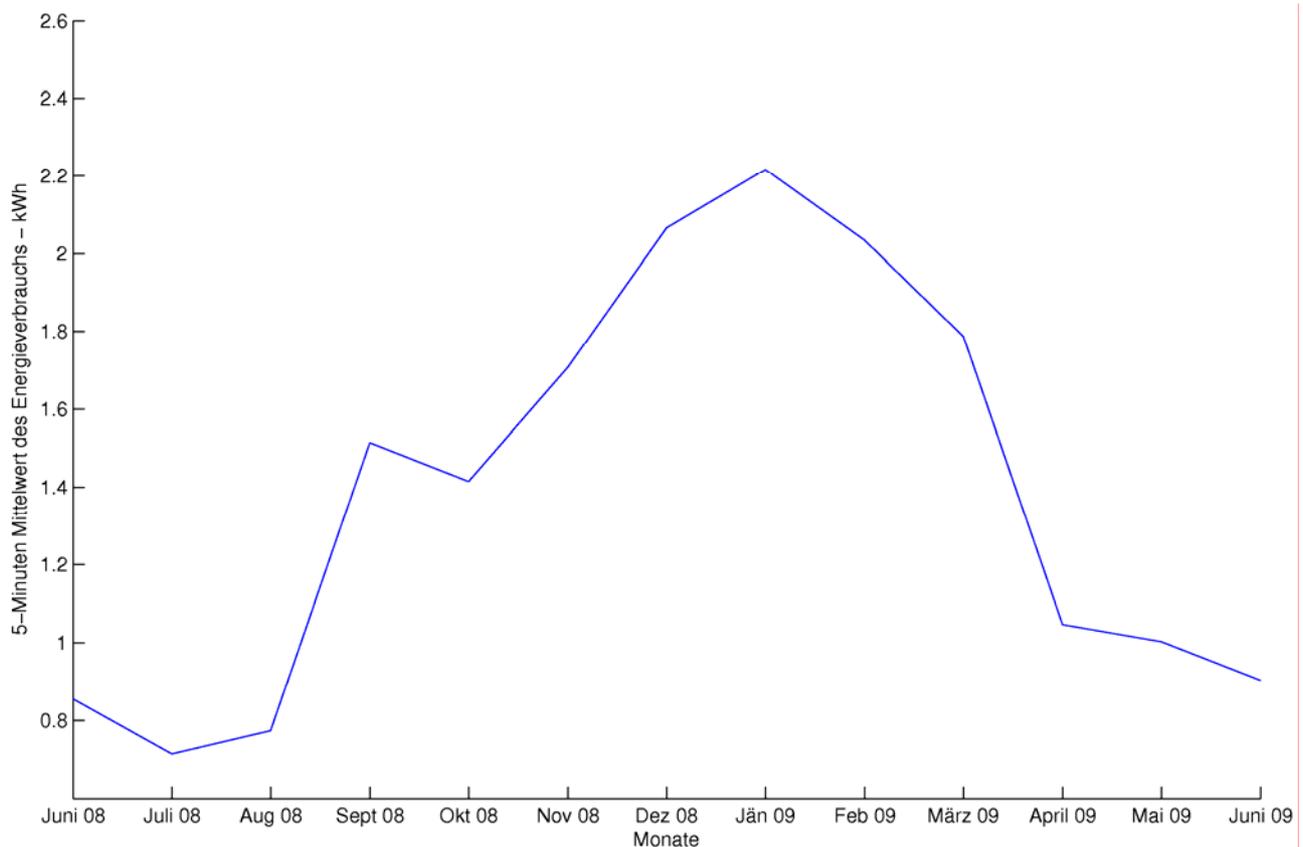


Abb. 36 5-Minuten Mittelwert des Energieverbrauchs des Doppelstockwagens

Abb. 36 zeigt den 5-Minuten Mittelwert des Energieverbrauchs des Doppelstockwagens. Es ist ersichtlich, dass die Energiewerte in den Anfangsmonaten der Aufzeichnungen, Juni bis August 2008, eher gering sind, mit Werten um die 0,8kWh pro fünf Minuten. In diesen Monaten sind auch die Temperaturdifferenzwerte (siehe Abb. 35) niedrig. Beides deutet darauf hin, dass in diesen Monaten die Klimaanlage in Betrieb gewesen ist und für die Klimatisierung weniger Energie verbraucht wird, als für die Heizung. Die Heizung wird vermutlich in den folgenden Monaten, aufgrund der sinkenden Außentemperatur (siehe Abb. 32), immer wieder aktiv sein. Dabei zeigt sich, dass ein Anstieg des Energieverbrauches auftritt. Dieser ist zu vergleichen mit dem Anstieg der Temperaturdifferenz, in Abb. 35, wodurch die Vermutung bekräftigt wird, dass ein starker Zusammenhang zwischen der Temperaturdifferenz und dem Energieverbrauch in der Heizperiode, durch positive Temperaturdifferenzen begründbar, besteht. Eine weitere Bekräftigung dieser Vermutung ist im Maximum der Energiewerte erkennbar. Das Maximum hat in beiden Kurven die gleiche Lage, nämlich im Jänner 2009. Um Größenordnungen der Energieverbräuche besser einschätzen zu können sind in Abb. 37 und Abb. 38 die mittleren 5-Minuten Energieverbräuche auf 24h bzw. auf ganze Monate hochgerechnet.

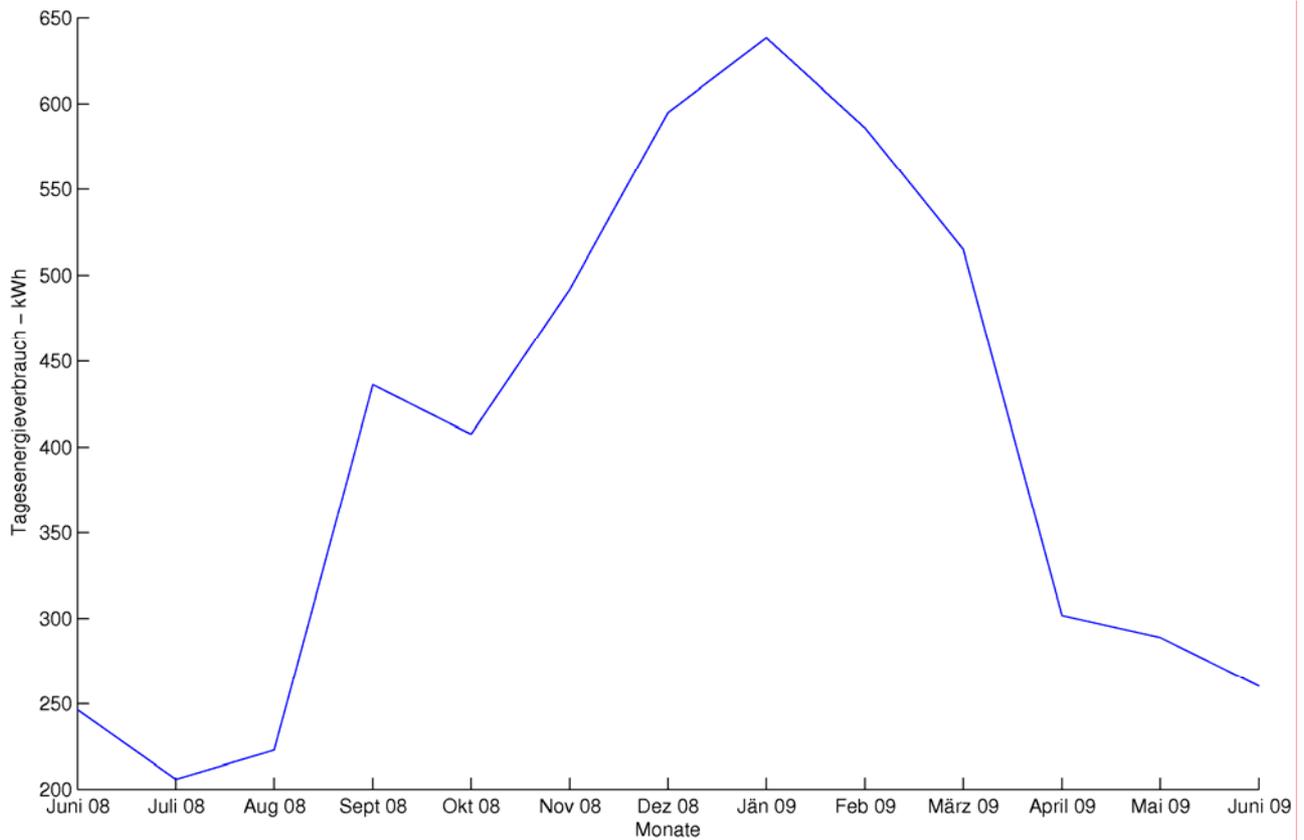


Abb. 37 Tagesenergieverbrauch basierend auf Monatsmittel des 5-Minuten Energieverbrauchs

Abb. 37 zeigt das Diagramm den Tagesenergieverbrauch basierend auf dem Monatsmittel des 5-Minuten Energieverbrauchs pro Monat. Die Lage der Maxima und Minima hat sich hinsichtlich der Hochrechnung nicht verändert. Auf Grund dessen befinden sich das Minimum des Energieverbrauches im Juli 2008, mit einem Wert von 206kWh, und das Maximum im Jänner 2009, mit einem Verbrauch von 638kWh.

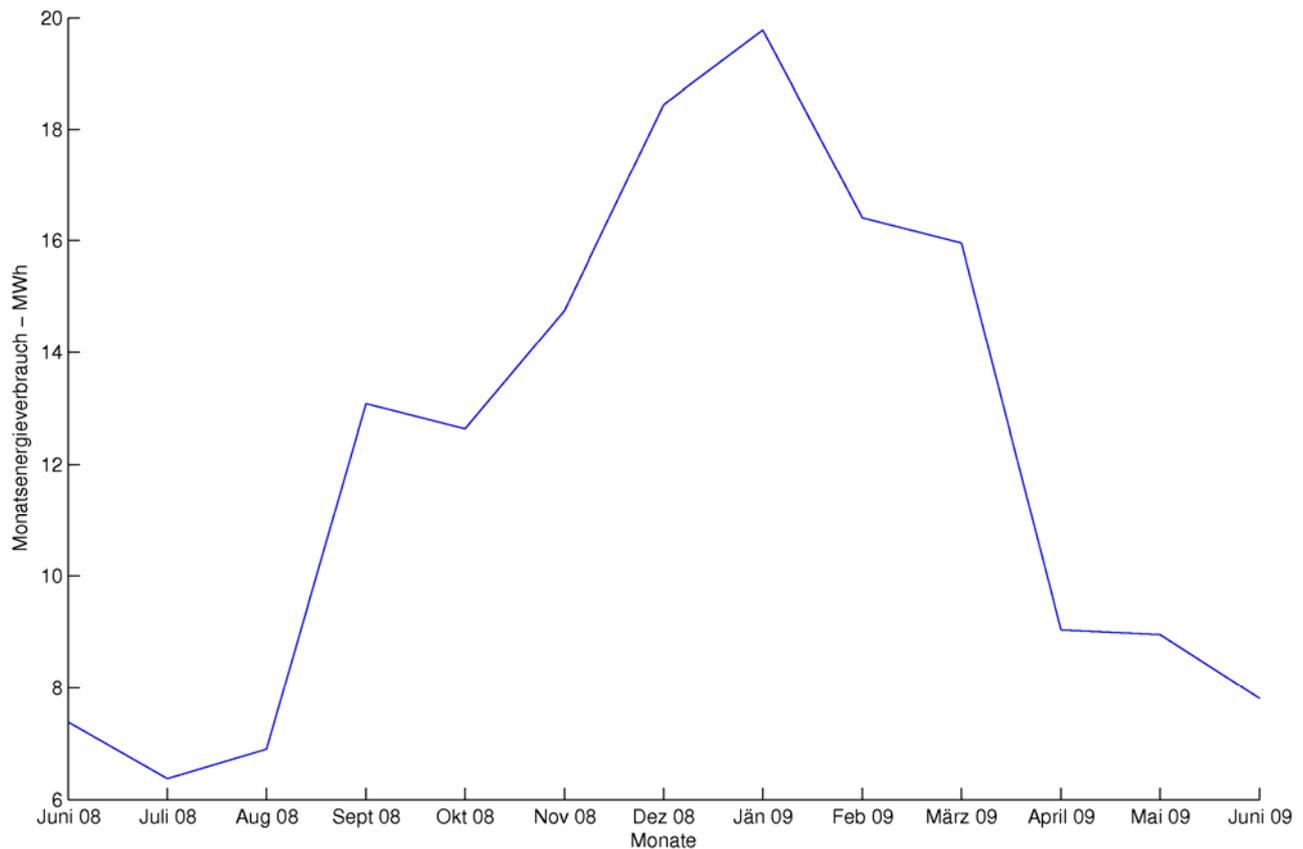


Abb. 38 Monatsenergieverbrauch basierend auf Monatsmittel des 5-Minuten Energieverbrauchs

Es werden in Abb. 38 der Monatsenergieverbrauch basierend auf dem Monatsmittel des 5-Minuten-Energieverbrauchs des Doppelstockwagens dargestellt. Die Hochrechnung auf Monate erfolgte, indem diese mit der Anzahl der jeweiligen Tage im Monat multipliziert wurden. Diese Werte können für einen Vergleich zwischen den Monateswerten nicht herangezogen werden, da statistisch gesehen keine konstante Hochrechnung erfolgt ist. Dies ist auf die unterschiedliche Anzahl von Tagen der einzelnen Monate zurückzuführen.

Der Jahresenergieverbrauch wird durch die Summierungen aller Monatsenergieverbräuche und Umrechnung auf ein Jahr berechnet. Das Resultat ist ein Jahresenergieverbrauch von 145,35 MWh pro Doppelstockwagen.

Der Energiezähler konnte nur Daten über den Energieverbrauch des Doppelstockwagens im während der Fahrt und im Stehen aufzeichnen, wenn der Doppelstockwagen mit einer Spannung mit einer Frequenz von 16,7Hz versorgt wurde. Es konnte aber auch eine Frequenz von 50 Hz, beispielsweise durch eine ÖBB-Diesel-Lokomotive der Baureihe 2016, in der durch einen Generator Strom für den Wagen erzeugt wird, vorhanden sein. In diesen Situationen existieren daher keine Werte und es können keine Rückschlüsse auf das Verhalten des Verbrauches getätigt werden.

