Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Verkehr BAV
Programm Umsetzung der Energiestrategie 2050
im öffentlichen Verkehr (ESöV 2050)

Energieeffizienz von Heizung, Lüftung und Kühlung im Öffentlichen Verkehr

Projekt G055: 01.04.2015 bis 31.03.2017

Schlussbericht

Prof Dr. Peter Oelhafen, Departement Physik der Universität Basel (DPUB)
Klingelbergstrasse 82 4056 Basel, peter.oelhafen@unibas.ch, https://www.unibas.ch/

Andreas Tonin, Departement Physik der Universität Basel (DPUB)
Klingelbergstrasse 82 4056 Basel, andreas.tonin@unibas.ch, https://www.unibas.ch

Impressum

Herausgeberin:
Bundesamt für Verkehr BAV
Programm Umsetzung der Energiestrategie 2050 im öffentlichen Verkehr (ESöV 2050)
CH-3003 Bern

Programmleiter
Tristan Chevroulet, BAV

Projektnummer: G055
Bezugsquelle
Kostenlos zu beziehen über das Internet
www.bav.admin.ch/energie2050

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor –in oder sind ausschliesslich die Autoren –innen dieses Berichts verantwortlich.

Bern, den 21.03.2018

Universität Basel

Departement
Physik

Basel, 21. März 2018

Prof. Dr. Peter Oelhafen
Universität Basel
Departement Physik
Klingelbergstrasse 82
4056 Basel/Schweiz
[peter.oelhafen@unibas.ch]

Schlussbericht des Projekts G055

Energieeffizienz von Heizung, Lüftung und Kühlung im Öffentlichen Verkehr - 01.04.2015 bis 31.03.2017

Antragsteller des Projekts:
Prof. Dr. Ernst Meyer Departement Physik der Universität Basel (DPUB)

Projektleiter:
Prof. Dr. Peter Oelhafen (DPUB)

Autoren des vorliegenden Berichts:
Andreas Tonin und Peter Oelhafen (DPUB)

Start des Projekts: 18.09.2015

Inhalt

Kapitel 1: Vorbemerkungen zum vorliegenden Schlussbericht Seite 3

Um welche Fahrzeuge und welche Transportunternehmen geht es in diesem Bericht?

Kapitel 2: Zusammenfassung des Schlussberichts Seite 4

Auswertungen und Erkenntnisse aus den Messungen?

Kapitel 3: Vorstellung von acht Auswertungen an verschiedenen Fahrzeugen Seite 6

Teil 1 - Energieeffizienz der Projektfahrzeuge im Vergleich Seite 7

Teil 2 - SOB FLIRT: Energiesparvorschläge der Uni Basel Seite 23

Teil 3 - Einfluss der Türöffnung auf die Heizleistung beim ST4 Seite 37

Teil 4 - Einsparpotential beim NINA mit verbesserter Hülle Seite 44

Teil 5 - Schlummerbetrieb bei NINA GEX und ICN Seite 48

Teil 6 - Reduktion der Lüfterleistung beim ST4 Seite 51

Teil 7 - Auswirkung der Feuchtigkeit auf die Heizenergie (FLIRT NINA) Seite 55

Teil 8 - RhB Steuerwagen Referenzfahrzeug BDt 1758 Seite 66

Kapitel 4: Fazit des vorliegenden Schlussberichts

Fazit der kurz zusammengefassten Teile Seite 76

Chapitre 4: Conclusions du présent rapport final

Conclusions des parties brièvement résumées page 78

Kapitel 1: Vorbemerkungen zum vorliegenden Schlussbericht

Um welche Fahrzeuge und welche Transportunternehmen geht es in diesem Bericht?

Zum Zeitpunkt des Starts des vorliegenden Projekts im September 2015 waren die folgenden Fahrzeuge mit Messeinrichtungen des DPUB[1] unterwegs:
RhB Glacier Express Bp2538 (GEX), BLS NINA-RABe525-06, SOB FLIRT-RABe526-48 und SBB-RABDE-ICN-500-016 (ein B-Wagen). Im Dezember 2015 wurde dann der Messbetrieb des ST4 Trolleybusses Nr. 871 der tl[2] aufgenommen. Zuvor wurden im Jahr 2015, die ebenfalls mit Messeinrichtungen ausgestatteten Fahrzeuge RhB EW2-B2383 und RhB EW4-B2497, nach einem mehrjährigen Einsatz, die Messkampagnen beendet.

Für ein Projekt der BFH[3] konnte im Dezember 2016 der Steuerwagen RhB-BDt1758 mit einer Messeinrichtung ausgerüstet werden (siehe Seite 65).
Auf Initiative der tl (Métro) planen wir seit Januar 2017 die Verbrauchs- und Klimadatenerfassung eines Fahrzeugs der tl, Linie M1, die Lausanne Flon und Renens mit insgesamt 15 Haltestellen miteinander verbindet. Die Linie bedient unterwegs auch die Uni Lausanne und die EPFL. Mittlerweile ist das Konzept der Messeinrichtung für das Fahrzeug der Linie M1 (TSOL3) weitgehend vorbereitet.

Im vorliegenden Bericht werden Datenauswertungen, neue Erkenntnisse, Szenarien zur Steigerung der Energieeffizienz und neue Auswertungsmethoden an Hand von sechs Fahrzeugen, vom GEX bis zum Trolleybus ST4 präsentiert.

Wir danken folgenden Institutionen und Firmen für die grosszügige Unterstützung dieses Projektes:

- BAV[4] (finanzielle Unterstützung)
- EPFL[5], HSLU[6], BFH, DPUB (Mitarbeit, Eigenleistungen)
- RhB[7], BLS[8], SOB[9], SBB[10], tl (Einbau, Betrieb, Eigenleistungen)
- Opit[11], PI-System[12], HESS[13], Stadler[14], Kiepe Electric[15] (technische Unterstützung)

[1] DPUB : Departement Physik der Universität Basel
[2] tl : Transports Publics de la Région Lausannoise SA
[3] BFH: Berner Fachhochschule in Biel
[4] BAV: Bundesamt für Verkehr
[5] EPFL : Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
[6] HSLU: Hochschule Luzern
[7] RhB: Rhätische Bahn
[8] BLS: Bern-Lötschberg-Simplon Bahn
[9] SOB: Südostbahn
[10] SBB: Schweizerische Bundesbahn
[11] Opit: Opit Solutions AG
[12] PI-System: PI-System GmbH
[13] HESS: Carosserie HESS AG
[14] Stadler: Stadler Rail AG

Kapitel 2: Zusammenfassung des Schlussberichts

Der vorliegende Schlussbericht beinhaltet umfassende Energieverbrauchs- und Klimadaten von Fahrzeugen des öffentlichen Verkehrs, die mit entsprechenden, von uns konzipierten und realisierten Messeinrichtungen, gewonnen wurden. Dabei profitieren wir bei den Datenauswertungen von der Tatsache, dass sich unsere Messkampagnen über mehrere Jahre erstrecken, was bei der Auswertung der Daten zusätzliche statistische Auswertungsmethoden mit sehr grossen Datenmengen ermöglicht.

Acht verschiedene Auswertungen haben wir beispielhaft im Hauptteil dieses Berichts wiedergegeben. Die ausgewählten Themen erstrecken sich von klassischen, praktischen Energieverbrauchsanalysen von mehreren Fahrzeugen (Teil 1), die über bekannte Bezugsgrössen für verschiedene Fahrzeuge und Verbrauchsgrössen wie Traktionsenergie, HLK (Heizungs-, Lüftungs-, und Kühlenergie) und Nebenverbraucher miteinander verglichen werden, bis hin zu komplexeren Auswertungen.

Dabei handelt es sich um Datenauswertung die auf sehr grossen Datenmengen (z.B. tausende von Stundenverbrauchswerten der Heizung) basieren. Auswertungen, die auf einer gut gesicherten statistischen Abhängigkeit beruhen, erlauben z.B. den Einfluss der stündlichen, aufsummierten Türöffnungszeiten auf die stündliche Heizenergie zu bestimmen. Nach dieser Methode wurden die Abhängigkeiten in Teil 3, Einfluss der Türöffnungszeiten auf den Heizenergieverbrauch beim ST4 oder in Teil 7, Einfluss der Aufnahme von Feuchtigkeit durch einen offenporigen, hydrophilen Wärmedämmstoff auf den Heizenergieverbrauch, geklärt. Im Teil 7 ist der Einfluss der Feuchtigkeit auf den Wärmedämmstoff im Diagramm der spezifischen Heizleistung direkt qualitativ (wenn auch nicht quantitativ) direkt sichtbar. Interessant sind die Resultate der Teile 3 und 7 deshalb, weil die Einflüsse der Türöffnungen wie auch der Feuchtigkeit im Wärmedämmstoff nicht gravierend sind. Im ersten Fall werden die Heizenergieverluste mindestens teilweise durch den Wärmeeintrag der Passagiere kompensiert da lange Türöffnungszeiten mit einer hohen Fahrgastbelegung korreliert sind. Nach unserem Wissen sind unsere Datenauswertungen der Teile 3 und 7 als Innovationen zu betrachten. Die Voraussetzung für Datenauswertungen nach dem hier geschilderten Verfahren beruhen auf statistisch gut gesicherten Daten, die nur durch Langzeitmessungen gewonnen werden können. Uns ist auch kein anderes Projekt bekannt das Energieverbrauchswerte im öffentlichen Verkehr über Jahre erfasst und auswertet.

Zu unseren Aufgaben gehört auch Massnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz von Fahrzeugen vorzuschlagen. Das haben wir z.B. auf Wunsch der SOB für einen FLIRT gemacht (Teil 2). Nach unseren Berechnungen könnte mit den anvisierten Massnahmen 10.5% der Nettoenergie[16] eingespart werden. Auch für die tl hatten wir die Möglichkeit effizienzsteigernde Massnahmen zu beurteilen. Auf gezielte Fragen war es uns möglich konkrete Einsparszenarien quantitativ zu beurteilen.

[15] Kiepe Electric: Kiepe Electric GmbH

[16] Nettoenergie = Gesamtverbrauch - Rekuperation

Die bisher grössten Steigerungen der Energieeffizienz konnten beim dreiteiligen NINA der BLS erreicht werden. Durch mehrere Massnahmen konnte in zwei Schritten die Heizenergie pro Personenkilometer gegenüber dem ursprünglichen Zustand um 47% reduziert werden. Im nächsten Schritt soll sogar der U-Wert der Fahrzeughülle von 2.42 W/m^2K auf 1.83 W/m^2K reduziert werden. Dabei soll die Wärmedämmung verbessert werden und die Einflüsse zahlreicher Wärmebrücken durch entsprechende Massnahmen reduziert werden (Teil 4).

Im Teil 8 geht es um ein Projekt, welches von der der Berner Fachhochschule in Biel (BFH)[17] geleitet wird. Es sollen 2 Steuerwagen der RhB mit je einer Messeinrichtung von der DPUB. und von der BFH ausgerüstet werden. Der erste Steuerwagen wird unverändert gelassen und ist das *Referenzfahrzeug* um das es hier geht. Das zweite Fahrzeug soll energetisch derart saniert werden, dass eine optimale Steigerung der Energieeffizienz beim Heizenergieverbrauch durch neue Dämmkonzepte und -Materialien erreicht und gemessen werden kann.

Im Frühjahr 2016 war es uns möglich eine Exkursion mit 8 Teilnehmern aus dem Kreis unserer Projektbeteiligten nach Wien zu organisieren. Bei dieser Gelegenheit konnten wir Rail Tec Arsenal mit dem beeindruckenden Klima-Windkanal besuchen, in dem ganze Züge energetisch und klimatisch untersucht werden können. Dort kann z.B. der mittlere U-Wert von Fahrzeugen bestimmt werden.

Neben Rail Tec konnten wir auch noch Siemens Rail, Bombardier und Liebherr besuchen.

Bei den beiden letzten jährlich stattfindenden Projektmeetings, jeweils im November beim BAV, konnten wir je einen Gastreferenten einladen. Im Jahr 2016 konnten wir Herrn Gabriel Haller von Rail Tec Arsenal zu einem Übersichtsvortrag einladen und im verganenen November informierte uns Herr Renato Gartner über seine Berechnungen zur Sanierung des BLS NINA Fahrzeugs zur Verbesserung des U-Werts des Fahrzeugs und der Sanierung der Wärmebrücken.

[17] Projekttitel: Reduzierung des Heizenergiebedarfs von Bahnfahrzeugen durch eine verbesserte Wärmedämmung der Fahrzeughülle

Kapitel 3: Vorstellung von acht Auswertungen an verschiedenen Fahrzeugen

Die nachfolgenden Auswertungen (Seiten 7 – 76) wurden alle bereits anlässlich von jährlichen Übersichtsprojekttreffen (wie etwa 06.11.2015, 17.11.2016, oder 03.11.2017 beim BAV) oder themenorientierten Treffen (z.B. Auswirkungen durch Feuchteaufnahme von hydrophilen Wärmedämmstoffen auf deren Dämmeigenschaften) kommuniziert, besprochen, und digital interessierten Leuten abgegeben.

Die hier angesprochenen Datenauswertungen stellen eine Auswahl aus einer grösseren Menge von Themen und Aufgaben dar, die wir in unserem Projektantrag auf einer Taskliste festgehalten haben. Diese Liste befindet sich im Anhang zu diesem Schlussbericht.

Die Themen dieses Kapitels werden an Hand früher erstellter Vortragsunterlagen erläutert. Das Layout wurde so gestaltet, dass jeweils die obere Hälfte der Seite die Vortragsfolie mit Diagrammen und/oder Text beinhaltet. Auf der unteren Hälfte der Seite wurden zusätzliche neu erstellte, erklärende Texte hinzugefügt. Dadurch konnte einerseits der Arbeitsaufwand zur Darstellung der acht Auswertungen reduziert werden und, wer weiss, beim Leser vielleicht ein déjà-vu auslösen.

Kapitel 3, Teil 1: Projektfahrzeuge im Vergleich

Die Energieeffizienz der Projektfahrzeuge - Erfassung und Vergleich

Modul M1: Andreas Tonin - Departement Physik, Universität Basel

BLS-Daten (NINA) sind vertraulich und dürfen nicht weitergegeben werden

Inhalt:

1. Grundprinzip der Messeinrichtung (Beispiel: Swisstrolley 4)
2. Hauptverbrauchswerte über ein Jahr (Beispiel: Flirt)
3. Vorstellung und Vergleich der 7 Projektfahrzeuge
4. Klimagerätevergleich FLIRT und ICN

[andreas.tonin@unibas.ch] Projekt: Energieeffizienz von Heizung, Lüftung und Kühlung im ÖV Vortrag: Die EnergieEffizienz der Projektfahrzeuge - Erfassung und Vergleich Halbjahrestreffen: 06.11.2015 1 / 16

Folie 1 – Inhaltsverzeichnis (Projektfahrzeuge im Vergleich)

Motivation für das Projekt

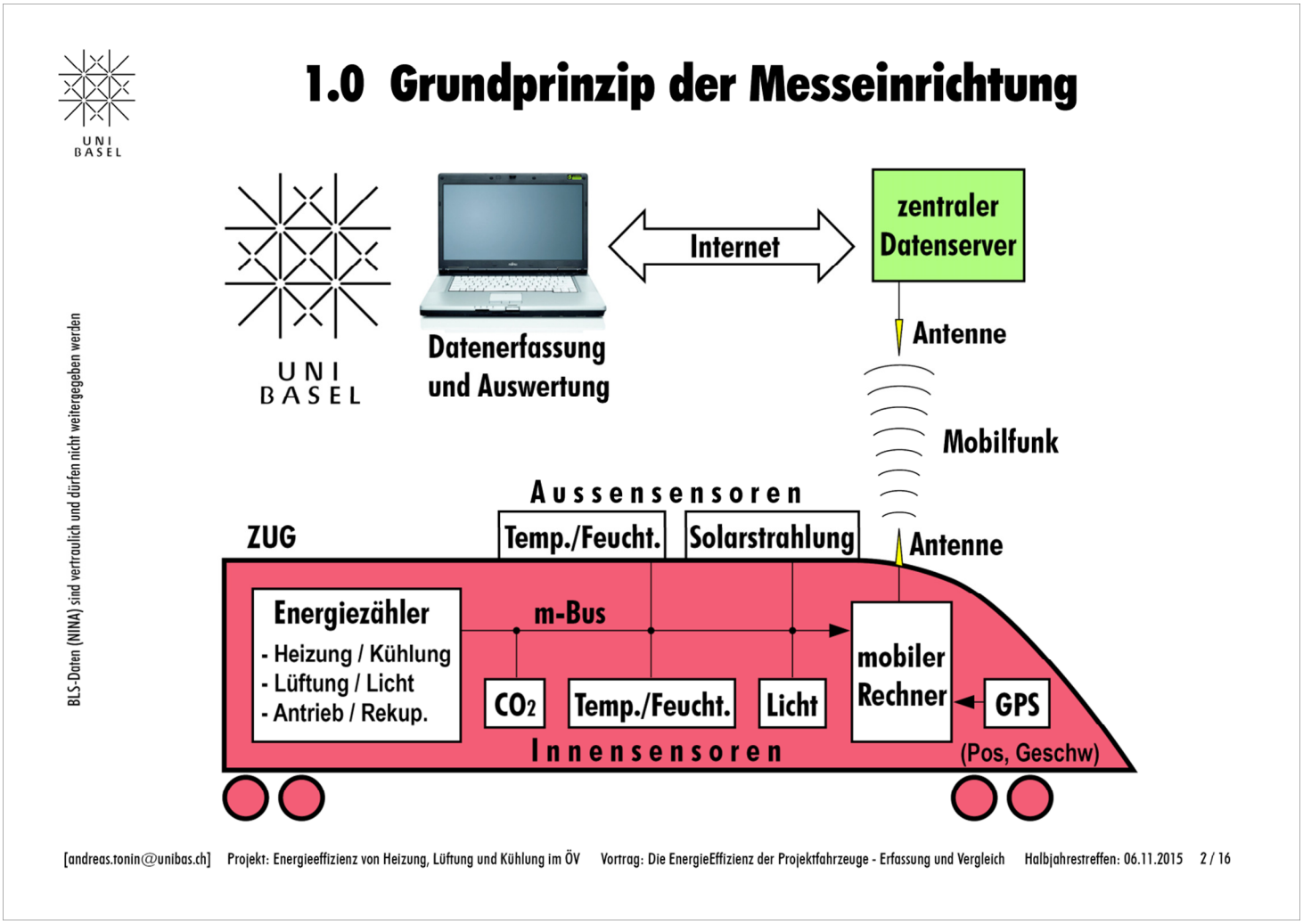
Das Gebot der Stunde lautet unter anderem Steigerung der Energieeffizienz der bestehenden Fahrzeugflotte was am Bestem beim Innenklima machbar ist.

Massnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz können nur über die Kenntnis der aktuellen HLK-Verbrauchswerte (Heizung, Lüftung, Kühlung) der verschiedenen Fahrzeuge zuverlässig geplant und umgesetzt werden.

Speziell bei den HLK-Verbrauchern bieten sich oft sehr wirksame Massnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz an, was im Bereich der Traktionsenergie im allgemeinen schwieriger zu realisieren ist. So kann auch ein einfaches Software-Update in der Klimasteuerung Energie einsparen, wie zum Beispiel eine aussentemperaturgesteuerte Frischluftzufuhr.

Zudem ist die Kenntnis der Verbrauchswerte der Bestandsfahrzeuge vor allem dann wertvoll, wenn es um die Beschaffung von neuen Fahrzeugen geht.

Kapitel 3, Teil 1: Projektfahrzeuge im Vergleich



Folie 2 - Aufbau der Messeinrichtungen: vom Fahrzeug bis zum Datenserver

Die von der Fahrzeugbatterie versorgte automatische Messeinrichtung erfasst rund um die Uhr alle Sensorwerte im Minutentakt (Türwerte ST4 im Sekundentakt) und sendet diese einmal täglich um 3:00 an den zentralen Datenserver von Opit[18].
Diese Daten können jedezeit auf einem speziellen Datencenter im Internetbrowser abgerufen, dargestellt und heruntergeladen werden. Die störungsfreie Funktion aller Sensoren und der Datenverbindung wird in der Regel einmal wöchentlich vom DPUB[19] überprüft und dokumentiert. Bei Bedarf werden Wartungsarbeiten ausgelöst und z.B. defekte Sensoren ersetzt.
Das Messsystem wird den Platzverhältnissen entsprechend eingebaut und ist im Fahrgastraum praktisch unsichtbar.
Nach Möglichkeit werden folgende Energiedaten und Messwerte der Fahrzeuge erfasst:

- Nettoenergie, Traktion, Rekuperation, Heizung, Lüftung, Kühlung, Batterieströme
- Innen- und Aussentemperatur/Feuchte, Sonneneinstrahlung, CO_2-Pegel
- GPS-Daten: Ort, Geschwindigkeit, Richtung
- Vereinzelte spezifische Daten: Licht, Türöffnung, VOC-Sensor[20], Abteil-Steckdosen

[18] OPIT Solutions AG, CH-5405 Baden-Dättwil
[19] Departement Physik der Universität Basel
[20] VOC-Sensor =Gassensor für Gerüche (Volatile Organic Compounds)

Kapitel 3, Teil 1: Projektfahrzeuge im Vergleich

1.1 Beispiel: Messeinrichtung im Swisstrolley 4 (tl)



Bild: Swisstrolley 3

BLS-Daten (NINA) sind vertraulich und dürfen nicht weitergegeben werden

Besonderes:

- **Klimatisierter Gelenk-Trolleybus mit Zentralheizung** (Wasserkreislauf)
- **Integration der Busleitsystemdaten in unser Messsystem**
- **600VDC Primär, 24VDC und 400VAC Sekundärbetrieb**
- **Rekuperierte Energie wird zum Teil wieder direkt intern verbraucht**

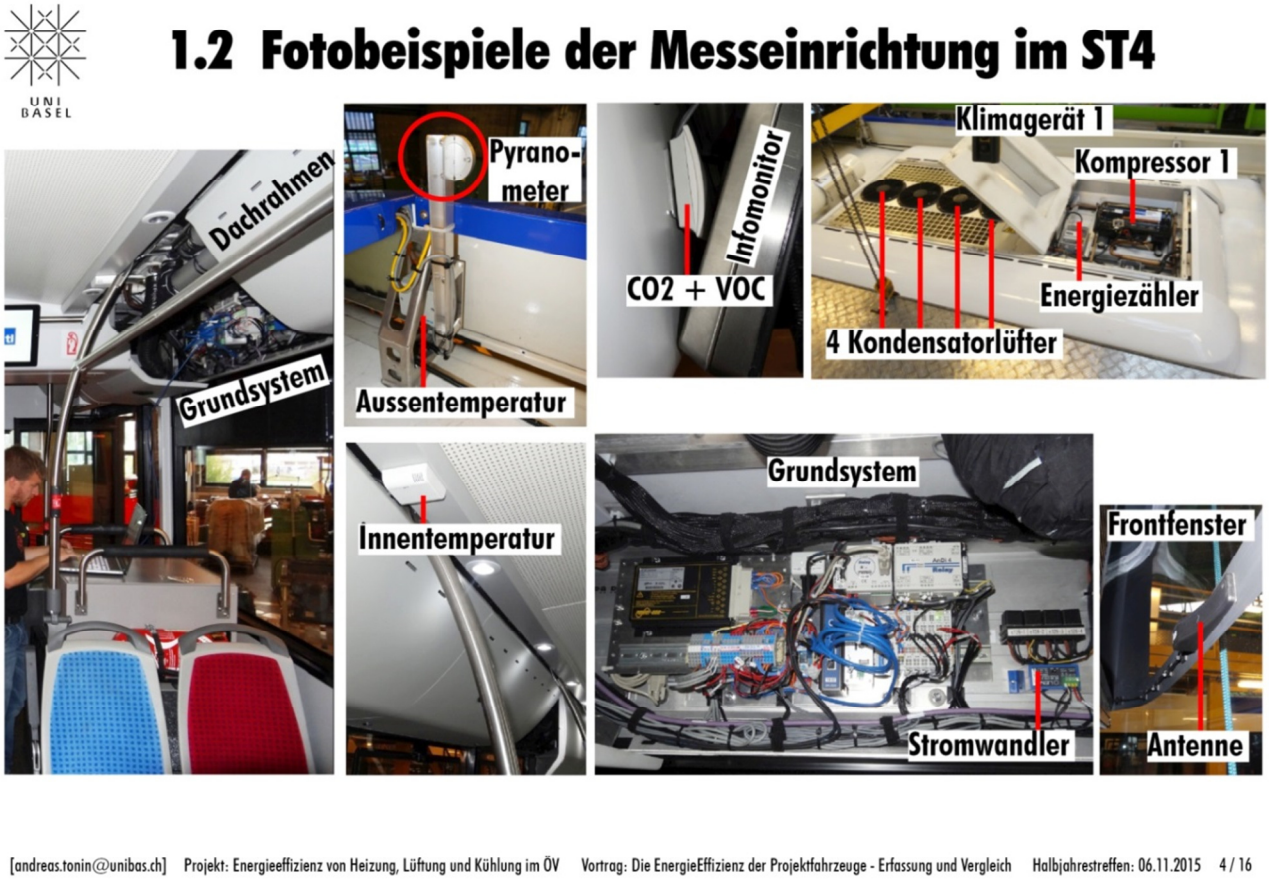
[andreas.tonin@unibas.ch] Projekt: Energieeffizienz von Heizung, Lüftung und Kühlung im ÖV Vortrag: Die EnergieEffizienz der Projektfahrzeuge - Erfassung und Vergleich Halbjahrestreffen: 06.11.2015 3 / 16

Folie 3 - Unser erstes Strassenfahrzeug mit umfassender Messeinrichtung der Lausanner Verkehrsbetriebe

Besonderheiten der Messeinrichtung: wir sparen nicht nur Energie sondern auch Kosten!

Durch die Verwendung von Verbrauchswerten des Leitsystems des Fahrzeugs konnte die Messeinrichtung stark vereinfacht werden. Insbesondere konnte hier teilweise auf das kostenintensive Messen von DC-Verbrauchswerten verzichtet werden, da diese dank der Unterstützung von „Kiepe Electric“ aus dem Leitsystem des Fahrzeugs übernommen und an unser Datencenter weitergeleitet werden konnten.
Auch die Erfassung der Türöffnungszustände eröffnete neue Möglichkeiten und Erkenntnisse zu den Heizenergieverlusten durch Türöffnungen (siehe auch Seite 37).