Eine weitere Auswertung der Energiedaten ist der Vergleich zwischen dem Tagesenergieverbrauch während des Fahrens und während des aktiven Stehens. Im Betriebszustand dieses Stehens wird Energie verbraucht, da der Doppelstockwagen innerhalb dieser Zeit in Bahnhöfen weiter mit Energie versorgt und die Heizungsanlage weiter in Betrieb gehalten wird. Diese regelt auch im Stillstand die Temperatur im Inneren und ist weiter auf normale Betriebstemperatur von etwa 23°C eingestellt. Der Betriebszustand des aktiven Stehens und des Fahrens werden mit Hilfe der Geschwindigkeit, welche in der Datenbank errechnet wurde, unterschieden. Da die Zeitfolge in der Datenbank in Abständen von fünf Minuten dargestellt wird, können Stehzeiten unter fünf Minuten während des Stillstandes des Wagens nicht berücksichtigt werden. Diese Stehperioden sind vor allem kurze Halte in den Stationen, in denen der Doppelstockwagen nur zum Ein- und Aussteigen der Passagiere hält, aber keine längeren Aufenthaltszeiten für diesen geplant sind. Diese Stopps werden daher dem Betriebszustand des Fahrens zugeordnet.

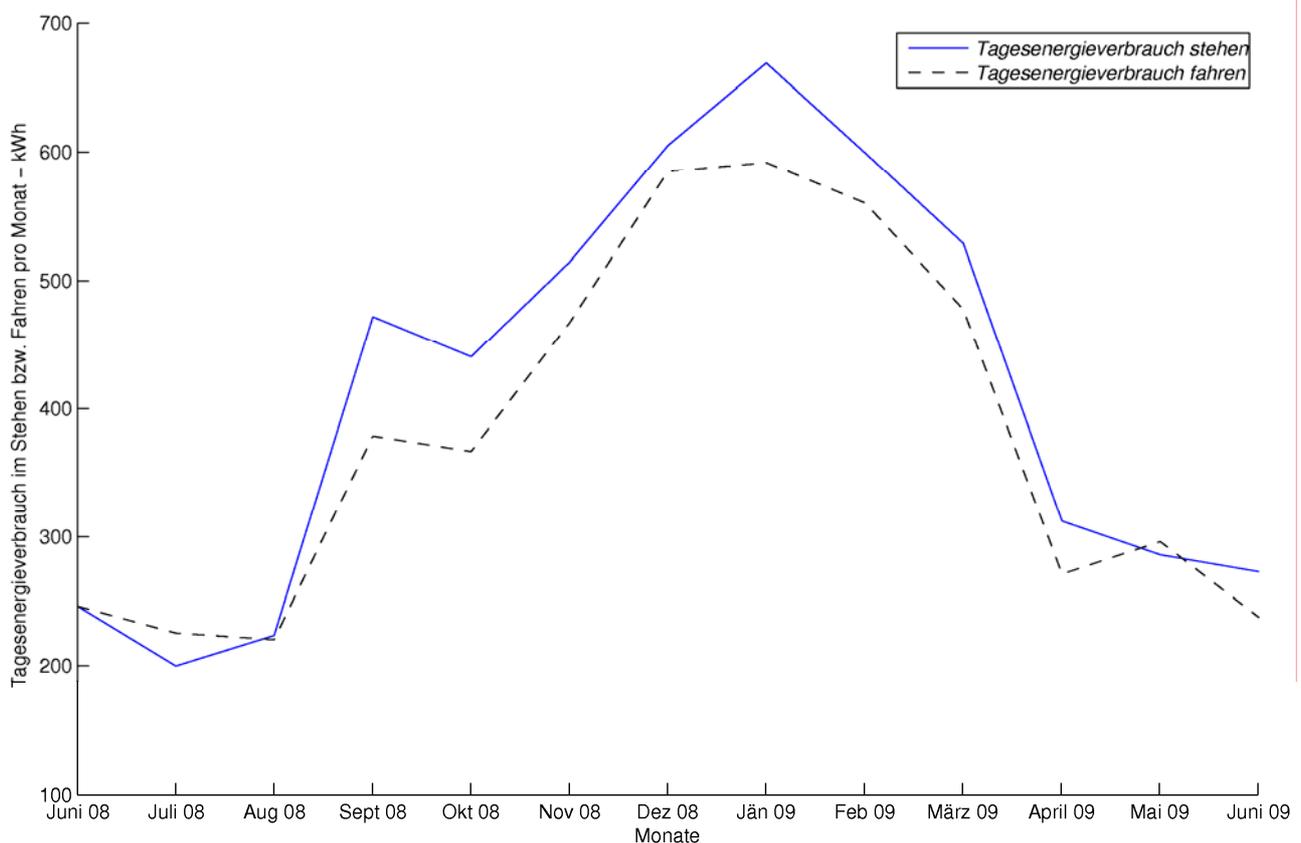


Abb. 39 Vergleich des Tagesenergieverbrauchs zwischen Fahren und aktivem Stehen des Doppelstockwagens pro Monat

In Abb. 39 wird der Tagesenergieverbrauch pro Monat für beide Einsatzarten des Doppelstocks in Form eines Liniendiagramms dargestellt. Die durchgezogene Kurve liegt meist über der strichlierten Kurve, außer in den Monaten Juli 2008 und Mai 2009. Das

bedeutet, im Monatsmittel wird im Allgemeinen mehr Energie während des Stillstandes als bei Fahrt aufgewendet. Der Grund für diesen Energieunterschied liegt vermutlich in der Wärmeabgabe der Fahrgäste. Ein Mensch entspricht einer durchschnittlichen Heizleistung von 100W und er trägt durch seine Wärmeabgabe einen Teil zur Erhöhung der Innentemperatur bei. Dieser Effekt ist abhängig vom Besetzungsgrad. Je höher dieser ist, desto weniger Energie wird während der Fahrt benötigt.

Da die gesamte Energie über das Bahnnetz gespeist und der Wagen auch bei längeren Stopps mit Energie versorgt wird, liegt die Überlegung nahe, nach einer gewissen Zeitspanne die Energiezufuhr zu unterbrechen oder zumindest die Heiz- oder Kühlleistung zu reduzieren. Diese Ansätze werden in den Kapiteln 5.6 und 5.7 aufgegriffen und abgeschätzt, in welcher Höhe Energieersparnisse erzielbar sind.

Die folgende Analyse bezieht sich auf den Energieverbrauch während des aktiven Stillstandes des Doppelstockwagens. Vor allem während des Stehens wird mehr Energie verbraucht als beim Fahren und so wird ein Augenmerk auf den Zusammenhang zwischen dem Energieverbrauch und der Stehdauer gerichtet.

Der aktive Stillstand wird in drei unterschiedliche Klassen eingeteilt. Diese sind

- Stillstände ab 5 Minuten bis zu 1er Stunde,
- Stillstände von 1er Stunde bis zu 4 Stunden und
- Stillstände größer als 4 Stunden.

Diese Unterteilung stellt die unterschiedlichen Stillstände eines im Einsatz befindlichen Wagens dar. Stillstände bis zu 1h entsprechen längeren Stehzeiten im Fahrbetrieb, 1-4h normale Abstellzeiten, in welche auch ein Vorheiz- oder Vorkühlbetrieb stattfinden sollte und größer als 4h sind lange Stehzeiten zwischen den Fahrbetrieben.

Die durchschnittliche Dauer von den Stillständen liegt bei

- 30min in Stillständen bis zu 1h,
- 123min in Stillständen von 1 bis zu 4h und
- 2498min (ca. 2 Tage) in Stillständen größer als 4 Stunden.

Die längste auftretende Stehzeit liegt bei 15 Tagen.

Um den Energieverbrauch pro Jahr auszurechnen, muss der mittlere Verbrauch je Stillstand mit der Anzahl der Stillstände multipliziert werden. In der gesamten Messperiode, vom 7. Mai 2008 bis 30. Juni 2009 treten eine Gesamtanzahl von 830 Stillständen auf. Diese sind gegliedert in

- 371 Stillstände ab 5 Minuten bis zu 1er Stunde mit einem mittleren Energieverbrauch von 7,7kWh,

- 375 Stillstände von 1er Stunde bis zu 4 Stunden mit einem mittleren Verbrauch von 41,95kWh und
- 84 Stillstände größer als 4 Stunden mit einem mittleren Verbrauch von 325,58kWh.

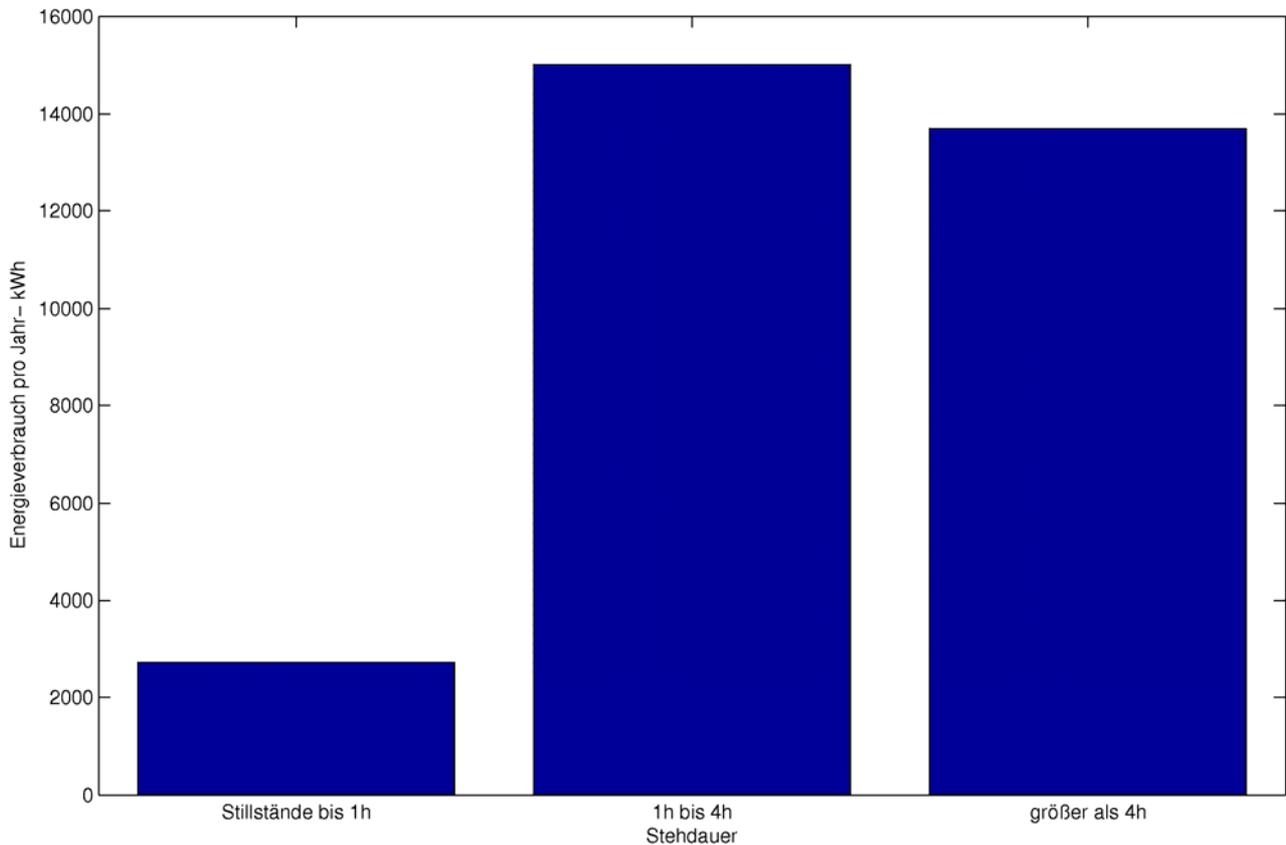


Abb. 40 Energieverbrauch pro Jahr während einer Stehdauer des Doppelstockwagens aufgetragen in 3 Klassen: bis zu eine Stunde, von einer Stunde bis zu vier Stunden und größer als vier Stunden

Um nun den Energieverbrauch pro Jahr, der in der Abb. 40 dargestellt ist, zu erlangen, müssen folgende Berechnungen durchgeführt werden:

$$f = \frac{525.600 \text{ min}}{550.920 \text{ min}} = 0,9540$$

$f$ ... Umrechnungsfaktor

550.920.....Minuten im Zeitraum vom 28. Mai 2008 22:35 Uhr bis 15. Juni 2009 12:35 Uhr

525.600.....Minuten eines Jahres

$$E_{\text{Jahr}} = f \cdot \sum_{i=1}^n E_i$$

$E_{\text{Jahr}}$ ...Energieverbrauch pro Jahr

$E_j$ ... Energieverbrauch pro Stillstand

$f$ ... Umrechnungsfaktor

$n$ ... Anzahl der Pausen in den betrachteten 14 Monaten

In Abb. 40 ist der berechnete Energieverbrauch pro Jahr in Abhängigkeit der einzelnen Stehdauern ersichtlich. Es zeigt sich, obwohl der Energieverbrauch pro Stillstand kontinuierlich gestiegen ist, je länger der Stillstand andauerte, dass dies für den Verbrauch pro Jahr nicht zutrifft. Der Grund für den Abfall des Energiewertes in der Stehzeit, welche größer als vier Stunden sind, ist die geringere Anzahl der Stillstände. Das Maximum liegt daher nicht mehr bei einer Stehdauer größer als vier Stunden, sondern mit einem Wert von 15.007kWh bei einer Stehdauer zwischen einer und vier Stunden.

Aus dieser Darstellung ist ersichtlich, dass um den Energieverbrauch zu reduzieren, besonders auf den Stillstand des Doppelstockwagens ab einer Stunde zu achten ist. Dort können Annahmen für einen effektiveren Energieeinsatz getroffen und auch Energieersparnisse durch beispielsweise eine Temperaturabsenkung der Innentemperatur erzielt werden.