Kapitel 3, Teil 1: Projektfahrzeuge im Vergleich



Folie 4 - Einbauorte einiger Komponenten der Messeinrichtung

Das Grundsystem und die meisten Komponenten konnten in den seitlichen Dachrahmen untergebracht werden. Die Sensoren wurden unauffällig und teilweise versteckt montiert. In diesem Fall wurde die Messeinrichtung ausnahmsweise basierend auf unserer Einbauplanung durch Mitarbeiter des Fahrzeugherstellers[21] eingebaut.
Die Erfassung und Verifizierung der Daten des Fahrzeugbusses war mit einigen Schwierigkeiten verbunden, die dann in Zusammenarbeit mit Kiepe Electric[22] und Opit[23] gemeistert werden konnten.

[21] HESS AG, CH-4512 Bellach
[22] Kiepe Electric GmbH, D-40599 Düsseldorf
[23] OPIT Solutions AG, CH-5405 Baden-Dättwil

Kapitel 3, Teil 1: Projektfahrzeuge im Vergleich

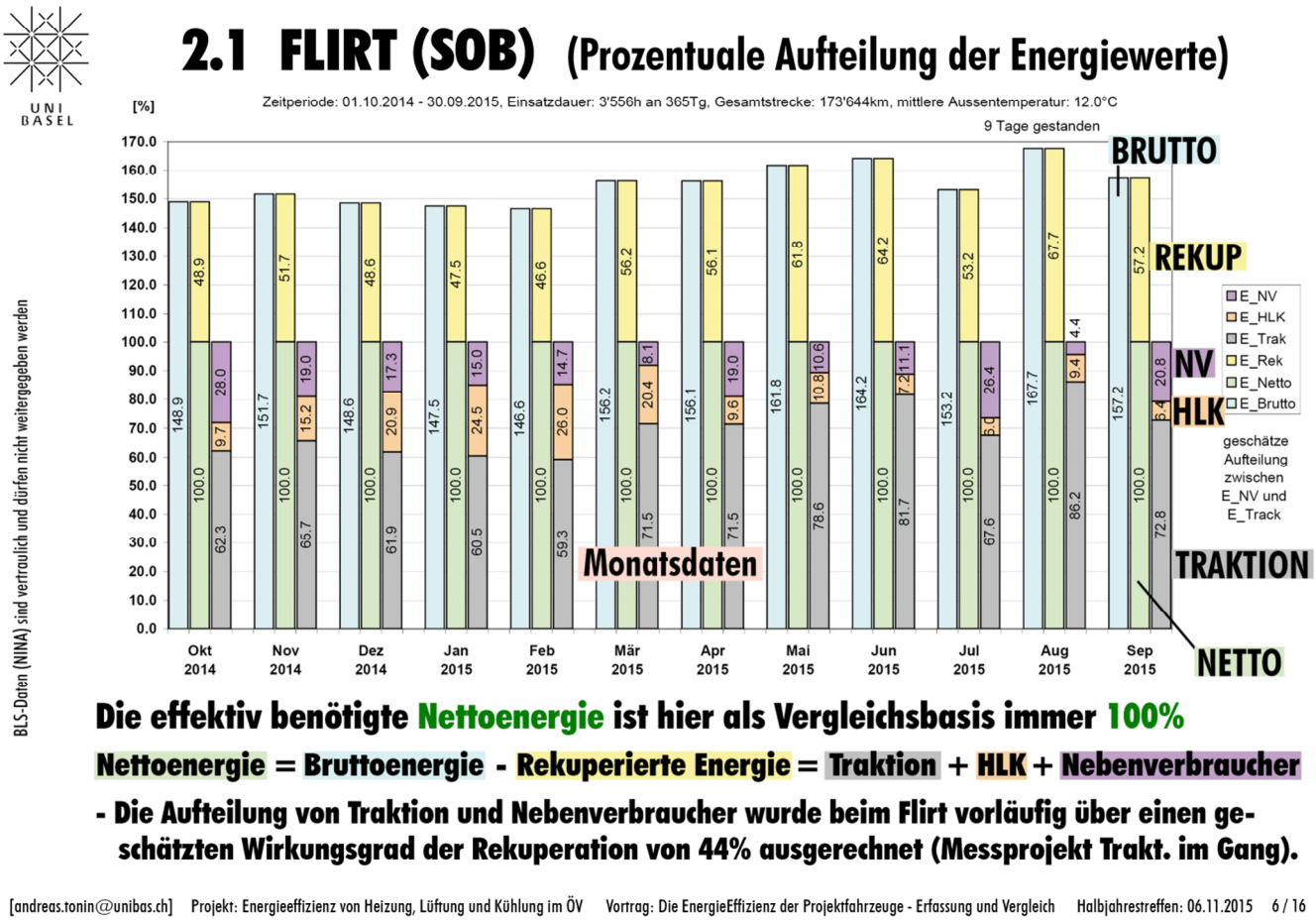


Folie 5 - FLIRT der Südostbahn (SOB RABe526)

Aus Kostengründen wurde die Messeinrichtung so ausgelegt, dass mehrheitlich nur eine Zugshälfte mit unseren üblichen Sensoren und Energieverbrauchszählern ausgestattet wurde. Dadurch dass der Gesamtenergieverbrauch (inkl. Rekuperation) und die Heizenergie des ganzen Zuges auch erfasst wurde, konnte schliesslich trotz des reduzierten Projekts ein Gesamtbild der Verbrauchswerte gewonnen werden.

Die nachfolgenden 2 Seiten zeigen die prozentuale Aufteilung der monatlichen Hauptenergiewerte über ein Jahr.

Kapitel 3, Teil 1: Projektfahrzeuge im Vergleich

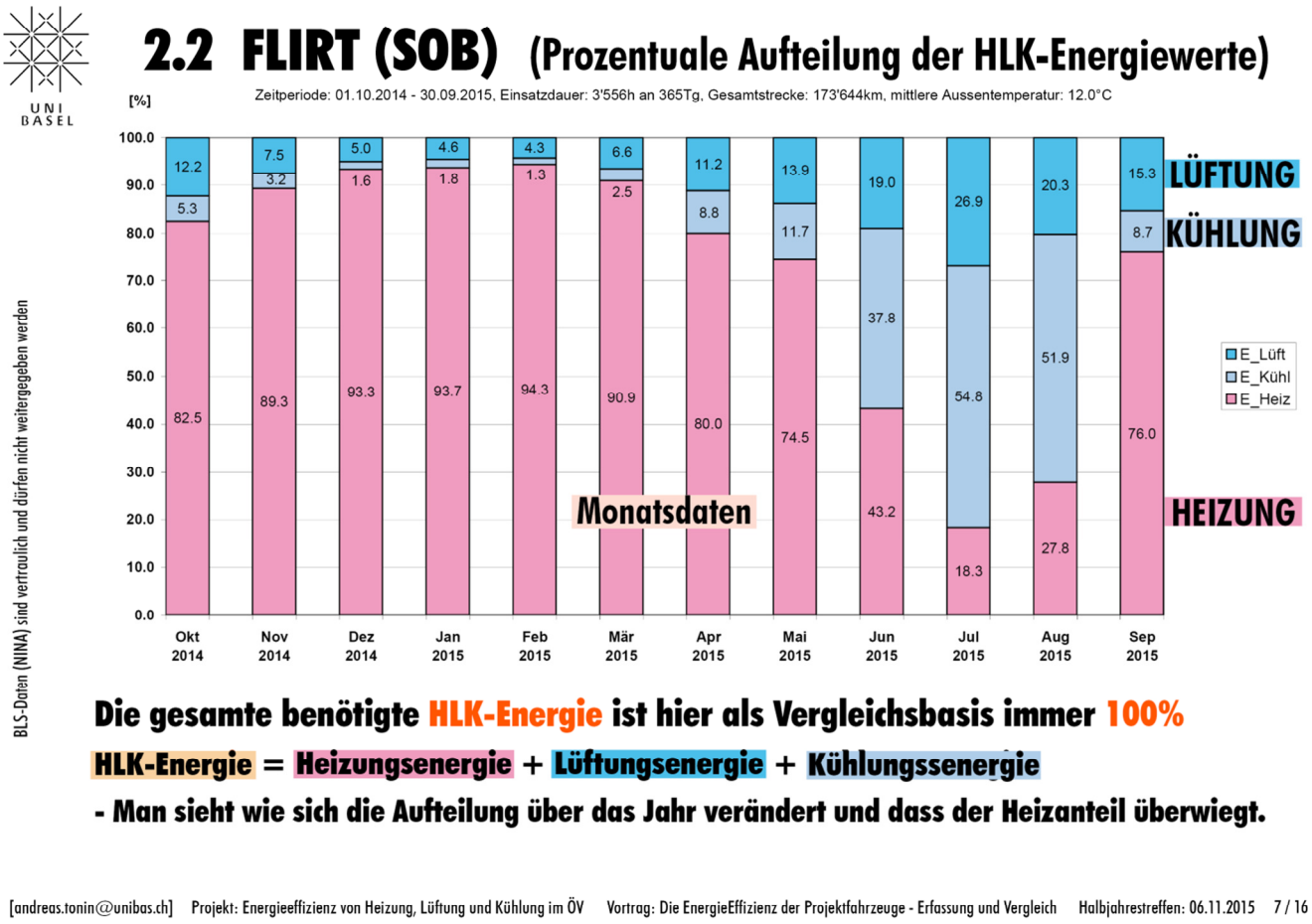


Folie 6 – Prozentuale Energieaufteilung und Traktionsenergiemessung

Der Energieanteil der HLK an der Nettoenergie ist durch die Heizung bedingt im Winter am grössten. Dafür steigt der prozentuale Anteil der Rekuperation in die Oberleitung im Sommer, da weniger Energie direkt wieder im Fahrzeug verbraucht werden kann. Unsere Messung liefert nur die Summe von Nebenverbraucher- und Traktionsenergie. Die Traktionsenergie kann via des geschätzten Wirkungsgrades aus der gemessenen Rekuperationsenergie errechnet werden. Das zusätzliche Messprojekt zusammen mit Stadler[24] und Opit[25] zur Auslesung der Traktionsleistung aus dem Datenbus war leider weniger erfolgreich da es immer wieder zu Datenlücken und Zeitverschiebungen der Daten kam. Bei der Berechnung der Motorenergie aus den Messwerten im Millisekundenbereich mussten viele Annahmen getroffen werden. Der Aufwand die riesigen Datenmengen des Datenbusses zu filtern und zu analysieren wurde unverhältnismässig hoch. Die Aufteilung von Traktion- und Nebenverbraucherenergie über die Bestimmung der Traktionsenergie mit dem geschätzten Wirkungsgrad der Rekuperation liefert über einen längeren Zeitraum das bessere Resultat.

[24] Stadler Rail AG
[25] Opit Solutions AG

Kapitel 3, Teil 1: Projektfahrzeuge im Vergleich



Folie 7 – Prozentuale Aufteilung der HLK-Energiewerte

Die Heizenergie hat an 10 von 12 Monaten den grösseren prozentualen Anteil an der HLK-Energie als die Kühlenergie.

Kapitel 3, Teil 1: Projektfahrzeuge im Vergleich

UNI BASEL

3.0 Vorstellung & Vergleich der 7 Projekt-Fahrzeuge

Fahrzeuge	Typ	E_Netto /Jahr [MWh]	E_HLK /Jahr [MWh]	Masse inkl. Lokanteil [t]	Anzahl Personen 30% Bel.	Masse pro Person [t]	Jahres-kilometer [km]	Jahres-Einsatz [h]	Geschw. Mittel [km/h]
EW2 (RhB) B 2383	Einzelwagen in 6-er Komposition mit 1 Lok	253.7	53.0	25.5	15.6	1.63	146902	3363	43.7
EW4 (RhB) B 2497	Einzelwagen in 6-er Komposition mit 1 Lok	257.4	42.4	26.3	13.2	1.99	148460	3571	41.6
Gex (RhB Bp 2538	Einzelwagen in 12-er Komposition mit 1 Lok	112.5	26.5	24.6	14.4	1.71	79017	1842	42.9
Nina (BLS) RABe 525-006	3-teiliger Nahverkehrs-Triebzug	576.6	153.7	85.5	87.0	0.98	151154	3509	43.1
Flirt (SOB) RABe 526-048	4-teiliger Nahverkehrs-Triebzug	970.3	134.5	130.5	138.0	0.95	173644	3556	48.8
ICN (SBB) RABDE 500-016	7-teiliger Fernverkehrs-Triebzug	3418.6	547.9	365.7	142.2	2.57	350760	4293	81.7
ST4 (tl) 871	2-teiliger Nahverkehrs-Trolleybus (Lausanne)	146.1	38.0	22.0	33.0	0.67	65675	4857	13.5