## 5.5. Zusammenhang zwischen Energie und Temperatur

Da ein Zusammenhang der Energie und der Temperaturdifferenz durch Abb. 35 und Abb. 37 aufgrund des Verlaufes der Kurven, sowie der Positionen der Maxima und Minima vermutet werden kann, wird folglich eine Analyse und Auswertung dieser Beziehung erstellt. Für diese Analyse wird der Stundenenergieverbrauch in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz jeweils für den Betriebszustand des Fahrens und des Stehens errechnet. Es wird zwischen den beiden Betriebszuständen unterschieden, da erstens die Energieverbräuche unterschiedlich sind und diese getrennt betrachtet werden sollen. Zweitens ist der Stundenenergieverbrauch die Grundlage für die Ansätze der Energieeinsparung (siehe Kapitel 5.6 und 5.7) bei der ebenfalls zwischen Fahrt und Stillstand unterschieden wird. Für die Berechnung des Stundenenergieverbrauches wird der 5-Minuten-Energieverbrauch je Temperaturdifferenzwert durch eine Filterung aus der Datenbank erstellt und anschließend nach Temperaturdifferenzen sortiert. Danach wurde jeweils der Mittelwert aus den Energiewerten berechnet und auf eine Stunde hochgerechnet.

$$E_{\phi h, \Delta T} = \frac{12}{n} \cdot \sum_{i=1}^n E_{5, \Delta T}$$

mit  $-23 \leq \Delta T \leq 15$

$E_{\phi h, \Delta T}$  ..... mittlerer Stundenenergieverbrauch bei Datenwert  $\Delta T$

$E_{5, \Delta T}$  ..... 5-Minuten-Energieverbrauch bei Datenwert  $\Delta T$

$n$ .... Anzahl der Energiewerte

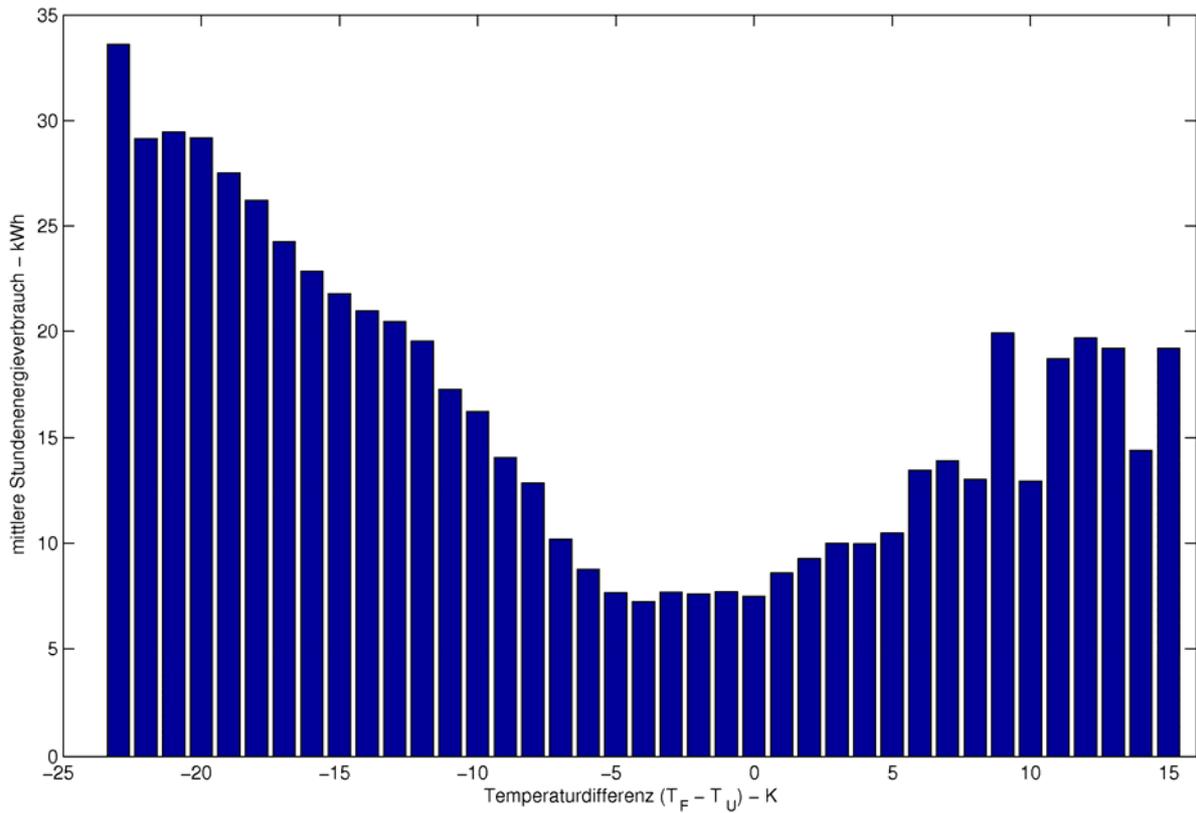


Abb. 41 Zusammenhang zwischen mittlerem Stundenenergieverbrauch des Doppelstockwagens während der Fahrt und der Temperaturdifferenz (Frischlufftemperatur  $T_F$  minus Umlufttemperatur  $T_U$ )

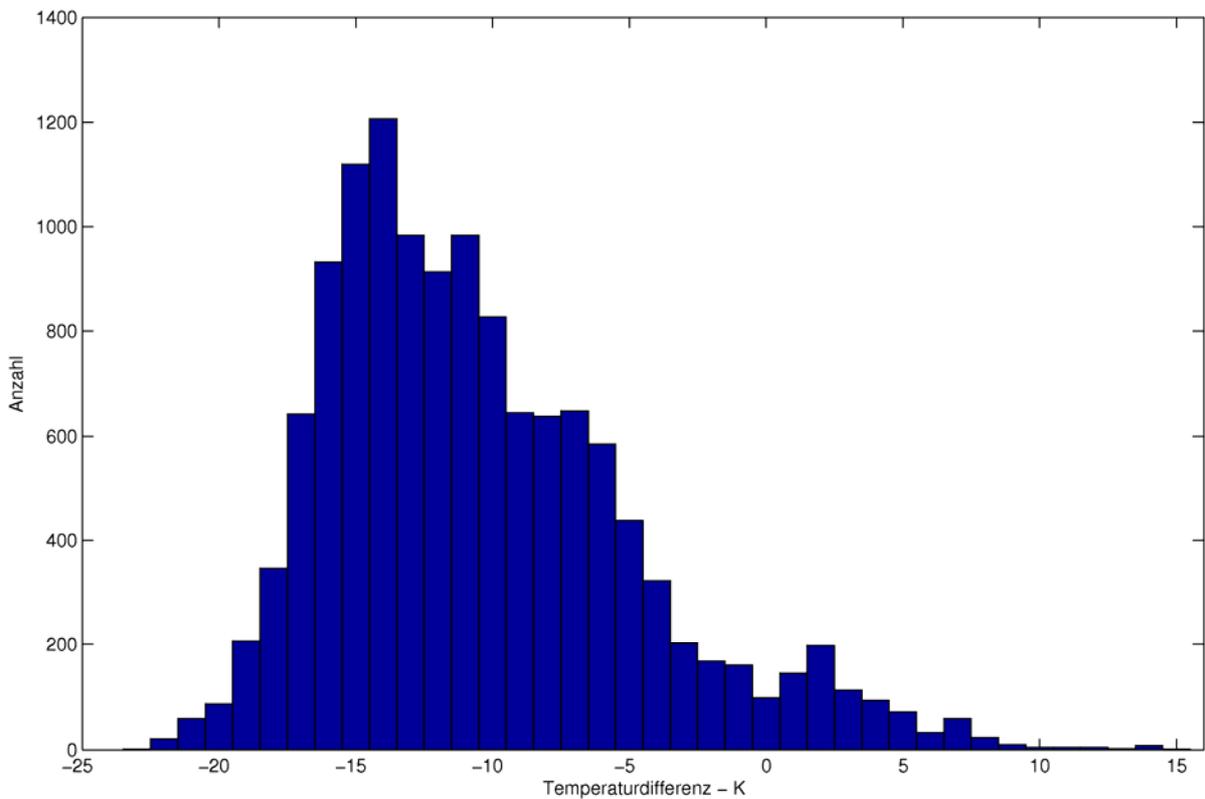


Abb. 42 Histogramm der Temperaturdifferenzdaten beim Stundenenergieverbrauch während der Fahrt des Doppelstockwagens

Der Zusammenhang zwischen dem Stundenenergieverbrauch des Doppelstockwagens und der errechneten Temperaturdifferenzen wird in Abb. 41 während der Fahrt des Doppelstocks dargestellt. Eine negative Temperaturdifferenz bedeutet in diesem Fall, dass die Außentemperatur niedriger gewesen ist, als die Innentemperatur des Wagens, da die Berechnung der Temperaturdifferenz durch die Subtraktion von Umlufttemperatur von der Frischlufttemperatur erfolgt. Auf Grund dessen wird bei einer negativen Temperaturdifferenz die Heizung in Betrieb sein und bei einer positiven die Kühlung. Das Minimum des Stundenenergieverbrauches liegt während der Fahrt bei einer Temperaturdifferenz von  $-4\text{K}$ . Unterhalb von diesem Minimum steigen die Energiedaten kontinuierlich an. Zu berücksichtigen ist aber für die Energiebetrachtung, dass der Stundenenergieverbrauch in der Abb. 41 den Gesamtverbrauch der Energie eines Doppelstockwagens darstellt, und nicht nur den Verbrauch für die Klimatisierung. Ein Teil wird der Beleuchtung zugeschrieben, welche für den gesamten Wagen ungefähr  $5\text{kWh}$  beträgt. Die Steuerung der Beleuchtung weist keine automatische Regelung auf. Das Licht wird durch den Zugbegleiter ein- oder ausgeschaltet. Der Verbrauch hierfür ist jedoch über das gesamte Jahr nicht gleich, denn im Sommer sind die Tage länger, wodurch die Beleuchtung kürzer eingeschaltet ist und deshalb weniger Energie verbraucht wird. Gegenläufig verhält sich dieser Effekt im Winter, da zu dieser Jahreszeit die Tage kürzer sind.

Abb. 42 stellt die Häufigkeiten der Temperaturdifferenzdaten beim Stundenenergieverbrauch während der Fahrt des Doppelstockwagens dar. Eine höhere absolute Häufigkeit zeigt, dass eine Datenmenge mit gleicher Eigenschaft mehrfach vorkommt. Da der Stundenenergieverbrauch auf einer Mittelwertrechnung basiert, ergibt sich durch eine höhere Häufigkeit ein genaueres Ergebnis.

In Abb. 41 verläuft der kontinuierliche Anstieg des Stundenenergieverbrauches bis zu einer Temperaturdifferenz von  $-21\text{K}$ . Danach ist ein kleiner Abstieg bei  $-22\text{K}$  zu sehen. Dieser Wert ist aber kritisch zu betrachten, da für diese Temperaturdifferenz nur mehr wenige Werte zur Mittelwertberechnung vorhanden sind (siehe Histogramm in Abb. 42). Auf der anderen Seite, bei den positiven Temperaturdifferenzwerten, zeigt sich ebenfalls ein Anstieg des Energieverbrauches, der aber geringer als der auf der linken Seite des Diagramms ausfällt. Dies bedeutet, dass die Klimaanlage, welche bei den hohen positiven Temperaturdifferenzwerten eingeschaltet ist, einen geringeren Verbrauch auf die Temperaturdifferenzen bezogen aufweist, als bei der Heizung. Die Qualität des Mittelwertes hängt vom Umfang der Werte ab und es sind dadurch in den Bereichen mit wenig Datenwerten größere Abweichungen zu erwarten. Die sprunghaften Energiewerte zwischen -

23 und -21K bzw. 9 und 15K sind auf die gering vorhandene Datenmenge zurückzuführen (siehe Abb. 42) und mit zunehmender Unsicherheit behaftet. Das Histogramm in Abb. 42 zeigt die absolute Häufigkeit der Daten bei einer Gesamtdatenmenge von 13.005 an. Die meisten Daten befinden sich zwischen einer Temperaturdifferenz von -19 bis -3 K, da diese Werte über das Jahr gesehen häufig vorgekommen sind. Dadurch kann der Stundenenergieverbrauch mit Hilfe einer Mittelwertberechnung genauer ermittelt werden, je größer die Anzahl der Daten ist. Derselbe Zusammenhang zwischen dem Stundenenergieverbrauch und der Temperaturdifferenz beim Fahren des Wagens besteht auch für den Betriebszustand des Stehens. Die Analyse dieser Daten ergeben die Werte in der Abb. 43. Dabei entsprechen die Temperaturdifferenzen  $\Delta T$  auf der  $x$ -Achse denselben Werten wie in der Abb. 41. Dies bedeutet, dass links durch die negativen Werten der Heizbetrieb dargestellt ist, und rechts der Kühlbetrieb.