BLS-Daten (NINA) sind vertraulich und dürfen nicht weitergegeben werden

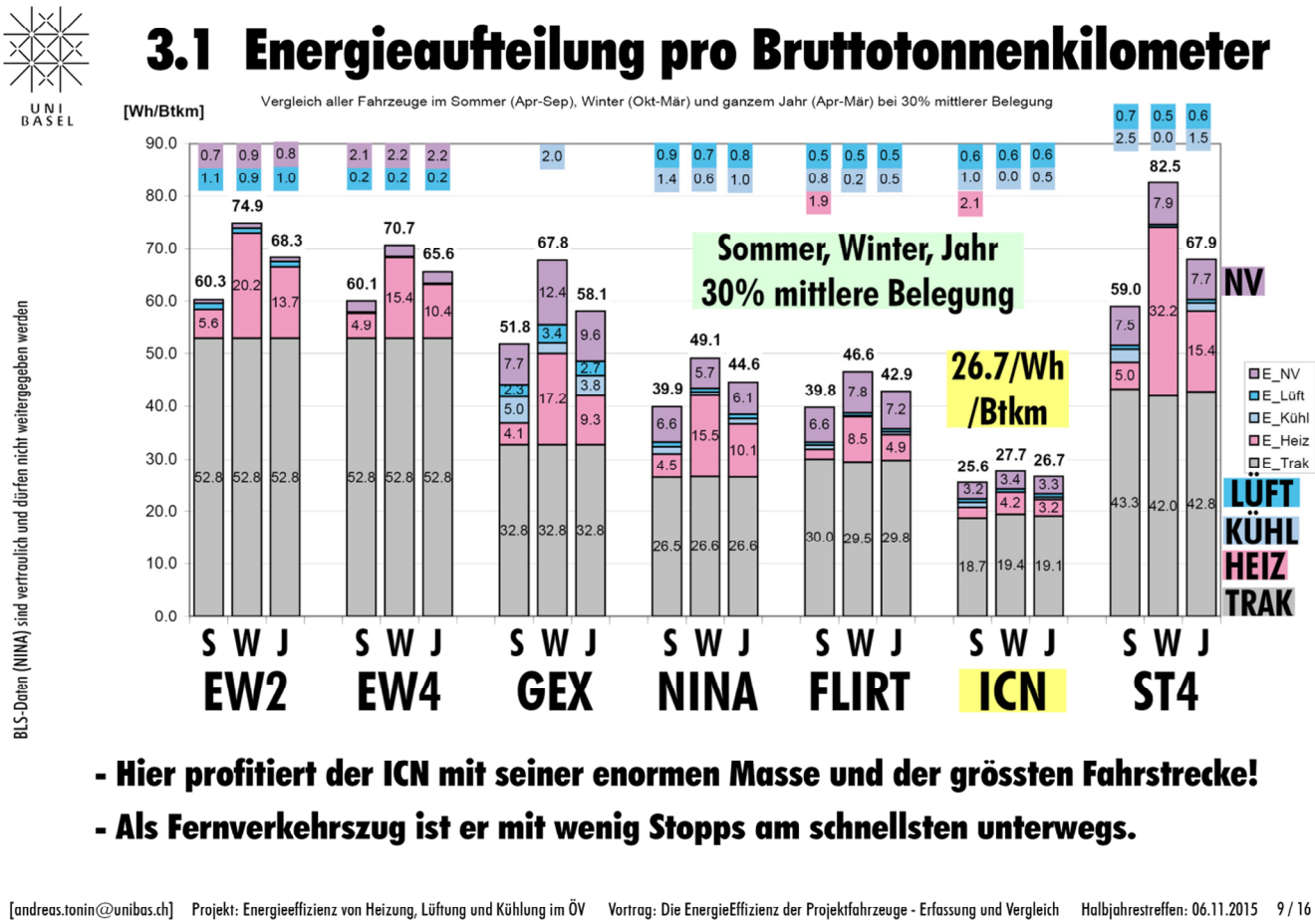
- Die Fahrzeuge unterscheiden sich in einigen Punkten sehr stark!
- Wie kann man sie nun energetisch am Besten miteinander vergleichen?
  Mögliche Grössen: Energie pro Fahrzeugmasse, Personen, Fahrstrecke, Einsatzzeit
- Jeder Vergleich muss kritisch hinterfragt werden!

[andreas.tonin@unibas.ch] Projekt: Energieeffizienz von Heizung, Lüftung und Kühlung im ÖV Vortrag: Die EnergieEffizienz der Projektfahrzeuge - Erfassung und Vergleich Halbjahrestreffen: 06.11.2015 8 / 16

Folie 8 – Vergleich verschiedener Eckwerte der 7 Projekt-Fahrzeuge

Wegen unterschiedlichen Einsatzarten und Bauweisen unterscheiden sich die Fahrzeuge teilweise sehr stark, was einen direkten Vergleich sehr schwierig macht. So bewegt zum Beispiel der Neigezug ICN bei 30% Belegung 2.57 Tonnen Fahrzeuggewicht pro Person und der Trolleybus ST4 nur 0.67 Tonnen pro Person. Dafür fährt der ICN aber auch über 5-mal weiter pro Jahr und das mit einer 6-mal grösseren mittleren Geschwindigkeit. Auf den nächsten Seiten wird der Energiebedarf der untersuchten Fahrzeuge auf verschiedene Weise normiert und miteinander verglichen.

Kapitel 3, Teil 1: Projektfahrzeuge im Vergleich

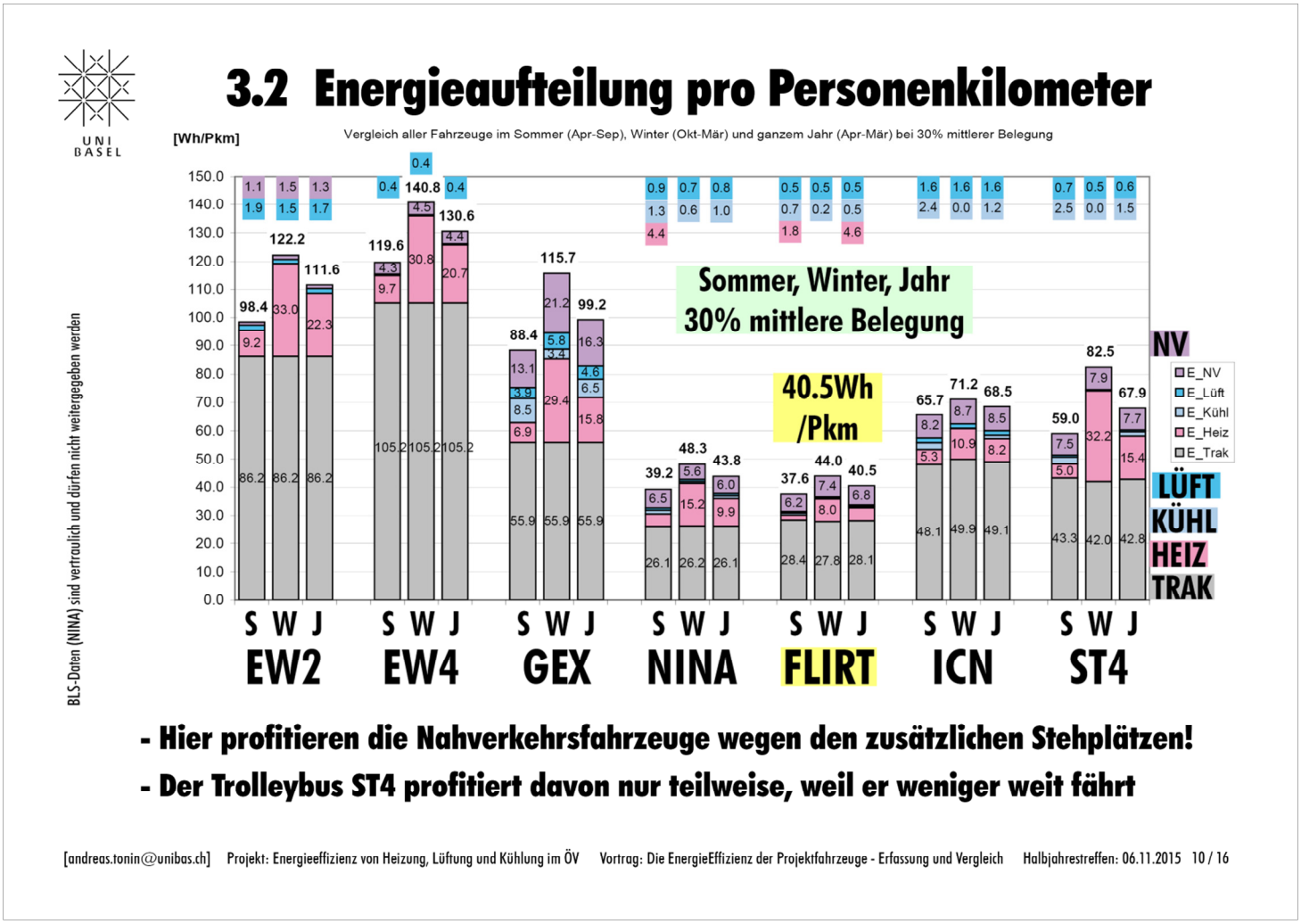


Folie 9 – Vergleich der 7 Fahrzeuge nach Energiebedarf pro Bruttotonnenkilometer

Der ICN schneidet hier zwar am besten ab, schleppt aber dabei auch die grösste Fahrzeugmasse mit sich herum.

Hinweis für das obige und die zwei folgenden Diagramme:
Die Teilwerte sind im Diagramm entweder direkt in den Balken angegeben, oder bei Platzmangel am oberen Diagrammrand. Der Farbcode dazu ist rechts beschrieben (Nebenverbraucher, Lüftung, Kühlung, Heizung, Traktion netto).
Die ungefärbte Zahl direkt über den einzenen Balken ist die Summe der Teilwerte, was der jeweils verschieden normierten Nettoenergie bzw.-Leistung des jeweiligen Fahrzeuges entspricht.

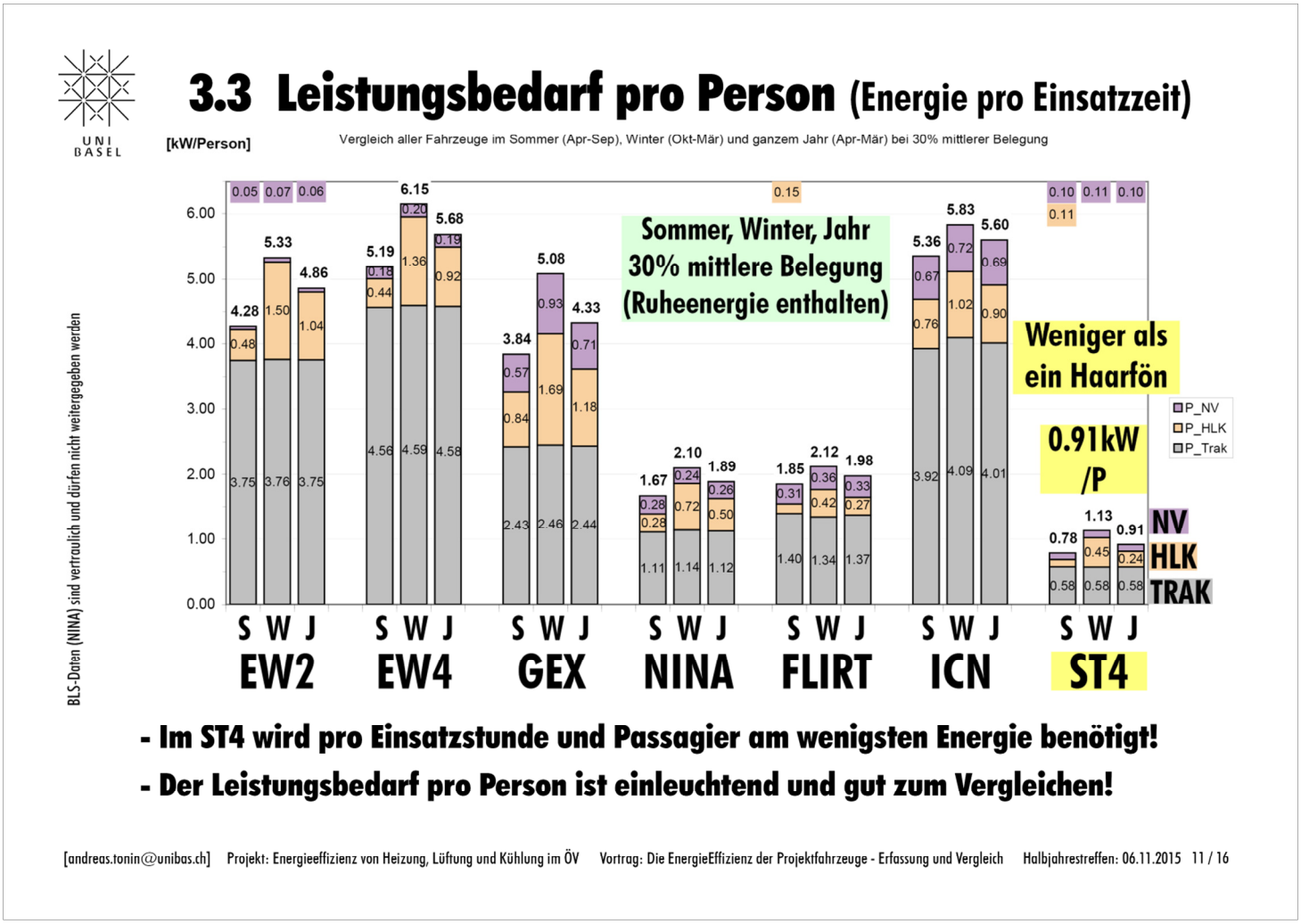
Kapitel 3, Teil 1: Projektfahrzeuge im Vergleich



Folie 10 – Vergleich der 7 Fahrzeuge nach Energiebedarf pro Personenkilometer

Die Nahverkehrsfahrzeuge können dank den Stehplätzen mehr Personen transportieren und sind langsamer unterwegs als Fernverkehrsfahrzeuge, was Traktionsenergie spart. Auch das kleinere Gewicht der Nahverkehrsfahrzeuge spart Traktionsenergie.