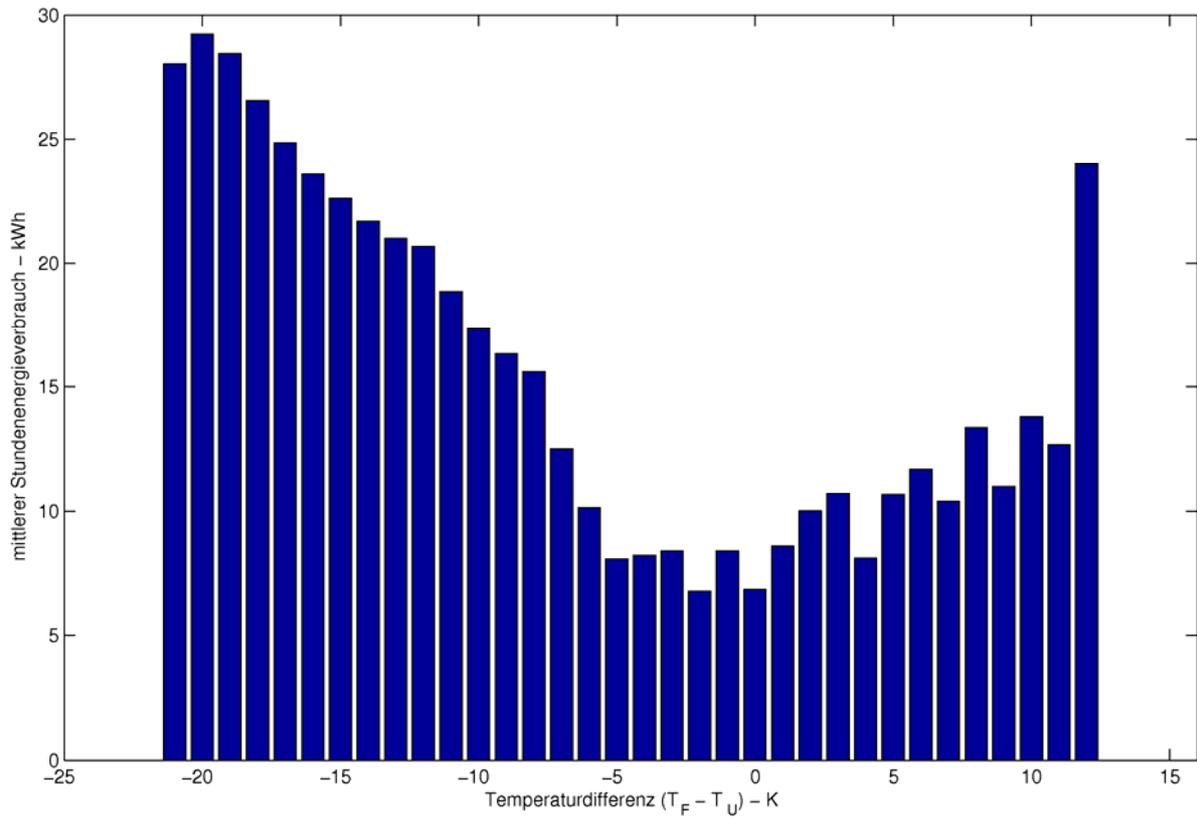


Abb. 43 Zusammenhang zwischen mittlerem Stundenenergieverbrauch des Doppelstockwagens während des Stillstandes und der Temperaturdifferenz (Frischlufftemperatur  $T_F$  minus Umlufttemperatur  $T_U$ )

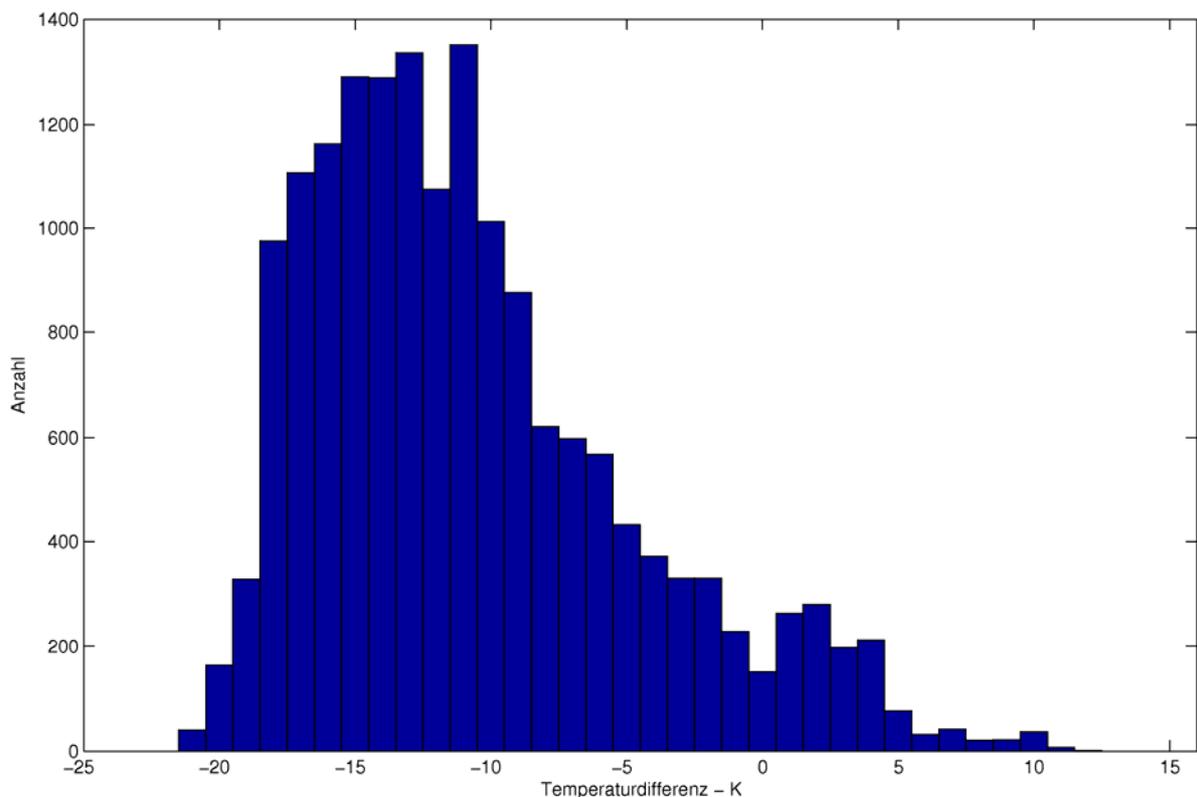


Abb. 44 Histogramm der Temperaturdifferenzdaten beim Stundenenergieverbrauch während des Stillstandes des Doppelstockwagens

Das Minimum des Stundenenergieverbrauches in Abb. 43 liegt bei einer Temperaturdifferenz von -2K. Unterhalb steigen die Energiewerte bis -20K kontinuierlich an und es zeigt sich, dass auch beim Stehen der Energieverbrauch bezogen auf die Temperaturdifferenzen für die Heizungsanlage höher ist als für die Klimaanlage.

Abb. 44 stellt die Häufigkeiten der Temperaturdifferenzdaten beim Stundenenergieverbrauch während des Stillstandes des Doppelstockwagens dar. Das Histogramm zeigt die absolute Häufigkeit der Daten bei einer Gesamtdatenmenge von 16.835 an. Die meisten Daten befinden sich im mittleren Bereich zwischen einer Temperaturdifferenz von -19 bis -2 K. Diese kommen über das Jahr gesehen häufig vor. Durch die hohe Anzahl an Werten kann der Stundenenergieverbrauch, welcher durch Mittelung der aufgetretenen Werte für jede Temperaturdifferenz einzeln berechnet wird, mit geringeren Unsicherheiten interpretiert werden.

Um einen Vergleich zwischen der Abb. 41 und Abb. 43 zu vereinfachen, sind in Abb. 45 diese Balkendiagramme zusammengefügt.

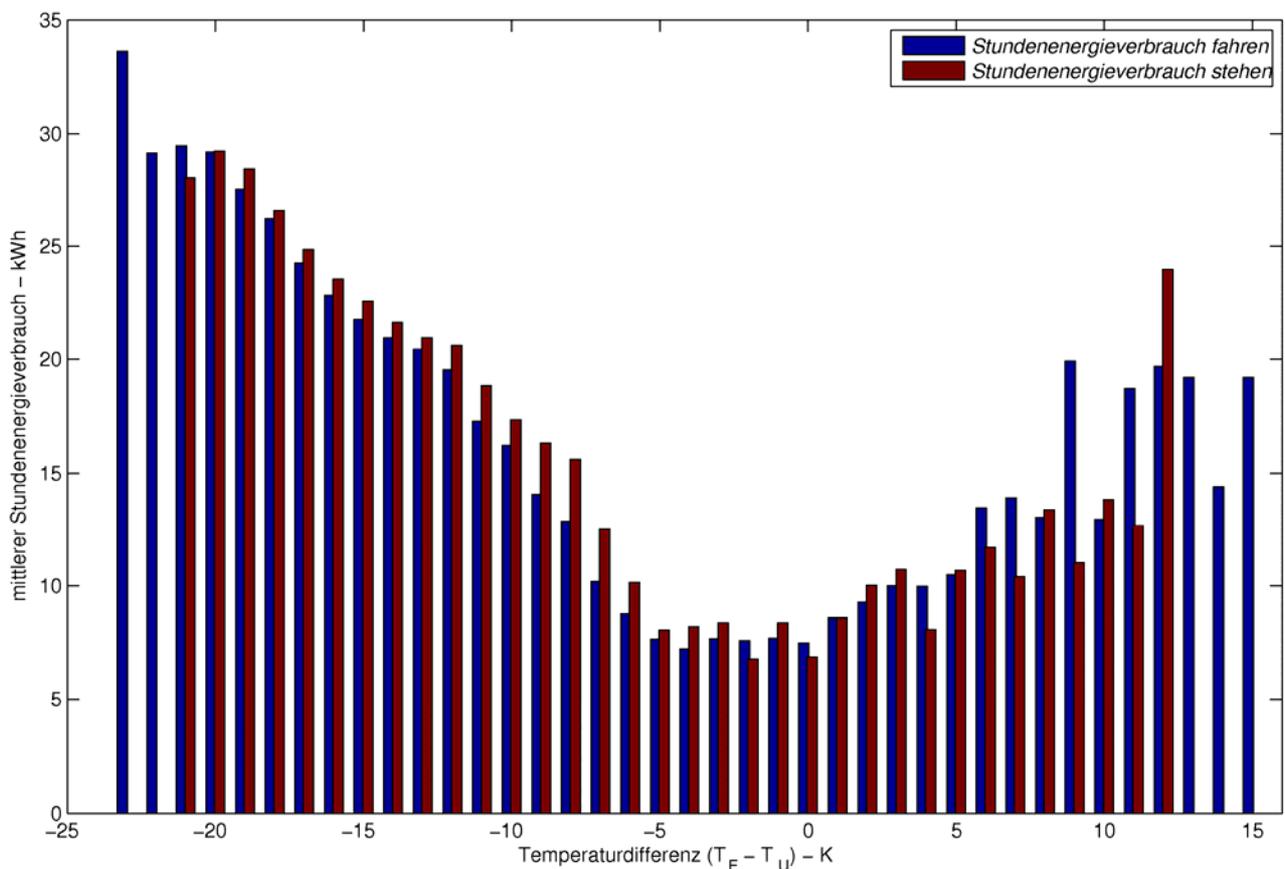


Abb. 45 Vergleich des mittleren Stundenenergieverbrauches bei der Fahrt bzw. bei Stillstand des Doppelstockwagens in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz (Frischlufftemperatur  $T_F$  minus Umlufttemperatur  $T_U$ )

Diese Abbildung zeigt, dass der Energieverbrauch pro Stunde während der Fahrt im Bereich des Heizens stetig über dem Verbrauch liegt, als während des Stillstandes. Im Gegensatz dazu tritt dieser Effekt im Kühlbetrieb umgekehrt auf. Hier ist der Stundenenergieverbrauch während der Fahrt höher, als während des Stehens des Doppelstockwagens. Eine mögliche Ursache ist, dass die Fahrgäste im Wagen Wärme abgeben und den Energieverbrauch dadurch beeinflussen. Ein Mensch entspricht einer durchschnittlichen Heizleistung von 100W und trägt durch seine Wärmeabgabe zur Erhöhung der Innentemperatur bei. Dieser Effekt ist vom Besetzungsgrad abhängig. Der Doppelstockwagen hat eine Anzahl von 114 Sitzplätzen. Wenn alle Sitzplätze besetzt sind entspricht dies einem Besetzungsgrad von 100%. Dies wird fast nur zu den Spitzenzeiten des öffentlichen Verkehrs, wie etwa im Früh- oder Abendverkehr erreicht. Zu diesen Zeiten sind vor allem Pendler auf dem Weg zu ihrer Arbeitsstätte bzw. vom Arbeitsplatz aus, auf dem Heimweg. Im normalen Tagesbetrieb schwankt der Besetzungsgrad sehr und es können nur Annahmen über die ungefähre Anzahl der Fahrgäste, die sich im Wagen befinden, getroffen werden. Der durchschnittliche Besetzungsgrad während der Fahrt, der zirka bei 50% liegt, ist aber deutlich höher als bei den betrachteten Stehzeiten, da auch lange Aufenthaltszeiten, von mehreren Stunden berücksichtigt werden. In diesen langen Stehzeiten befinden sich keine Passagiere im Wagen. Dadurch findet meist während des Stillstandes keine Wärmeabgabe durch Fahrgäste statt, sondern nur während der Fahrt. Dieser Rückschluss ist für die Kühlperiode genau umgekehrt zu treffen, da aufgrund der von den Personen abgegebenen Energie der Wagen stärker gekühlt werden muss, um die gleiche Ist-Temperatur sicherzustellen. Somit wirkt die Wärmeabgabe eines Fahrgastes entgegen des Energieverbrauches und es wird mehr Energie während der Fahrt benötigt. Ein weitere mögliche Ursache für den höheren Stundenenergieverbrauch in der Heizperiode kann darin bestehen, dass beim Stehen des Doppelstockwagens im Bahnhof immer wieder die Türen auf und zu gehen. Hierfür werden aber nur Stehzeiten über fünf Minuten berücksichtigt und keine kürzeren Stillstände, welche Zwischenhalte in den Stationen während einer Fahrt entsprechen. Solche Annahmen können für den Abfahrtsbahnhof eines Einsatzes getroffen werden, da zu dieser Zeit der Doppelstockwagen schon länger auf dem Bahnsteig bereit gestellt wird und Passagiere immer wieder einsteigen. Anhand dieses Vorganges geht die Wärme nach außen hin verloren und es muss daher mehr Energie aufgewendet werden, um den Innenraum wieder aufzuheizen. Um dem entgegen zu wirken sind die Doppelstockwagen automatische Türschließer eingebaut, welche nach einer gewissen Zeit die Tür wieder schließt. Aber vor allem während der kalten Jahreszeit, in der Minusgrade oft vorkommen, tritt der Wärmeaustausch rasch auf und die Temperatur des Innenraumes sinkt.

Ein weiterer Ansatz der Energiebetrachtung ist die Darstellung des Zusammenhanges des Stundenenergieverbrauches und der Frischlufttemperatur. Wird die Frischlufttemperatur anstatt der Temperaturdifferenz (siehe Abb. 45) auf der x-Achse aufgetragen, ergeben sich nur geringfügige Unterschiede. Der Grund dafür sind die geringen Schwankungen der Innentemperatur. Durch die Auftragung der Frischlufttemperatur auf der x-Achse ist aber erkennbar bei welcher Außentemperatur der Doppelstockwagen welchen Energieverbrauch aufweist. Dadurch kann zukünftig schnell ein Energieverbrauch ausgerechnet werden, wenn Frischlufttemperaturdaten vorhanden sind. Dafür werden die Betriebsarten des Wagens einzeln betrachtet und mit Hilfe eines Vergleiches in einem Diagramm zusammengefügt. Dies ist in der folgenden Abb. 46 ersichtlich.