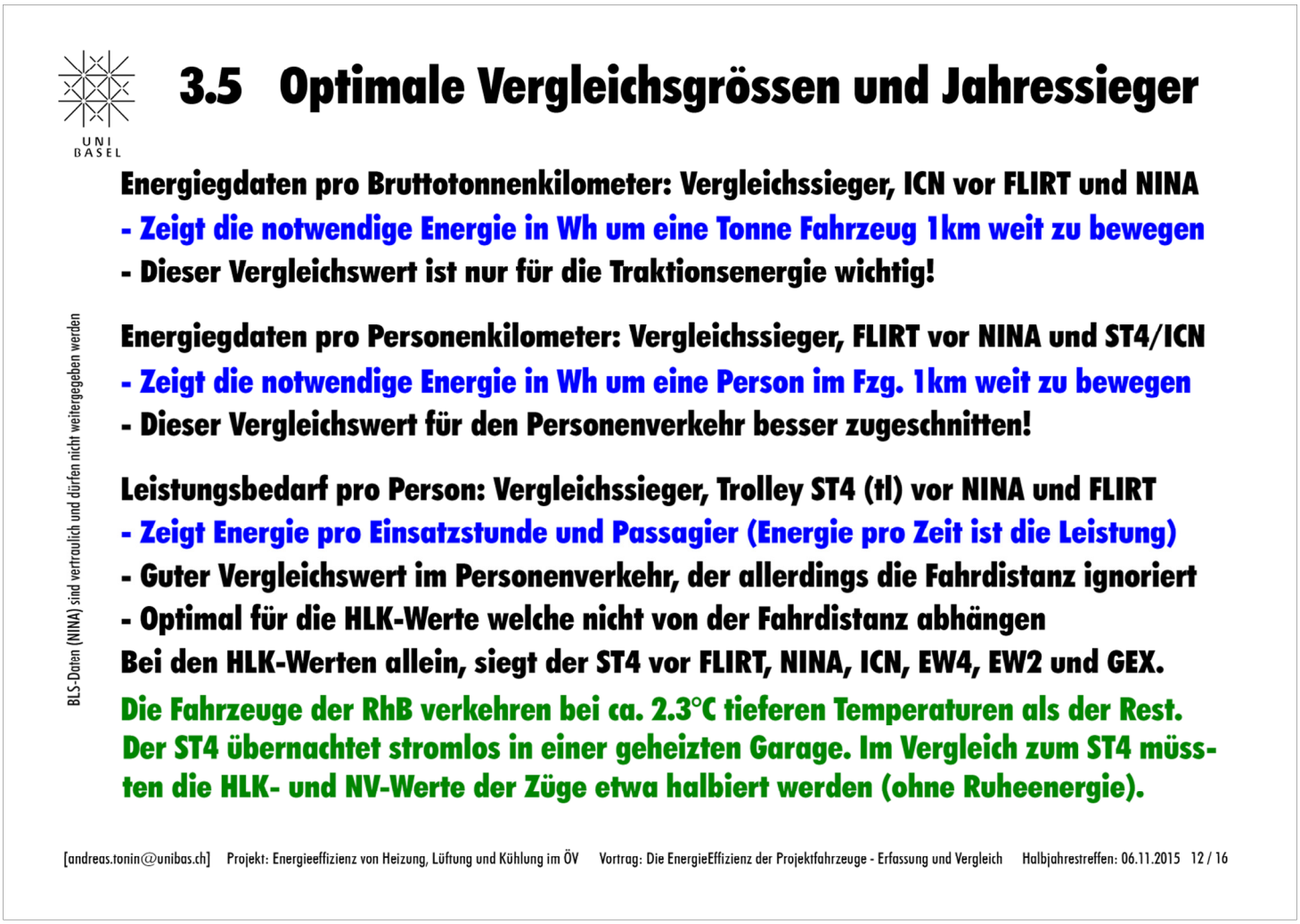
Kapitel 3, Teil 1: Projektfahrzeuge im Vergleich



Folie 11 – Vergleich der 7 Fahrzeuge nach Energiebedarf pro Einsatzzeit und Person

Die Energie pro Einsatzzeit und Person entspricht der Leistung die das Fahrzeug pro Person bereitstellen muss. Das ist eine interessante Betrachtung die vor allem bei der HLK einen guten Vergleich ermöglicht.

Kapitel 3, Teil 1: Projektfahrzeuge im Vergleich

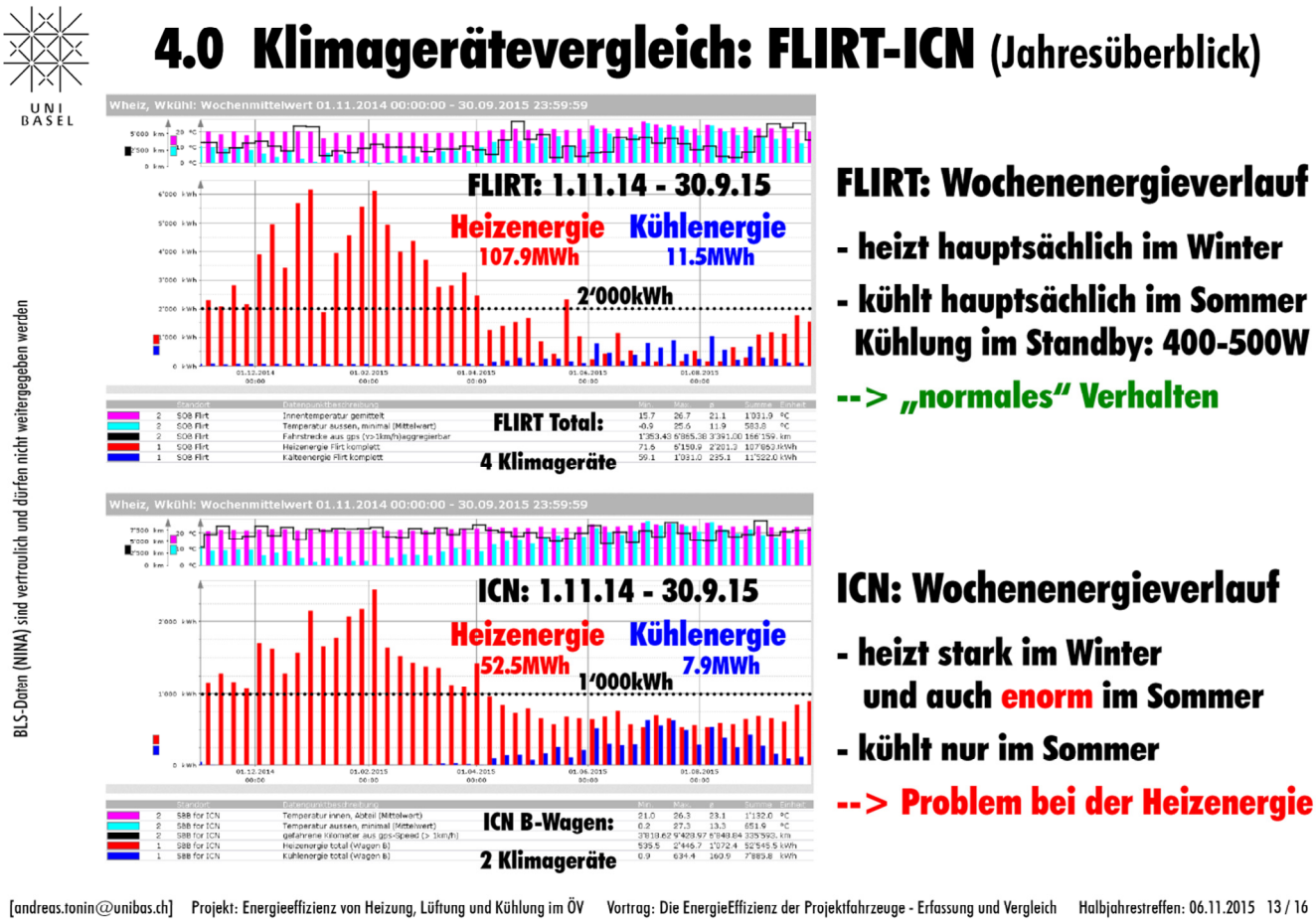


Folie 12 – Zusammenfassung der 3 verschiedenen Vergleichsgrössen

Es gibt keinen Vergleichsparameter der alle Aspekte beim Quervergleich verschiedener Fahrzeug 'gerecht' abbildet. Die Vorteile der einzelnen HLK-Verbrauchsparameter sind hier aufgeführt.
Wichtig ist auch der Hinweis auf eine Besonderheit der Fahrzeuge der Rhätischen Bahn und der Trolleybusse in Lausanne (letzter Satz auf der Folie in grün).

Die für den Personenverkehr wichtigste Vergleichsgrösse „Energie pro Personenkilometer“ teilt die tatsächlich benötigte Nettoenergie in Kilowattstunden (KWh) eines Fahrzeugs durch 1000, die Anzahl der durchschnittlich darin befindlichen Passagiere und den zurückgelegten Kilometern. Damit erhält man einen normierten Wert in Wattstunden pro Person und Kilometer (Wh/Pkm) womit die Energieeffizienz verschiedener Fahrzeuge verglichen werden kann

Kapitel 3, Teil 1: Projektfahrzeuge im Vergleich



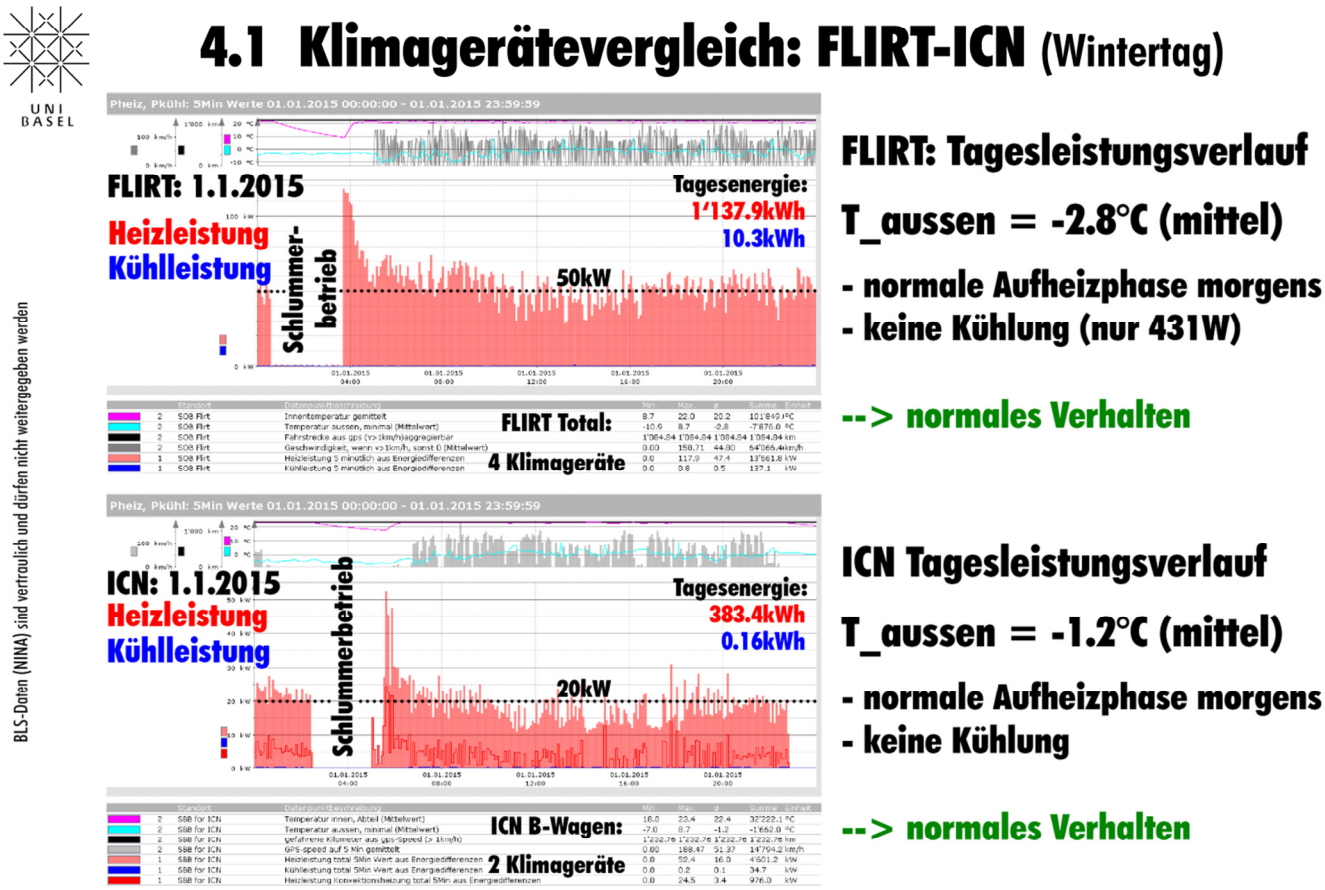
Folie 13 – Klimageräteverglich: FLIRT und ICN

Beim FLIRT wird die Heiz- und Kühlenergie der 4-teiligen Komposition gezeigt, beim ICN wird nur der Verbrauch eines B-Wagens berücksichtigt. Der 7-teilige ICN würde also etwa das 7-fache dieses B-Wagens verbrauchen.