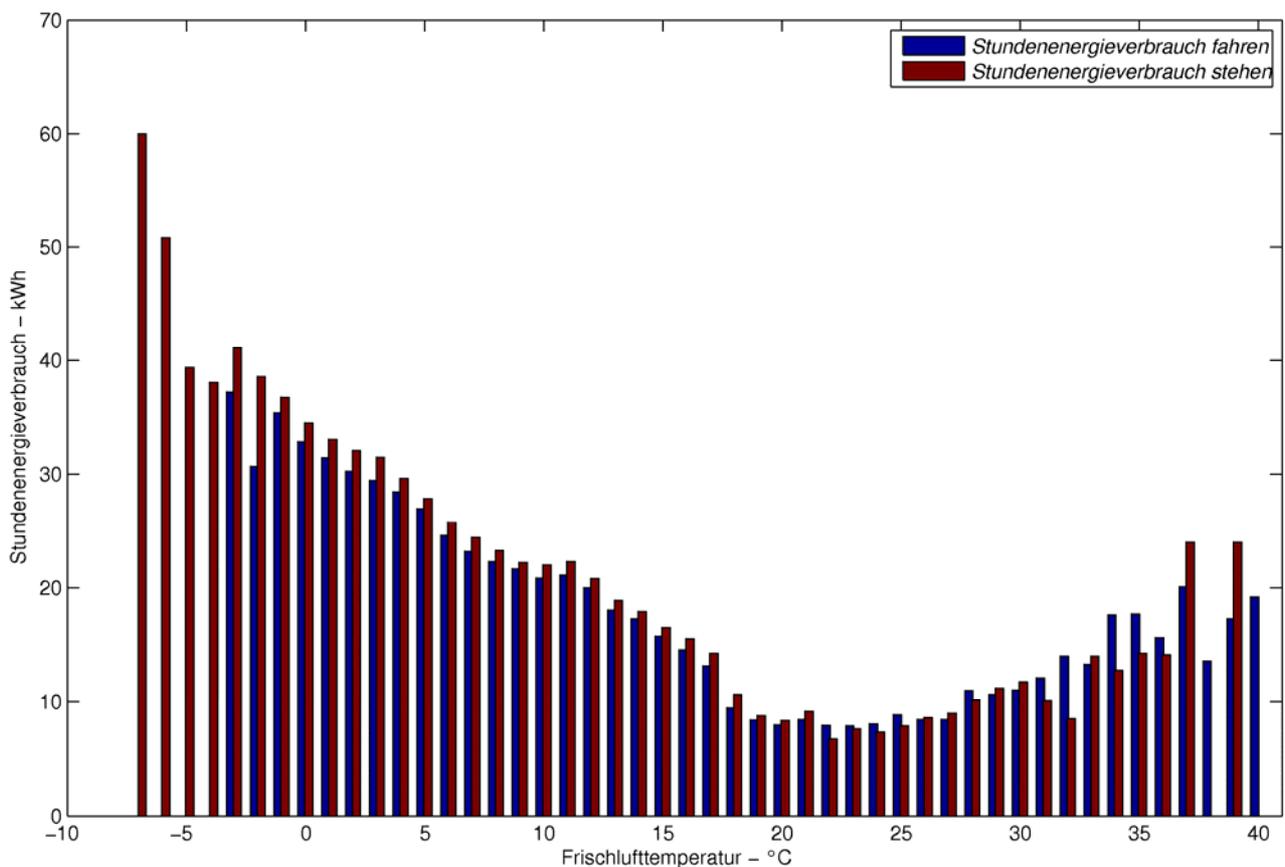


Abb. 46 Vergleich der Stundenenergieverbräuche zwischen Fahren und Stehen des Doppelstockwagens in Abhängigkeit von der Frischlufttemperatur, bei einer Gesamtdatenmenge von 15.915 beim Fahren und 20.530 beim Stehen.

Die Sollinnentemperatur wird in einem Bereich von 21° bis 24°C variieren. Daher sind auch die Minima des Stundenenergieverbrauches in diesem Bereich zu erwarten, da die Soll-Innentemperatur mit der Außentemperatur fast übereinstimmt. Folglich wird nur ein geringer Energieverbrauch nötig sein, um das Innenraumklima zu regeln. Dies deckt sich mit den

Werten in Abb. 46 ab. Das Minimum des Verbrauches befindet sich beim Fahren bei einer Außentemperatur von  $23^{\circ}\text{C}$  mit einem Stundenenergieverbrauch von  $7,9\text{kWh}$ . Beim Betriebszustand des Stehens liegt das Minimum bei  $22^{\circ}\text{C}$  und beträgt  $6,7\text{kWh}$ . Sobald in den Heizbetrieb umgeschaltet wird, steigen die Energiewerte stetig bis zu einem Wert von  $35,4\text{kWh}$  bei einer Frischlufttemperatur von  $-1^{\circ}\text{C}$  beim Fahren und bis zu einem Wert von  $41,1\text{kWh}$  bei einer Frischlufttemperatur von  $-3^{\circ}\text{C}$  an. Im rechten Bereich der Abb. 46 steigen die Energieverbräuche pro Stunde ebenfalls an, nur mit einer kleineren Steigung als im linken. Dies bedeutet, dass weniger Energie im Bereich der hohen Temperaturen benötigt wird als für die niedrigeren.

In Abb. 46 ist derselbe Unterschied wie in Abb. 45 zwischen den Betriebsarten zu sehen. Hier ist ebenfalls der Energieverbrauch pro Stunde während der Fahrt höher als während des Stillstandes. Dadurch können auch dieselben Rückschlüsse mit dem Besetzungsgrad des Doppelstockwagens und dem Wärmeverlust, durch öffnen der Türen im Bahnhof, getroffen werden.

Speziell im Winter ist durch die Häufigkeit der tiefen Temperaturen ein viel größerer Energieaufwand für das Heizen von Nöten als im Sommer für das Kühlen, um die Innentemperatur auf zirka  $23^{\circ}\text{C}$  zu halten. Für die Betrachtung der Energieersparnis wird daher im Kapitel 5.6 der Heizbetrieb analysiert, da dort mehr Daten und die größeren Potentiale für eine Ersparnis vorhanden sind.

## 5.6. Energieeinsparungen durch Temperaturabsenkung

In diesem Kapitel wird versucht durch eine Temperaturabsenkung eine Abschätzung einer Energieersparnis zu erstellen. Dies bedeutet, dass die Innentemperatur sowohl beim Fahren als auch beim Stehen um eine gewisse Temperaturdifferenz herabgesetzt wird. Folglich ist die Soll-Innentemperatur im Wagen geringer als zuvor. Durch diese Absenkung wird Energie eingespart, da die Klimatisierung einen niedrigeren Soll-Temperaturwert aufweist. Um nun die Innentemperatur des Wagens zu regeln, wird wegen dem Zusammenhang zwischen Energieverbrauch und Temperaturdifferenz (Abb. 41) weniger Energie verbraucht werden. Denn je niedriger die Temperaturdifferenz ist umso weniger Energie wird pro Stunde verbraucht.

### 5.6.1. Energieeinsparungen im Fahren

Für die Berechnung der Energieersparnis durch Temperaturabsenkung der Innentemperatur werden als Grundlage die Ergebnisse der Abb. 41 herangezogen. Diese Abbildung zeigt den

Zusammenhang zwischen dem Stundenenergieverbrauch und der Temperaturdifferenz für die Betriebsart des Fahrens. Dieser ist für den Heiz- und Kühlbetrieb fast linear und wird näherungsweise durch eine lineare Regression beschrieben. Um die Regression durchführen zu können, werden die Daten in Abb. 41 in zwei Bereiche, nämlich dem Heiz- und dem Kühlbereich, eingeteilt. Der Heizbereich für die weitere Energieersparnisberechnung beginnt unter einem Wert von 0K und die Kühlbereich befindet sich im rechten Bereich ab 0K. Die Berechnung der linearen Regression wird aus den ursprünglichen, aufgezeichneten 5-Minuten-Energiewerten und den jeweiligen Temperaturdifferenzen, durchgeführt und nicht mit den errechneten Stundenenergieverbräuchen. Dies wird durchgeführt da durch die 5-Minuten-Energiewerte auch die Anzahl des Auftretens der Werte mit berücksichtigt wird. Bei einer Regression durch die Stundenenergieverbräuche wäre dies nicht der Fall, da ein Mittelwert in Abhängigkeit von den Temperaturdifferenzen berechnet wurde und die einzelne Anzahl der Werte nicht mit einfließt. Folglich werden nun jene Temperaturdifferenzbereiche in der eine geringere Anzahl von Werten ist weniger berücksichtigt. Als Ergebnis wird eine Regressionsgerade gebildet, wodurch die Daten für die weitere Berechnung angenähert werden.

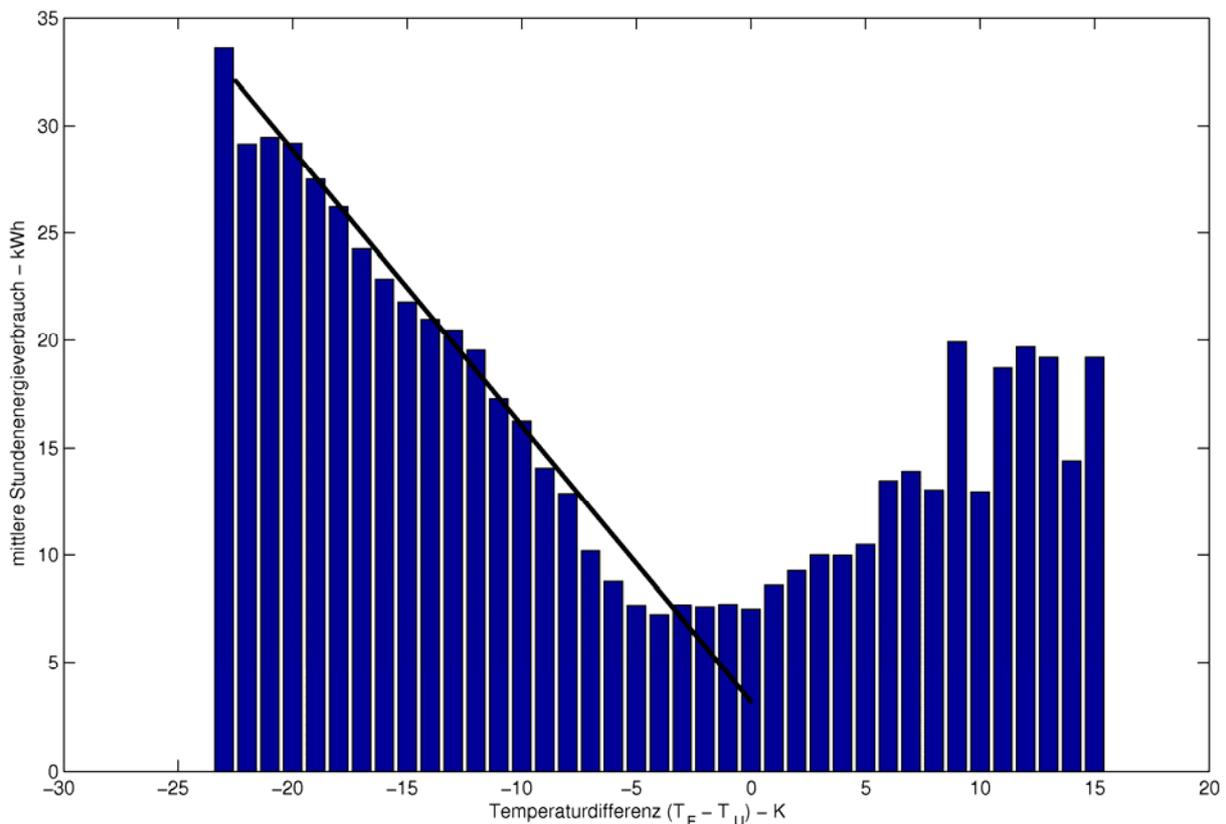


Abb. 47 Zusammenhang zwischen mittlerem Stundenenergieverbrauch des Doppelstockwagens während der Fahrt und der Temperaturdifferenz (Frischlufftemperatur  $T_F$  minus Umlufttemperatur  $T_U$ ) mit Darstellung der Regressionsgeraden (schwarze Linie)

Abb. 47 zeigt die ermittelte Regressionsgerade, welche in Abb. 41 eingefügt wurde. Für den Heizbereich zeigt diese eine Annäherung. Jedoch genügt zwischen -4K und 0K der lineare Ansatz durch die Regressionsgerade dem Verlauf des Balkendiagramms nicht, da der Verlauf der Geraden hier deutlich unter den Werten des Energieverbrauches liegt. Für eine genauere Annäherung müssten komplexere Ansätze, beispielsweise durch mehrere Teilbereiche oder nichtlineare Ansätze, verwendet werden. Dadurch wäre eine gute Annäherung zu den erfassten Verbräuchen erzielt worden. Ein einfacherer Weg für eine Abschätzung der Größenverhältnisse lässt sich aber durch die Verwendung der mittleren Stundenenergieverbräuche durchführen. Daher werden die Werte der Stundenenergieverbräuche aus Abb. 41 direkt verwendet.

Für die Berechnung einer Energieersparnis wird je eine Temperaturabsenkung von 1 bis zu 5K der Innentemperatur während der Fahrt des Doppelstockwagens untersucht. Als Grundlage gilt der linke Bereich in Abb. 41 welcher den Heizbereich darstellt. Das Minimum des Stundenenergieverbrauches liegt in Abb. 41 bei einer Temperaturdifferenz von -4K. Unterhalb von diesem Minimum steigen die Energiedaten kontinuierlich an, weshalb auch von dieser Temperaturdifferenz für die Berechnung der Ersparnisse ausgegangen wird, obwohl der Heizbereich ab einem Wert von 0K anfängt.