Wagenbezeichnungen beim ICN: BT, **B**, WRA, A, AD, B, BT (7 Wagen pro Komposition).

Beide Klimageräte zeigen Schwächen: Beim FLIRT fällt der Ruheverbrauch der Kühlung im Winter auf und beim ICN erstaunt der hohe Heizenergiebedarf im Sommer, der den Kühlenergiebedarf meist noch übersteigt. Auf den folgenden Seiten wird das genauer angeschaut.

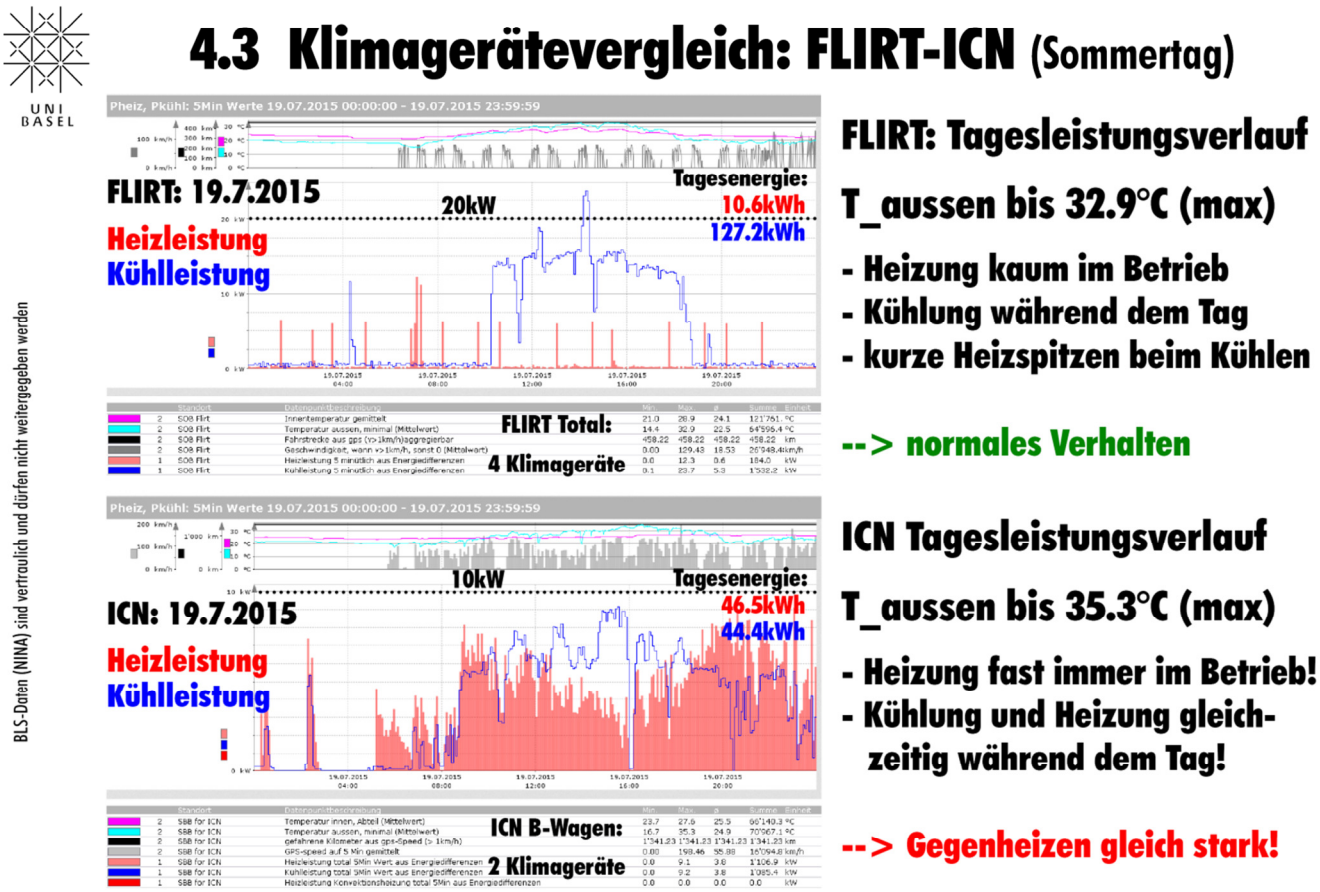
Kapitel 3, Teil 1: Projektfahrzeuge im Vergleich



Folie 14 – Klimageräteverglich: FLIRT und ICN an einem Wintertag

Die Klimageräte beider Fahrzeuge zeigen ein normales Verhalten während einer Aufheizphase, einer relativ konstanten Heizphase und einem funktionierenden Schlummerbetrieb.
Beim FLIRT verbraucht die Kühlung in Ruhe 431W, was über den Tag aufsummiert 10.3 kWh Kühlenergie ergibt. Im Vergleich zum Heizenergieverbrauch von 1'137.9 kWh ist das knapp 1% und deshalb vernachlässigbar.

Kapitel 3, Teil 1: Projektfahrzeuge im Vergleich



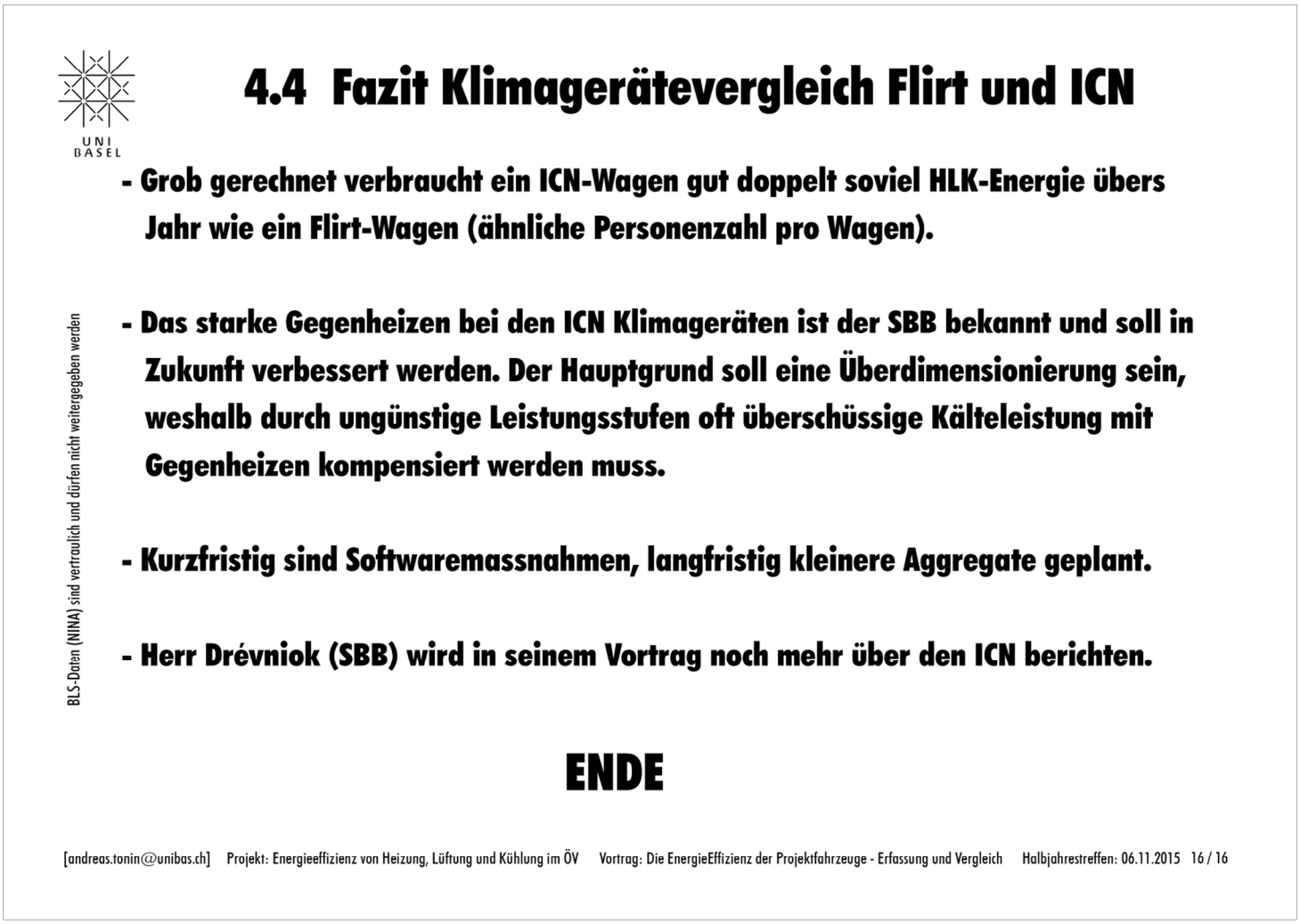
Folie 15 – Klimagerätevergleich: FLIRT und ICN an einem heissen Sommertag

Der FLIRT setzt die Gegenheizung kaum ein, die Kühlung arbeitet normal.
Beim ICN wird gleichzeitig gekühlt und geheizt. Dieses Gegenheizen im Sommer verbraucht mit 46.5 kWh sogar mehr Heizenergie als die Kühlenergie von 44.4 kWh pro Tag und das bei einer Aussentemperatur von bis zu 35.3°C. Nur der Umstand, dass der Wirkungsgrad der Kältemaschine etwa 2 beträgt, ermöglicht in der Summe eine Kühlung. Gemäss SBB ist der Kältekompressor überdimensioniert und darf nicht zu oft ein- und abgestellt werden.

Der FLIRT der SOB hat bei der Auslegung der Komforteinrichtungen dadurch profitiert, dass Stadler zum Zeitpunkt der Fertigung des Fahrzeugs schon sehr viele FLIRT produziert hatte.[26]

[26] Gemäss Wikipedia wurden bis Anfang 2013 bereits 788 FLIRT verkauft

Kapitel 3, Teil 1: Projektfahrzeuge im Vergleich



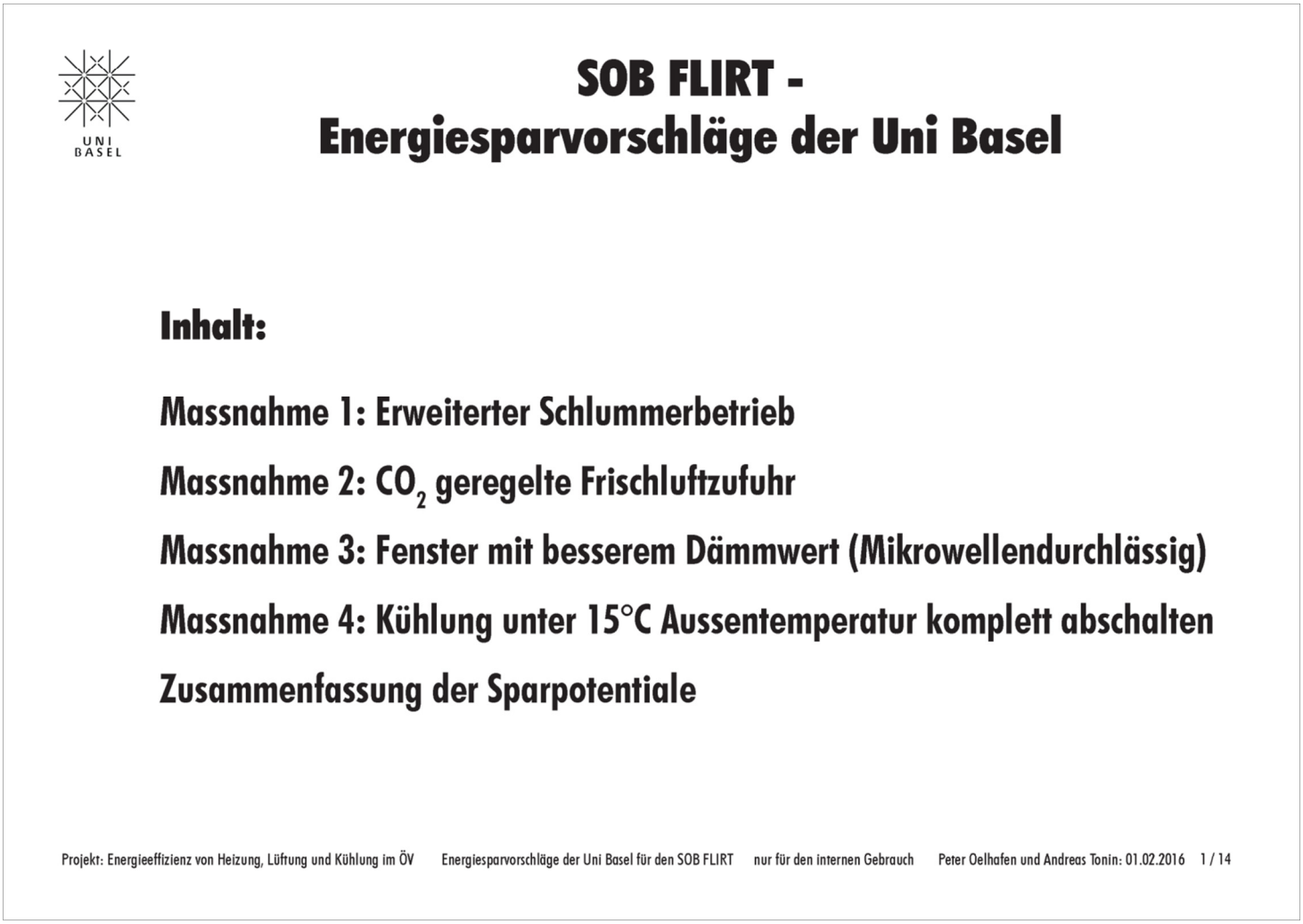
Folie 16 – Fazit Klimageräteverglei ch Flirt und ICN

Die Probleme der überdimensionierten Klimageräte beim ICN waren der SBB bekannt und sie suchen schon länger nach Lösungen. Im Jahre 1999 als der ICN (wohl unter Zeitdruck) gebaut wurde, waren Klimageräte in Zügen noch weniger verbreitet und es mussten Erfahrungen gewonnen werden. Mittlerweile werden praktisch alle Züge klimatisiert und die Fahrzeughersteller scheinen die Dimensionierung im Griff zu haben. Wir betrachten das Problem als Einzelfall und sehen deshalb keinen Grund für eine Empfehlung an die Besteller von Neufahrzeugen abzugeben.