Die allgemeine Gleichung für die Berechnung der einzelnen Energieersparniswerte bei einer Temperaturabsenkung von  $i$  Kelvin ist:

$$\Delta E_{n-1} = E_{v,n-i} - E_{v,n}$$

mit  $-22 \leq n \leq -4$

und  $1 \leq i \leq 5$

$\Delta E$ .... Energieersparnis pro  $\Delta T$

$E_v$ .... Energieverbrauch pro  $\Delta T$

$n$ .... einzelne Temperaturdifferenzwerte im Heizbereich von -22K bis -4K

$i$ .... Temperaturabsenkung in Kelvin

Die Energieersparnisse pro  $\Delta T$  werden jeweils den  $(n-1)$ -ten Temperaturdifferenzwerten zugeordnet, da genau bei diesen Werten eine Absenkung durchgeführt werden soll. Um jeder Temperaturdifferenz eine Energieersparnis für eine Absenkung von  $i$  Kelvin zuweisen zu können, wird die Berechnung mit Hilfe der allgemeinen Gleichung für alle

Temperaturdifferenzen im Bereich des Heizens durchgeführt. Diese stammen aus der Datenbank und stellen die errechneten Temperaturdifferenzen ( $T_F$  minus  $T_U$ ) während der Fahrt im Messbereich von 14 Monaten dar. Die Ersparnisse werden den jeweiligen Temperaturdifferenzen einzeln zugeordnet und anschließend summiert. Die Summe der Ersparnisse gibt die Energieersparnis einer Temperaturabsenkung für  $i$  Kelvin der Innentemperatur an.

Um beispielsweise für eine Temperaturabsenkung von 1K bei einer  $\Delta T$  von -4K die Ersparnisse an Energie ausrechnen zu können, muss anstatt des Energieverbrauches bei einer Temperaturdifferenz von -5K, der Energiewert von -4K betrachtet werden. Die Gleichung für die Berechnung eines einzelnen Energieersparniswertes bei einer Temperaturabsenkung von 1K ist:

$$\Delta E_{-5} = E_{v,-5} - E_{v,-4}$$

$\Delta E_{-5}$ .... Energieersparnis bei einer  $\Delta T$  von -5K

$E_{v,-5}$ ... Energieverbrauch bei einer  $\Delta T$  von -5K

$E_{v,-4}$ ... Energieverbrauch ein  $\Delta T$  von -4K

$n$ ... einzelner Temperaturdifferenzwert von -4K

$i$ ... Temperaturabsenkung von 1K

Der Energieverbrauch von -5K wird vom Stundenenergieverbrauch von -4K subtrahiert, um die Energieersparnis zu erhalten. Die Zuordnung der Ersparnis erfolgt bei einer Temperaturdifferenz von -5K, da genau bei diesem Wert eine Absenkung durchgeführt werden soll.

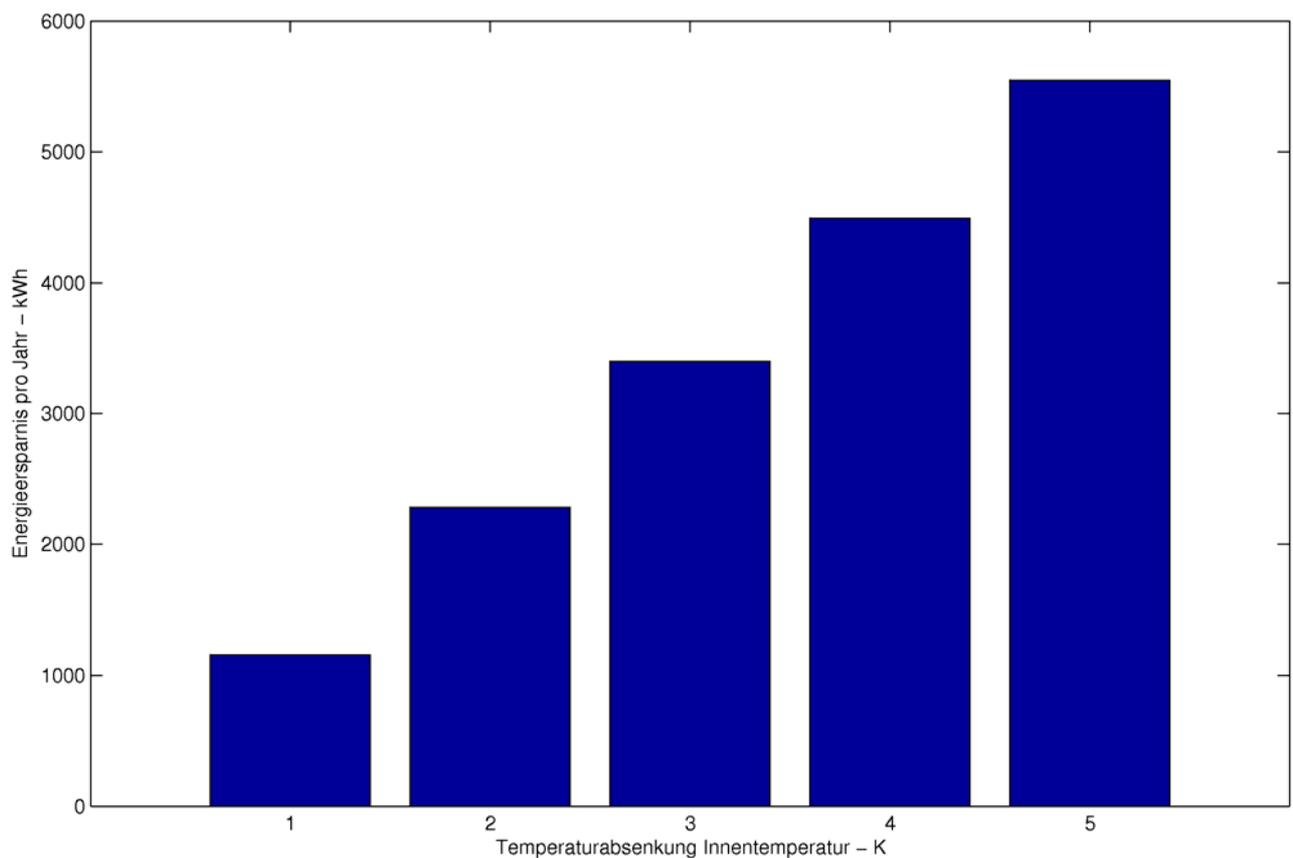


Abb. 48 Abschätzung der Energieersparnis während der Fahrt bei verschiedenen Temperaturabsenkungen der Innentemperatur

Um zu den Abschätzung der Energieersparnisse pro Jahr, die in Abb. 48 dargestellt sind, zu gelangen, müssen folgende Berechnungen durchgeführt werden:

$$f = \frac{525.600 \text{ min}}{550.920 \text{ min}} = 0,9540$$

$f$ ... Umrechnungsfaktor

550.920.....Minuten im Zeitraum vom 28. Mai 2008 22:35 Uhr bis 15. Juni 2009 12:35 Uhr

525.600.....Minuten eines Jahres

$$E_{\text{Jahr}} = E_n \cdot f$$

$E_{\text{Jahr}}$ ...Energieersparnis pro Jahr

$E_n$ .... Energieverbrauch in einem Zeitraum

$f$ ... Umrechnungsfaktor

$n$ .... 14 (betrachteter Zeitraum von 14 Monaten)

Die durchgeführten Berechnungen ergeben aufgrund der vorgegebenen Randbedingungen einen Richtwert für die Energieersparnis. Die Berechnungen basieren auf dem Einsatz dieses Doppelstockwagens, den gegebenen klimatischen Verhältnissen während des Betriebes und dem Besetzungsgrad dieses Wagens. Dabei kann durch die Absenkung der Innentemperatur von 1K eine Abschätzung der Energieeinsparung von zirka 1.100kWh pro Jahr erreicht werden. Durch die Absenkungen um 5K kann eine geschätzte Energieersparnis von maximal 5.500kWh pro Jahr erzielt werden. Bezogen auf den Jahresenergieverbrauch des Doppelstockwagens von 145.350kWh sind ein minimales prognostiziertes Einsparungspotenzial von 0,8% und ein Maximales von 3,8% erreichbar.

Durch die Vermutung eines linearen Zusammenhanges der einzelnen Energieersparnisse in Abb. 48 kann eine Steigung durch Verhältnisbildung der dargestellten Werte errechnet werden. Die Steigung im Balkendiagramm ist ein Kennwert für die Abhängigkeit des Energieverbrauches von der Temperaturabsenkung und wird vom Nullpunkt aus wie folgt berechnet:

$$s = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{(5.546 - 0)}{(5 - 0)}$$

$$s \cong 1.109 \text{ kWh/K}$$

s..... Steigung

$\Delta y$ .... Werte der Energieersparnis

$\Delta x$ .... Anzahl der Temperaturabsenkungen auf der x-Achse

Durch diesen Steigungswert können Rückschlüsse auf weitere Werte gemacht werden. Die Steigung gibt dabei an wie viel Energie pro Temperaturabsenkung während der Fahrt eingespart werden kann. Dadurch kann jederzeit eine Abschätzung der Energieersparnis ohne genauere Berechnung, beispielsweise für eine Temperaturabsenkung von 6K schnell und einfach abgeschätzt werden. Diese Einschätzung kann aber nur dann angenommen werden, wenn eine weitere Linearität der Energieersparniswerte vermutet wird.

## 5.6.2. Energieeinsparungen im Stehen

Für eine Abschätzung einer Energieersparnis durch eine Temperaturabsenkung der Innentemperatur während des Stehens des Doppelstockwagens wird je eine Reduzierung der Temperatur von 1K bis zu 15K untersucht. Als Grundlage gilt ebenfalls, wie im Kapitel 5.6.1, der Energieverbrauch pro Stunde in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz  $\Delta T$ . Dieser wird für

den Betriebszustand des Stehens in Abb. 43 dargestellt. Die Verhältnisse der einzelnen Verbräuche in Abb. 43 weisen keine wesentlichen Veränderungen gegenüber den Verbräuchen bei Fahrt auf. Daher genügt auch im Stehbereich ein linearer Ansatz zur Annäherung der Stundenenergieverbräuche nicht aus und es werden die Werte der Verbräuche aus Abb. 43 direkt verwendet.

Für die Berechnungen der Energieersparnis beim Stehen wird wie beim Fahren nur der Heizbereich ab dem Minimum des Stundenenergieverbrauches betrachtet. Dieses liegt in Abb. 43 bei einer Temperaturdifferenz von -2K. Die Berechnung der einzelnen Energieersparnisse je Temperaturdifferenz für eine Temperaturabsenkung von  $i$  Kelvin erfolgt nach demselben Schema, wie im Punkt 5.6.1, mit einem Unterschied. Dieser bezieht sich auf die einzelnen Temperaturdifferenzwerte  $n$  im Heizbereich. Diese befinden sich nämlich beim Stillstand des Wagens zwischen -20K und -2K.

Die allgemeine Gleichung für die Berechnung der einzelnen Energieersparniswerte bei einer Temperaturabsenkung von  $i$  Kelvin lautet:

$$\Delta E_{n-1} = E_{v,n-i} - E_{v,n}$$

mit  $-20 \leq n \leq -2$

und  $1 \leq i \leq 15$

$\Delta E$ .... Energieersparnis pro  $\Delta T$

$E_v$ .... Energieverbrauch pro  $\Delta T$

$n$ .... einzelne Temperaturdifferenzwerte im Heizbereich von -20K bis -2K

$i$ .... Temperaturabsenkung in Kelvin

Die einzelnen Energieersparniswerte pro  $\Delta T$  werden den jeweiligen errechneten Temperaturdifferenzen ( $T_F$  minus  $T_U$ ), aus der Datenbank, den Stillständen genau zugeordnet. Zu Beginn eines jeden Stillstandes wird die Heizung ausgeschaltet; wodurch eine Einsparung der Energie zustande kommt. Der Innenraum muss aber vor jedem Einsatz wieder aufgeheizt werden. Unmittelbar vor jedem Einsatz ergibt sich dadurch ein Energieaufwand durch die Heizungsanlage. Für eine näherungsweise Berücksichtigung dieser Einsparungen und Energieverbräuche wird eine Unterteilung der Stillstände gemacht. Zu Beginn und zu Ende der Zeitspanne werden je eine Stunde für die Berechnung nicht berücksichtigt. Nur die summierte Energieersparnis zwischen diesen beiden Stunden ergibt die Ersparnis pro Stillstand. Es werden aber nur jene Stillstände betrachtet, welche eine Dauer von über zwei Stunden

aufweisen, da ansonsten der Vergleich zwischen der ersten und letzten Stunde keinen Effekt hat. Da in jedem Stillstand die einzelnen Temperaturdifferenzen mittels Datenbank bekannt sind, werden die Energieersparniswerte pro  $\Delta T$  den Differenzen zugeordnet und anschließend summiert. Das Ergebnis ist eine Abschätzung der Ersparnis an Energie für alle Stillstände in einem Zeitraum von ungefähr 14 Monaten, für eine Absenkung der Innentemperatur von  $i$  Kelvin.