Die SBB sind momentan daran die Klimageräte der ICN-Flotte durch kleinere und besser steuerbare Modelle zu ersetzen.[27]

[27] Johannes Drévniok SBB Projektmeeting BAV 3. November 2017

Kapitel 3, Teil 2: SOB Flirt Energiesparvorschläge der Uni Basel

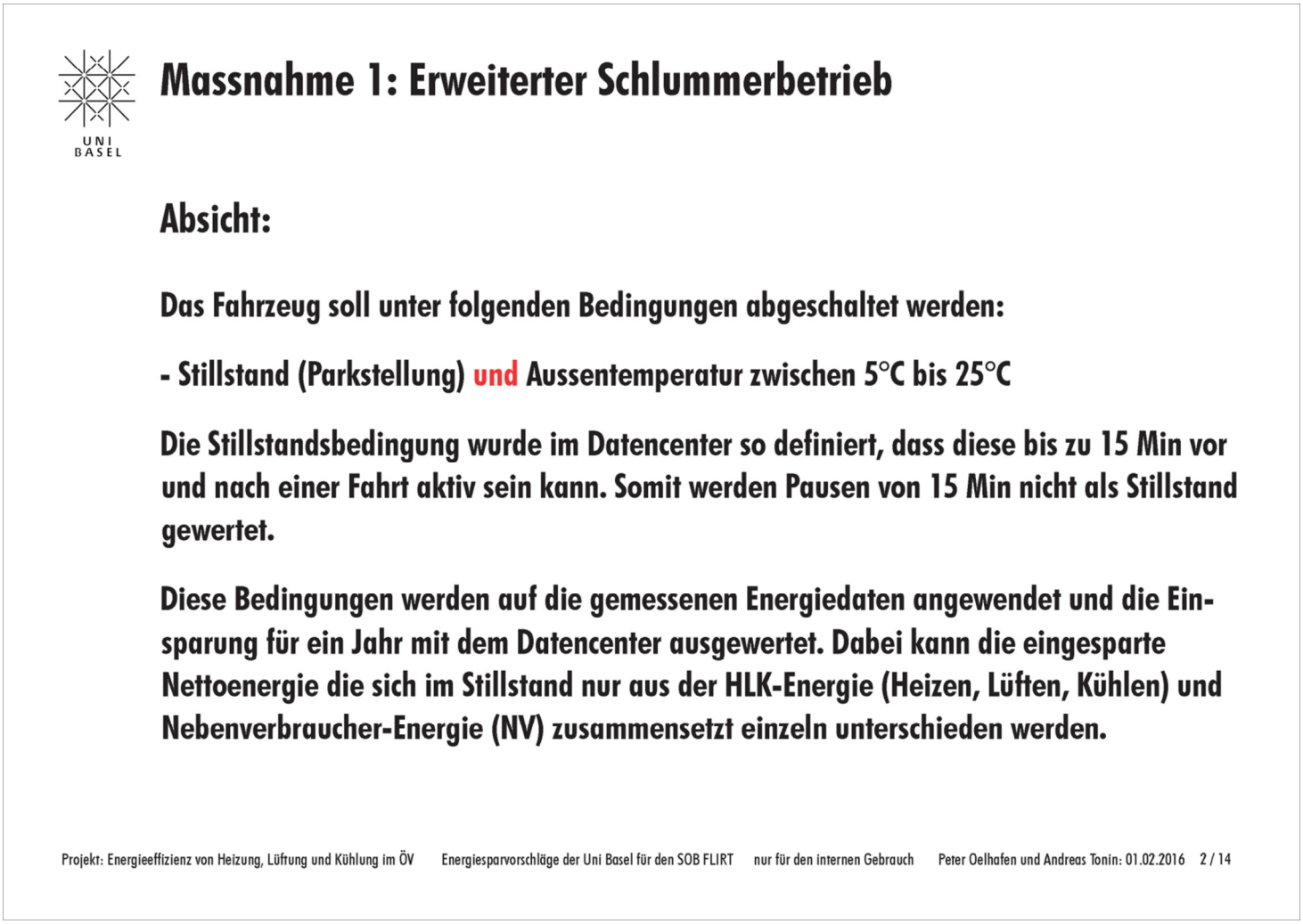


Teil 2: SOB FLIRT - Energiesparvorschläge der Universität Basel (01.02.2016)

Die SOB hat das Basler Projektteam 2015 gebeten, Energiesparmassnahmen der Komforteinrichtungen für den SOB FLIRT (RABe526-048) inklusive quantitativer Angaben der Einsparpotentiale auszuarbeiten. Rahmenbedingungen wurden keine definiert. Am 01.02.2016 haben wir dann ein Paket von vier Massnahmen in Samstagern den Auftraggebern an Hand eines Berichts vorgestellt. Bei der Auswahl der Massnahmen 1 bis 3 liessen wir uns von den Verbesserungen der BLS an der NINA (RABe 525-006) leiten. Die vierte Massnahme kam durch die Messung des relativ hohen Ruheverbrauchs der Kühlung zustande.

Die vier Massnahmen werden auf den Folien 1 - 12 einzeln vorgestellt. Die Folien 13 und 14 geben einen Gesamtüberblick über die möglichen Energieeinsparungen der einzelnen Massnahmen und bei kombinierter Anwendung aller Massnahmen.

Kapitel 3, Teil 2: SOB Flirt Energiesparvorschläge der Uni Basel



Folie 2 - **Massnahme 1: Erweiterter Schlummerbetrieb**

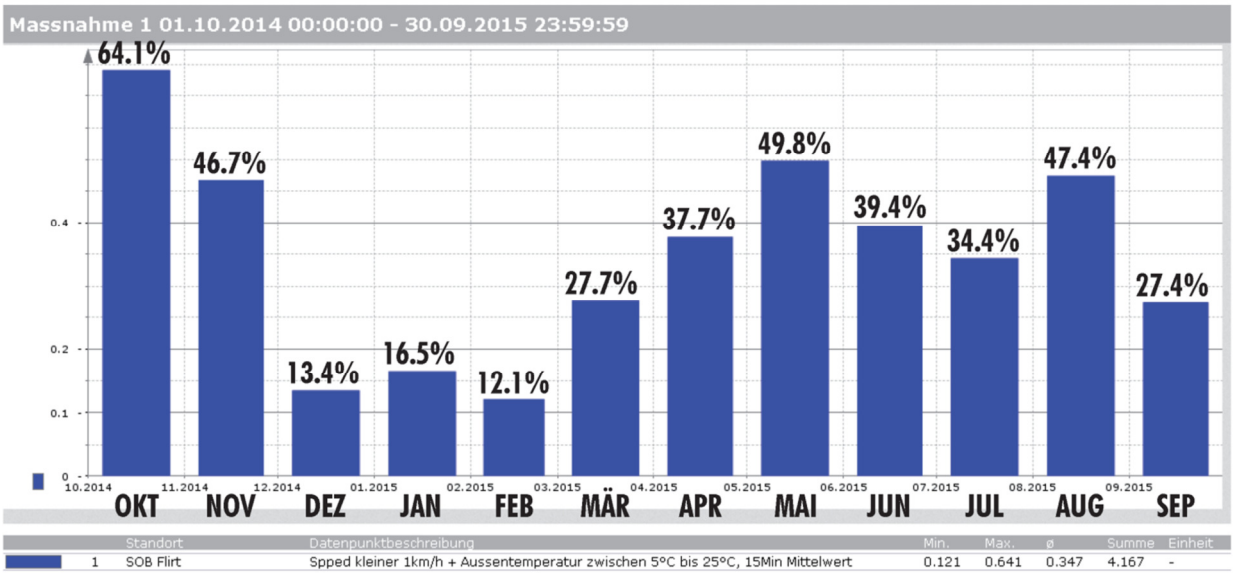
Das Fahrzeug verfügt im Originalzustand über einen üblichen Schlummerbetrieb bei dem nach 30 Minuten in Parkstellung nur die HLK-Gruppe abgestellt wird(gut sichtbar im Diagramm Teil 1, Seite 20).Im Schlummerbetrieb gibt es einen Gefrier- und Überhitzungsschutz
Im erweiterten Schlummerbetrieb soll das Fahrzeug unter neu definierten Bedingungen möglichst vollständig abgeschaltet werden. Dabei soll nicht nur ein Abschalten der Heizung, Lüftung und Kühlung sondern auch das Abschalten der Nebenverbraucher[28] in Betracht gezogen werden. Die Abschaltung erfolgt im Stillstand (Parkstellung) und bei Aussentemperaturen im Bereich zwischen 5°C und 25°C. Ferner erfolgt die Abschaltung in Betriebspausen von mehr als 15 Minuten.Unterhalb 5°C und oberhalb.25°C bleibt es beim üblichen.Schlummerbetrieb
Die unter diesen zusätzlichen Bedingungen eingesparten Energien lassen sich aus den entsprechenden Messdaten über ein ganzes Jahr getrennt bestimmen.

[28] In unserer Notation sind das Verbraucher, die nicht der Traktion oder der HLK-Gruppe zugeordnet werden können

Kapitel 3, Teil 2: SOB Flirt Energiesparvorschläge der Uni Basel

Massnahme 1: Erweiterter Schlummerbetrieb

Zeitanteil des erweiterten Schlummerbetriebs pro Monat



Die Monatsbalken zeigen an zu wieviel Prozent der Zeit das Fahrzeug vollständig abgeschaltet werden könnte. Der Jahresmittelwert beträgt 34.7%.

Projekt: Energieeffizienz von Heizung, Lüftung und Kühlung im ÖV Energiesparvorschläge der Uni Basel für den SOB FLIRT nur für den internen Gebrauch Peter Oelhafen und Andreas Tonin: 01.02.2016 3 / 14

Folie 3 - Diagramm der zeitlichen Anteile des erweiterten Schlummerbetriebs pro Monat

Das Monatsdiagramm soll nicht implizieren, dass die aufsummierten monatlichen Schlummerzeiten direkt etwas mit den Jahreszeiten zu tun haben. Der Grund liegt wohl mehr in den unterschiedlichen Betriebseinsätzen des Fahrzeugs über das Jahr betrachtet.

Kapitel 3, Teil 2: SOB Flirt Energiesparvorschläge der Uni Basel

Massnahme 1: Erweiterter Schlummerbetrieb

Auswertung des Sparpotentials

Das Fahrzeug wird ausgeschaltet wenn es steht und die Aussentemperatur zwischen 5°C und 25°C liegt

Energieverbrauch des ganzen Flirts 048 vom 01.10.2014 bis 30.09.2015 (1 Jahr)

Bezeichnung	Jahreswert [kWh]	Anteil an Nettoenergie [%]	Anteil an HLK-Energie [%]
Nettoenergie	970274.8	100.00	
Sparpotential Nettoenergie	70238.9	7.24	
HLK-Energie	134481.8	13.86	100.00
Sparpotential HLK-Energie	16978.4	1.75	12.63
Sparpotential NV-Energie	53261.0	5.49	39.60

Sparpotential Nettoenergie = Sparpotential HLK-Energie + Sparpotential NV-Energie (keine Traktion im Schlummerbetrieb)

Es können jährlich 70'239kWh eingespart werden (7.2% bezogen auf die Nettoenergie).
Davon fallen 5.5% auf die Nebenverbraucher und 1.7% auf die HLK.

Bezogen auf die HLK-Energie können 12.6% der HLK-Energie eingespart werden.
Der Schlummerbetrieb spart also hauptsächlich bei den Nebenverbrauchern!