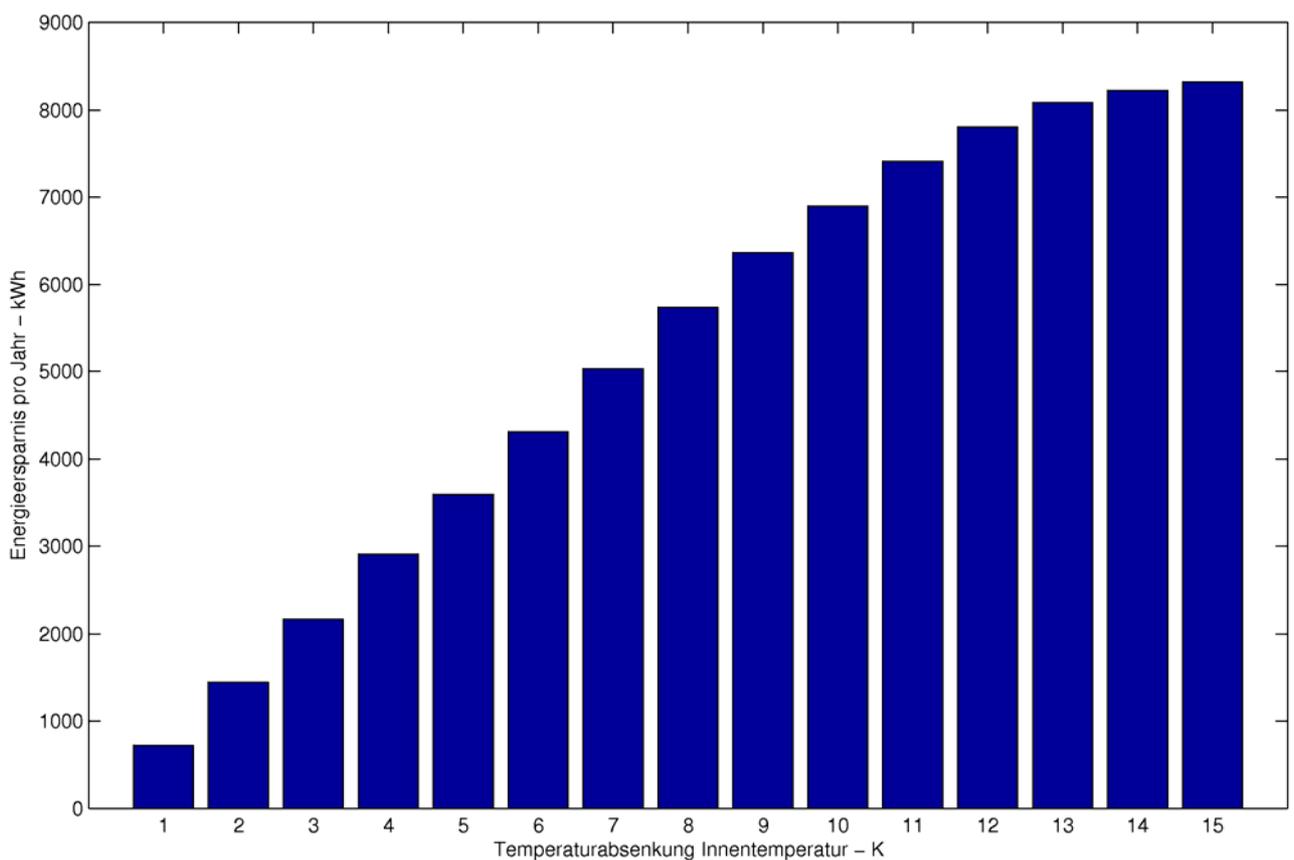


Abb. 49 Abschätzung Energieersparnis während des Stillstandes des Doppelstockwagens bei verschiedenen Temperaturabsenkungen

Um die geschätzten Energieersparnisse pro Jahr zu ermitteln, die in Abb. 49 dargestellt sind, müssen folgende Berechnungen durchgeführt werden:

$$f = \frac{525.600 \text{ min}}{550.920 \text{ min}} = 0,9540$$

$f$ ... Umrechnungsfaktor

550.920.....Minuten im Zeitraum vom 28. Mai 2008 22:35 Uhr bis 15. Juni 2009 12:35 Uhr

525.600.....Minuten eines Jahres

$$E_{Jahr} = E_n \cdot f$$

$E_{Jahr}$ ...Energieersparnis pro Jahr

$E_n$ ... Energieersparnis in einem Zeitraum

$f$ ... Umrechnungsfaktor

$n$ ... 14 (betrachteter Zeitraum von 14 Monaten)

Die durchgeführten Berechnungen basieren auf den vorgegebenen Randbedingungen des Doppelstockwagens aus dem Kapitel 5.6.1 und ergeben einen Richtwert für die Energieersparnis. Dabei kann durch die Absenkung der Innentemperatur um 1K eine abgeschätzte Energieeinsparung von zirka 700kWh pro Jahr erreicht werden. Durch die Absenkungen um 15K der Innentemperatur kann eine Energieersparnis von zirka 8.300kWh pro Jahr erzielt werden. Diese Werte ergeben ein prognostiziertes Einsparungspotenzial von 0,5% und 5,7% bezogen auf den Jahresenergieverbrauch von 145.350kWh des Doppelstockwagens.

Durch die Betrachtung der einzelnen Energieersparnisse in Abb. 49 wird vermutet, dass ein linearer Zusammenhang zwischen den Ersparnissen von 1K bis zu 8K besteht. Für diesen kann mit Hilfe einer Verhältnisbildung der Differenzen der Energieersparnisse dividiert durch die Differenzen der Temperaturabsenkungen die Steigung errechnet und dargestellt werden. Die Steigung im Balkendiagramm der Abb. 49 ist dadurch ein Kennwert für die Abhängigkeit des Energieverbrauches von der Temperaturabsenkung und wird vom Nullpunkt aus wie folgt berechnet:

$$s = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{(5.734 - 0)}{(8 - 0)}$$

$$s \cong 717\text{kWh/K}$$

$s$ .... Steigung

$\Delta y$ ... Werte der Energieersparnis

$\Delta x$ ... Anzahl der Temperaturabsenkungen auf der x-Achse

Durch diesen Steigungswert können Rückschlüsse wie im Kapitel 5.6.1 auf weitere Werte gemacht werden. Die Steigung gibt dabei an wie viel Energie pro Temperaturabsenkung während des Stillstandes eingespart werden kann.

## 5.7. Energieeinsparungen durch Außerbetriebnahme der Heizung

Der Doppelstockwagen wird im Betriebszustand des Stehens üblicherweise durchgehend geheizt, auch wenn sich dieser längere Zeit im Stillstand befindet und der Wagen vollkommen leer ist. Als hypothetischer Ansatz wird nun angenommen, dass in diesen Stehzeiten die Heizung nach einer Stunde ausgeschaltet wird. Dieser Ansatz wird aber nur in der Heizperiode in Betracht gezogen. In Folge dessen kommt es zur Energieeinsparung, da keine Energie für die Klimaregelung im Inneren des Doppelstockwagens gebraucht wird. Es muss aber berücksichtigt werden, dass damit in den kalten Jahreszeiten die Temperatur im Inneren sinkt. Daher würde sich vor jedem Einsatz ein Energieaufwand ergeben, da die Heizungsanlage den Innenraum wieder auf eine Temperatur von zirka 23°C aufheizen müsste. Weiters ist darauf zu achten, dass bei wichtigen Systemen, beispielsweise beim Wassertank für die Wasserversorgung der Toiletteneinheit, die nicht gefrieren darf, ein Frostschutz eingebaut werden müsste. Da dies mit den momentan betriebenen Doppelstockwagen bei den Österreichischen Bundesbahnen nicht umgesetzt werden kann, ist die Energieeinsparung durch Außerbetriebnahme der Heizung eine reine Annahme.

Um eine Abschätzung der Energieersparnis zu erhalten, wird wie in Kapitel 5.6.2 eine Zeitspanne des Stillstandes des Wagens in drei Kategorien eingeteilt. Um die Ersparnis in so einem Fall für eine Zeitspanne des Stillstandes berechnen zu können, wird der Verbrauch je fünf Minuten in den dazwischen liegenden Minuten betrachtet und aufsummiert. Diese Summe ergibt nun den Energieverbrauch je Stillstand, wobei nur jene, die eine Mindestdauer von zwei Stunden aufweisen, berücksichtigt werden. Das Ergebnis der Aufsummierung der einzelnen Ersparnisse je Stillstand ist eine Abschätzung der Energieersparnis für alle Stillstände in einem Zeitraum von ungefähr 14 Monaten.

Um nun die Energieersparnis pro Jahr zu ermitteln, muss die Energieersparnis während der 14 Monate mit dem Umrechnungsfaktor  $f$  aus der Gleichung aus dem Kapitel 5.6.2 multipliziert werden.

$$E_{Jahr} = f \cdot \sum_{i=1}^n E_i = 12.553 \text{ kWh}$$

$E_{Jahr}$ ... Energieersparnis pro Jahr

$E_i$ ... Energieersparnis pro Stillstand

$f$ ... Umrechnungsfaktor

$n$ ... Anzahl der Stillstände in den betrachteten 14 Monaten (7. Mai 2008 bis 30. Juni 2009)

Das Resultat dieser Berechnung ist eine Abschätzung der Energieersparnis von zirka 12.500kWh pro Jahr, wenn im Doppelstockwagen nach einer Stunde die Heizung ausgeschaltet und eine Stunde vor der nächsten Fahrt der Wagen wieder beheizt wird. Dieses Ergebnis basiert auf den vorgegebenen Daten und Randbedingungen dieses betrachteten Doppelstockwagens. Im Bezug auf den Jahresverbrauch des Wagens von 145.350kWh wird ein prognostiziertes Einsparungspotential von 8,6% erreicht.

## 5.8. Dimensionen von erzielbaren Energieeinsparungen

Für die Darstellung der Größenverhältnisse der Ersparnisse wird eine Kaplan-Turbine verwendet, die in Laufkraftwerke eingesetzt wird. Diese nutzt die Wasserkraft um dabei die kinetische Energie des Wassers mittels der Turbine in mechanische Energie umzuwandeln. Dies bewirkt eine Drehung der Turbinenwelle, die als Antrieb eines Generators zur Stromerzeugung verwendet wird.

Um einen Vergleich der Ersparnisse mit solch einer Turbine zu treffen, wird die Leistung durch die Kennlinie für Wasserturbinen bei einem Wirkungsgrad von 80% ermittelt (siehe Diagramm in [22]). Diese Leistung ergibt sich durch die angenommenen Eingangsdaten, für das Diagramm der Kennlinie, von 100m<sup>3</sup>/s Schluckvolumen und 10m Fallhöhe mit einem Wert von zirka 9MW. Unter dem Begriff Schluckvolumen wird jene Wassermenge verstanden, die die Turbine pro Umdrehung verbraucht. Die Fallhöhe entspricht der Höhe zwischen Ober- und Unterwasser (Wasserstände vor und nach einem Laufkraftwerk), abzüglich des Verlustes durch Reibung des Wassers in den Rohrleitungen.

### 5.8.1. Temperaturabsenkung im Betriebszustand des Fahrens

Für die Betrachtung der Energieersparnis wird eine maximale Temperaturabsenkung von 5K mit einer Ersparnis von zirka 5.500kWh pro Doppelstockwagen untersucht. In Österreich befinden sich im Jahre 2009 324 Doppelstockwagen im Betrieb der ÖBB. Eine geschätzte Ersparnis für die komplette Nahverkehrsflotte beträgt dadurch 1.782MWh pro Jahr. Es werden für die Gesamtersparnisberechnung alle 324 Wagen in Betracht gezogen. Eine Reduktion um 20% der Wagen wegen Werkstattaufenthalte wird nicht vorgenommen, da diese schon in den Einsatzauswertungen enthalten sind. Die Leistungsdauer der Turbine in Abhängigkeit der Gesamtenergieersparnis wird durch folgende Gleichung berechnet:

$$t = \frac{E_{\text{Jahr}}}{P} = \frac{1.782\text{MWh/Jahr}}{9\text{MW}} = 198\text{h/Jahr}$$

$E_{Jahr}$ ...Energieersparnis pro Jahr für 324 Doppelstockwagen

$P$ ... Leistung einer Kaplan-Turbine

$t$ ... Zeitdauer pro Jahr in Stunden

### 5.8.2. Temperaturabsenkung im Betriebszustand des Stehens

Für die Betrachtung der Energieersparnis wird eine maximale Temperaturabsenkung von 15K mit einer Ersparnis von 8.300kWh pro Doppelstockwagen untersucht. Eine geschätzte Ersparnis für die komplette Nahverkehrsflotte beträgt dadurch 2.689MWh pro Jahr. Um eine Leistungsdauer der Turbine in Abhängigkeit der Gesamtenergieersparnis zu berechnen, wird folgende Gleichung verwendet:

$$t = \frac{E_{Jahr}}{P} = \frac{2.689\text{MWh/Jahr}}{9\text{MW}} = 299\text{h/Jahr}$$

$E_{Jahr}$ ...Energieersparnis pro Jahr für 324 Doppelstockwagen

$P$ ... Leistung einer Kaplan-Turbine

$t$ ... Zeitdauer pro Jahr in Stunden

### 5.8.3. Außerbetriebnahme der Heizung

Die geschätzte Energieersparnis ist 12.500kWh pro Doppelstockwagen. Eine geschätzte Ersparnis für die komplette Nahverkehrsflotte beträgt dadurch 4.050MWh pro Jahr. Um eine Leistungsdauer der Turbine in Abhängigkeit der Gesamtenergieersparnis zu berechnen, wird folgende Gleichung verwendet:

$$t = \frac{E_{Jahr}}{P} = \frac{4.050\text{MWh/Jahr}}{9\text{MW}} = 450\text{h/Jahr}$$

$E_{Jahr}$ ...Energieersparnis pro Jahr für 324 Doppelstockwagen

$P$ ... Leistung einer Kaplan-Turbine

$t$ ... Zeitdauer pro Jahr in Stunden

## 6. Zusammenfassung

Eine Analyse des Energiebedarfs eines modernen Personen-Reisewagens gewinnt aufgrund des verstärkten, energiebewussten Denkens zunehmend an Bedeutung. Die Anzahl der eingesetzten Komfortsysteme im Personenverkehr steigt stetig. Ebenso wächst auch der Gesamtenergieverbrauch für den Betrieb dieser Systeme. Gerade die Klimatisierung, welche sowohl das Kühlen, als auch das Heizen des Fahrgastraumes umfasst, beansprucht hierbei einen wesentlichen Anteil des Verbrauchs.

Die vorliegende Diplomarbeit befasst sich neben der geschichtlichen Entwicklung des Doppelstockwagens und den technischen Daten, vor allem mit der Analyse des Energiebedarfs der Klimatisierung. Hierfür rüsteten die Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB) einen Doppelstockwagen mit Messeinrichtungen aus und führten eine Langzeitmessung durch. Erfasst wurden die Temperaturen der Um- und der Frischluft, welche der Innen- und der Außentemperatur entsprechen, sowie die von den Komfortsystemen aufgenommene Energie. Der Beobachtungszeitraum erstreckte sich über 14 Monate, von Mai 2008 bis Juni 2009. Die Messdaten wurden in den Messeinrichtungen lokal gespeichert. Die regelmäßige Auslesung erfolgte in Anlehnung an den Betrieb, wobei sich aufgrund begrenzter Speicherkapazität Aufzeichnungslücken ergaben. Diese wurden durch eine durchgängige Betrachtung von Monatsmittelwerten nicht berücksichtigt. Weiters wurden für die Analyse Daten über den genauen Einsatz im österreichischen Bahnnetz von den ÖBB zur Verfügung gestellt. Für eine effiziente und umfassende Auswertung wurde mit Hilfe des Programms Matlab eine Datenbank aufgebaut, welche eine flexible Filterung und Verknüpfung aller Daten ermöglicht. Die Basis der Datenbank stellt eine Zeitlinie mit einer Auflösung von 5 Minuten dar. Der Beginn und das Ende der Messdatenerhebung bilden den äußeren Rahmen der Datenbank.

Die Auswertung zeigte, dass sich der Energieverbrauch unterschiedlich in Abhängigkeit vom Einsatz des Doppelstockwagens verhält. Während des aktiven Stillstandes, in welchem die Komfortsysteme in Betrieb sind, wurde in der Regel mehr Energie aufgewendet als während der Fahrt. Dieser Verbrauchsunterschied kann durch die Wärmeabgabe der Fahrgäste erklärt werden. Während der Fahrt wird von einem deutlich höheren Besetzungsgrad als bei aktiven Stillstandszeiten ausgegangen, da einerseits bei Pausen bis zu einer Stunde meist die mittlere Anzahl von Fahrgästen durch Ausstiege direkt nach Ankunft und zeitnahe Zustiege vor Abfahrt abnimmt. Andererseits handelt es sich bei aktiven Stillständen länger als eine Stunde in der Regel um Betriebspausen, in welchen sich keine Fahrgäste im Wageninneren befinden

Weiters wurde der Zusammenhang zwischen Temperaturdifferenz von Außen- und Innenraumtemperatur und verbrauchter Energie untersucht, um Einsparungspotentiale durch Temperaturdifferenzabsenkungen im Fahrgastraum abschätzen zu können. Zwar gilt sowohl für Heiz- als auch für Kühlbetrieb, dass je größer der Betrag der Differenz ist, desto mehr Energie wird benötigt. Doch primär für den Jahresenergieverbrauch ausschlaggebend ist der Heizbetrieb, weshalb nur dieser behandelt wurde.

Bei der Analyse wurde zwischen Fahrt und aktivem Stillstand unterschieden, da unterschiedliche Absenkstrategien in diesen Betriebsphasen möglich sind. Bei Fahrt wurden die Auswirkungen einer geringfügigen, dauerhaften Absenkung untersucht, während in aktiven Stillstandszeiten von längerer Dauer die Absenkung bis zur Frostgrenze näher beleuchtet wurde. Durch eine Absenkung der Innentemperatur um 2 Kelvin während der Fahrt bezogen auf den Jahresenergieverbrauch des Doppelstockwagens von 145.350kWh ist ein prognostiziertes Einsparungspotenzial von 1,6% erreichbar. Weiters wurde in der Betriebsphase des Stillstandes durch die Vermutung eines linearen Zusammenhanges der einzelnen Energieersparnisse die Steigung errechnet. Diese zeigt mit einem Wert von 717kWh/K die Abhängigkeit des Energieverbrauches von der Temperaturabsenkung der einzelnen Werte. Darüber hinaus wurde auch die Obergrenze des Einsparungspotentials im aktiven Stillstand abgeschätzt, indem während längerer Standzeiten die Heizung deaktiviert wurde. Diese Realisierung würde jedoch zumeist technische und logistische Änderungen voraussetzen.

## 7. Quellenverzeichnis

### 7.1. Literaturverzeichnis

- [1] Austria Chronik (1997). „Stockwagen im Einsatz“. Fachzeitschrift „*Eisenbahn*“, Ausgabe 12/1997, S 494-495
- [2] Bühl A. & Zöfel P. (2002). „SPSS 11“. München Verlag Pearson Studium. S 118, ISBN 3-8273-7037-X
- [3] *Fachzeitschrift „ZEV+DET Glas.“, Ausgabe Nr.9 vom September 1993*
- [4] Haller Gabriel (2008, 19. September). „Energie-Verbrauchsanalyse und Einsparpotentiale bei Klimaanlage“. Fachzeitschrift „*Neue Bahn*“, 2008, S 14A-16A
- [5] Haschke G. (2009). „Beschreibung Energieversorgung, Energieverteilung Wagen“ der Fa. Siemens, 17.02.2009
- [6] Heless Hermann (1997). „Stockwagen in Österreich“. Fachzeitschrift „*Eisenbahn*“, Ausgabe 2/1997, S 72-73
- [7] Ladendorf Kurt Friedrich (1993). „Fahrzeuge der Deutschen Waggonbau AG – Produktsortiment und Innovationen im Schienenfahrzeugbau“. Fachzeitschrift „*Eisenbahningenieur*“, Ausgabe 44 (1993) 4, S 194-195
- [8] Looser Roland (2003). „Statistische Messdatenauswertung“. Franzis Verlag Poing. S 128, ISBN 3-7723-5445-9
- [9] Marinell Gerhard, Steckel-Berger Gabriele (2008). „Einführung in die Statistik – Anwendungsorientierte Methoden zur Datenauswertung“. Oldenburg Verlag München, 2. Auflage. S 11ff, ISBN 978-3-486-58713-5
- [10] „Stadt-, Land- und Werksverkehr“ Fachzeitschrift „*Eisenbahn*“, Ausgabe 6/1993, S 113-115
- [11] „Stockwagen bei den ÖBB“. Fachzeitschrift „*Eisenbahn*“, Ausgabe 2/1997, S 74-75
- [12] „Technische Beschreibung Doppelstockzwischenwagen“ der Fa. Siemens, Version 2, 29.06.2006

## 7.2. Internetverzeichnis

- [13] [http://www.oebb.at/pv/de/Rund\\_ums\\_Reisen/Zugkategorien/Nahverkehrszuege/doppestockwagen/index.jsp](http://www.oebb.at/pv/de/Rund_ums_Reisen/Zugkategorien/Nahverkehrszuege/doppestockwagen/index.jsp)  
„Doppelstockwagen“  
Homepage der ÖBB, 19.3.2009
- [14] [http://www.oebb.at/pv/de/Pressecorner/Presseinformationen/2009\\_06\\_10\\_Letzter\\_Doppelstock-Wagen\\_auf\\_Schiene/index.jsp](http://www.oebb.at/pv/de/Pressecorner/Presseinformationen/2009_06_10_Letzter_Doppelstock-Wagen_auf_Schiene/index.jsp)  
„Letzter Doppelstock-Wagen auf Schiene“ (2009, 10. Juni)  
Homepage der ÖBB, 16.9.2009
- [15] [http://www.mobility.siemens.com/ts/de/pub/products/tr/services/travel/viaggio\\_twin.htm](http://www.mobility.siemens.com/ts/de/pub/products/tr/services/travel/viaggio_twin.htm)  
Homepage der Fa. Siemens, 16.9.2009
- [16] <http://de.wikipedia.org/wiki/Doppelstockwagen>  
„Doppelstockwagen“  
Wikipedia, Die freie Enzyklopädie, 16.9.2009
- [17] <http://de.wikipedia.org/wiki/Häufigkeit>  
„Häufigkeit“  
Wikipedia, Die freie Enzyklopädie, 16.9.2009
- [18] <http://www.lascarelectronics.com/main/index.php>  
„Luftfeuchte, Temperatur und Taupunkt USB-Datenerfassungsgerät“  
Homepage der Fa. Lascar Electronics, 19.2.2010
- [19] <http://www.mzandee.net/~zandee/statistiek/stat-online/chapter4/pearson.html>  
„Online statistics Home Page“, 19.2.2010
- [20] <http://www.lem.com/hq/de/content/view/280/219/>  
„Energiezähler“  
Homepage der Fa. LEM, 23.2.2010
- [21] <http://www.virtualmarket.innotrans.de/index.php5?id=1020680&Action=showProduct>  
„Informationen über den Energiezähler“  
Homepage der Internationalen Fachmesse für Verkehrstechnik, 23.2.2010
- [22] <http://de.wikipedia.org/wiki/Wasserturbine>  
„Wasserturbinen“  
Wikipedia, Die freie Enzyklopädie, 25.2.2010

[23] [http://www.zamg.ac.at/klima/klima\\_monat/temperaturmittel/?jahr=2009&monat=01](http://www.zamg.ac.at/klima/klima_monat/temperaturmittel/?jahr=2009&monat=01)

„Temperaturtagesmittel für Jänner 2009“

Homepage der ZentralAnstalt für Meteorologie und Geodynamik, 25.2.2010

### 7.3. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Innere und äußere Störgrößen [4].....	6
Abb. 2 Streudiagramm mit linearem Zusammenhang zwischen den Variablen x und y [19]....	11
Abb. 3 Streudiagramm mit keinem linearen Zusammenhang zwischen den Variablen x und y [19].....	11
Abb. 4 Postkutsche mit Oberdecksitzen [16].....	14
Abb. 5 Doppelstock-Wagen 1876 [16].....	14
Abb. 6 Doppelstöcker 1873 [6].....	15
Abb. 7 Doppelstöcker 1883 [6].....	15
Abb. 8 Doppelstöcker 1880 [6].....	16
Abb. 9 Doppelstöcker der Kremsthal-Bahn 1880 [6] .....	16
Abb. 10 „Stockwerkswagen in Österreich“ 1950 [6] .....	16
Abb. 11 Aufriss und Grundriss des Doppelstockwagens 1993 [10].....	18
Abb. 12 Grundriss und Aufriss eines Doppelstockwagens 1997 [11].....	19
Abb. 13 1:1 Abbildung eines Doppelstockwagens 1997 [1].....	20
Abb. 14 Bestuhlung in oberer Etage [11].....	21
Abb. 15 Bestuhlung in unterer Etage [11].....	21
Abb. 16 unterer Teil des Hochspannungs-Schaltgeräteschranks.....	24
Abb. 17 Temperaturfühler zur Messung von Temperatur und relativer Luftfeuchte, welcher im Doppelstockwagen zur Erfassung der Frisch- und Umlufttemperatur eingebaut wurde. [18] .....	27
Abb. 18 Frischlufttemperaturfühler über dem WC .....	28
Abb. 19 Frischluftansaugung an der Außenseite eines Doppelstockwagens .....	28
Abb. 20 Gangbereich vor WC .....	29
Abb. 21 Umluftenergiefühler.....	29
Abb. 22 Energiezähler.....	31
Abb. 23 Zeittafel über die Aufzeichnung der Energiedaten .....	32
Abb. 24 Auszug aus den aufgezeichneten Informationen der Energiemessung im dat-Format .....	33
Abb. 25 Energiedaten an einem typischen Sommertag mit einem konstantem Energiewert ...	34
Abb. 26 Energiedaten an einem typischen Wintertag mit einem fortlaufendem, steigendem Energiewert.....	34

Abb. 27 Auszug aus den aufgezeichneten Informationen der Temperaturmessung im txt-Format.....	35
Abb. 28 Frischluftdaten eines typischen Sommertags.....	35
Abb. 29 Umluftdaten eines typischen Sommertags.....	36
Abb. 30 Auszug aus den aufgezeichneten Informationen der Einsatzdaten im xls-Format.....	36
Abb. 31 Beispiel der Einsatzdaten .....	37
Abb. 32 Monatsmittelwerte der Frischlufttemperatur im Zeitraum von 13 Monaten .....	43
Abb. 33 Monatsmittelwerte der Umlufttemperatur im Zeitraum von 13 Monaten.....	44
Abb. 34 Tagesmittel der Temperaturdifferenzen, welche durch Subtraktion der Frischlufttemperatur $T_F$ von der Umlufttemperatur $T_U$ berechnet wird, in Kelvin .....	46
Abb. 35 Temperaturdifferenzen der Monatsmittelwerte, welche durch Subtraktion der Frischlufttemperatur $T_F$ von der Umlufttemperatur $T_U$ berechnet wird, in Kelvin .....	47
Abb. 36 5-Minuten Mittelwert des Energieverbrauchs des Doppelstockwagens .....	49
Abb. 37 Tagesenergieverbrauch basierend auf Monatsmittel des 5-Minuten Energieverbrauchs .....	50
Abb. 38 Monatsenergieverbrauch basierend auf Monatsmittel des 5-Minuten Energieverbrauchs .....	51
Abb. 39 Vergleich des Tagesenergieverbrauchs zwischen Fahren und aktivem Stehen des Doppelstockwagens pro Monat.....	52
Abb. 40 Energieverbrauch pro Jahr während einer Stehdauer des Doppelstockwagens aufgetragen in 3 Klassen: bis zu eine Stunde, von einer Stunde bis zu vier Stunden und größer als vier Stunden.....	54
Abb. 41 Zusammenhang zwischen mittlerem Stundenenergieverbrauch des Doppelstockwagens während der Fahrt und der Temperaturdifferenz (Frischlufttemperatur $T_F$ minus Umlufttemperatur $T_U$ ) .....	57
Abb. 42 Histogramm der Temperaturdifferenzdaten beim Stundenenergieverbrauch während der Fahrt des Doppelstockwagens.....	57
Abb. 43 Zusammenhang zwischen mittlerem Stundenenergieverbrauch des Doppelstockwagens während des Stillstandes und der Temperaturdifferenz (Frischlufttemperatur $T_F$ minus Umlufttemperatur $T_U$ ).....	60
Abb. 44 Histogramm der Temperaturdifferenzdaten beim Stundenenergieverbrauch während des Stillstandes des Doppelstockwagens .....	60

---

Abb. 45 Vergleich des mittleren Stundenenergieverbrauchs bei der Fahrt bzw. bei Stillstand des Doppelstockwagens in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz (Frischlufftemperatur $T_F$ minus Umlufttemperatur $T_U$ ) .....	61
Abb. 46 Vergleich der Stundenenergieverbräuche zwischen Fahren und Stehen des Doppelstockwagens in Abhängigkeit von der Frischlufttemperatur, bei einer Gesamtdatenmenge von 15.915 beim Fahren und 20.530 beim Stehen. ....	63
Abb. 47 Zusammenhang zwischen mittlerem Stundenenergieverbrauch des Doppelstockwagens während der Fahrt und der Temperaturdifferenz (Frischlufftemperatur $T_F$ minus Umlufttemperatur $T_U$ ) mit Darstellung der Regressionsgeraden (schwarze Linie) .....	65
Abb. 48 Abschätzung der Energieersparnis während der Fahrt bei verschiedenen Temperaturabsenkungen der Innentemperatur.....	68
Abb. 49 Abschätzung Energieersparnis während des Stillstandes des Doppelstockwagens bei verschiedenen Temperaturabsenkungen.....	71