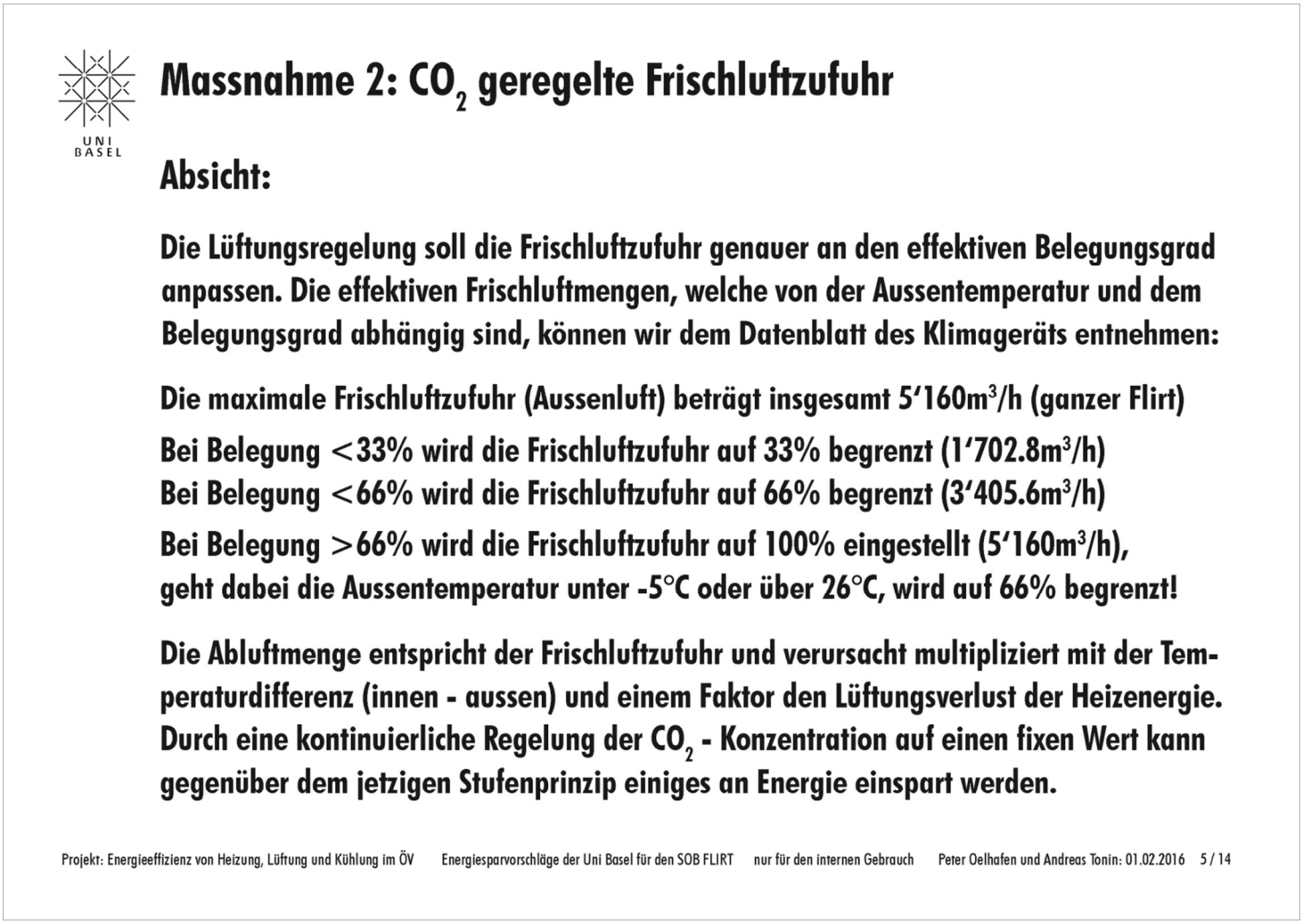
Projekt: Energieeffizienz von Heizung, Lüftung und Kühlung im ÖV Energiesparvorschläge der Uni Basel für den SOB FLIRT nur für den internen Gebrauch Peter Oelhafen und Andreas Tonin: 01.02.2016 4 / 14

Folie 4 - Einsparpotentiale des erweiterten Schlummerbetriebs

Insgesamt können jährlich etwas über 70'000 kWh, oder etwas über 7% der Nettoenergie[29] eingespart werden. Interessant ist die Tatsache, dass vor allem bei den Nebenverbrauchern Energie eingespart werden kann. In diesem Zusammenhang ist noch zu beachten, dass sich das Abschalten der Nebenverbraucher auch im Hinblick auf eine (allenfalls nächtliche) Lärmreduktion sehr günstig auswirken kann.

[29] Der Nettoenergieverbrauch berechnet sich aus dem Gesamtverbrauch des Fahrzeugs abzüglich der rekuperierten Energie in die Oberleitung

Kapitel 3, Teil 2: SOB Flirt Energiesparvorschläge der Uni Basel

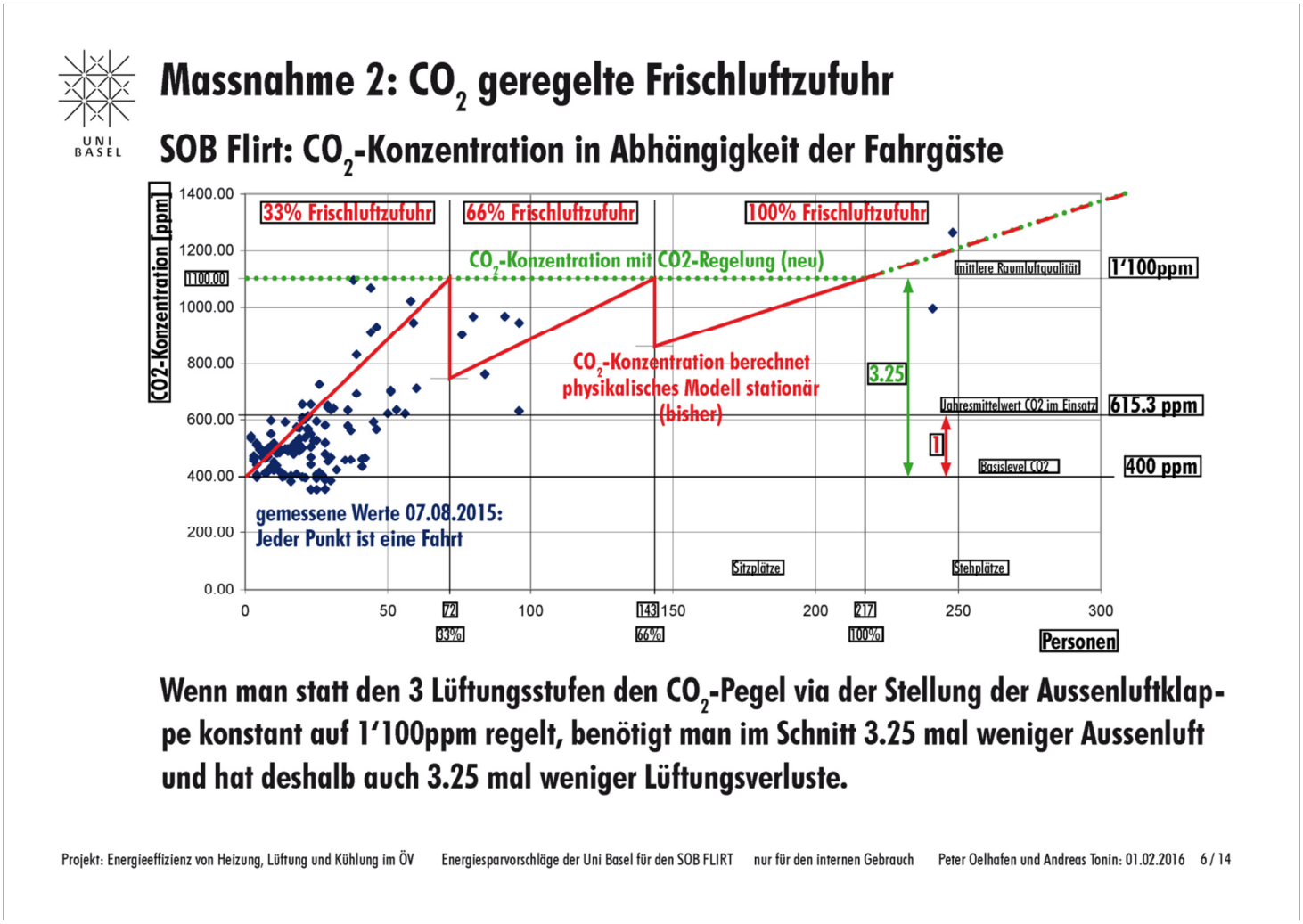


Folie 5 - **Massnahme 2: Ist-Zustand der Steuerung der Lüftungsleistung**

Das Fahrzeug verfügt im Originalzustand über eine Steuerung der Lüftungsleistung über die Belegung des Fahrzeugs durch die Bestimmung der Fahrzeugmasse.

Die obige Folie zeigt quantitativ die Stufen der Lüftungsleistung auf Grund der Belegung des Fahrgastraums. Zusätzlich gibt es eine Temperaturschwelle von -5°C: unterhalb dieser Temperatur wird die Lüftung auf 66% begrenzt. Diese Massnahme ist dem Erreichen der Soll-Innentemperatur bei tiefen Aussentemperaturen geschuldet.

Kapitel 3, Teil 2: SOB Flirt Energiesparvorschläge der Uni Basel

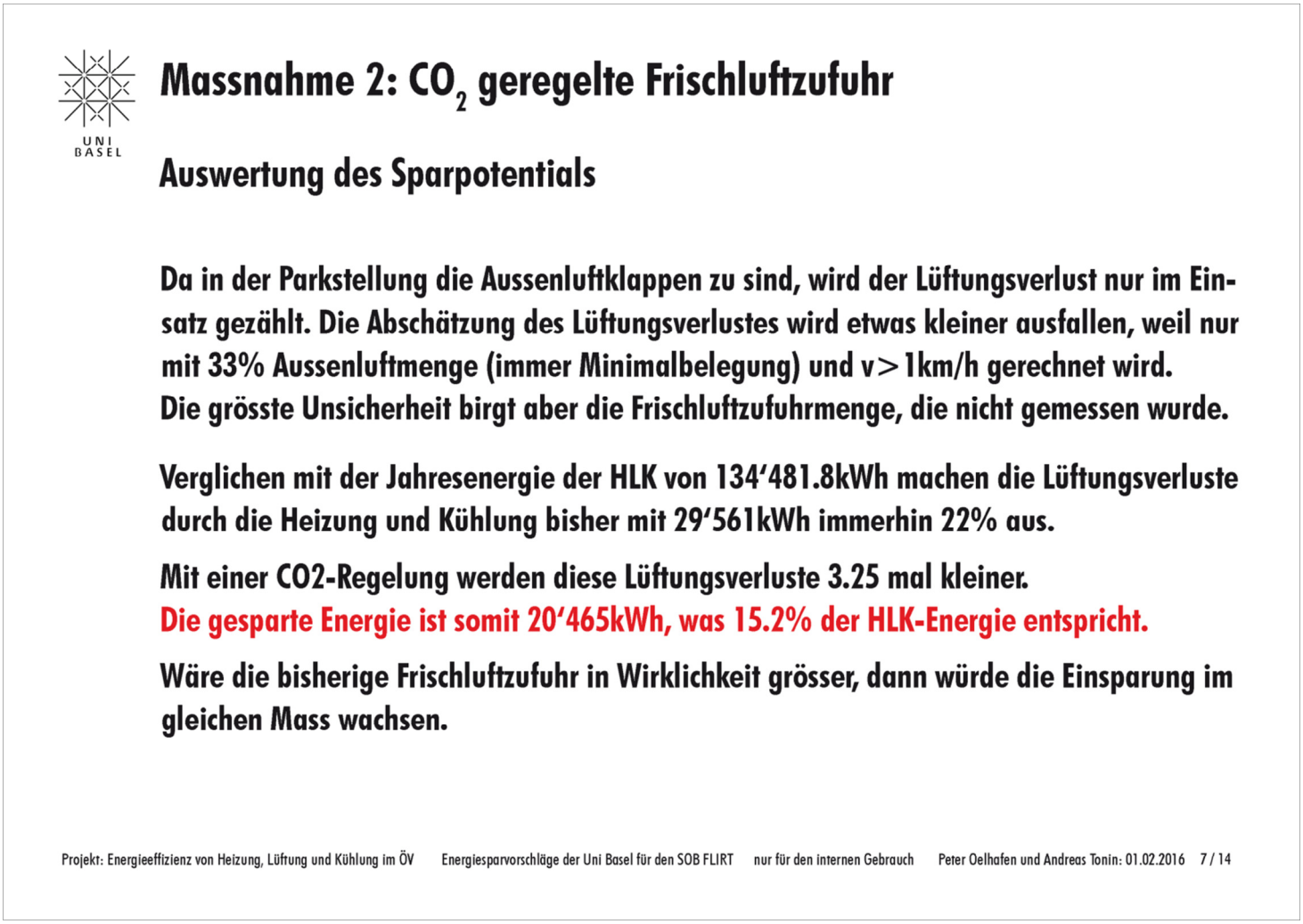


Folie 6 - Massnahme 2: CO_2 geregelte Frischluftzufuhr

Das Diagramm zeigt die CO_2 Konzentration in Funktion der Personenzahl während einzelner Fahrten (dunkelblaue Punkte) des FLIRT im Originalzustand mit stufenweiser Steuerung der Lüftungsleistung.

Alternativ wird eine CO_2 geregelte Lüftungsleistung vorgeschlagen mit einem oberen CO_2 Grenzwert von 1'100 ppm CO_2. Dadurch reduzieren sich die Lüftungsverluste im Schnitt um einen Faktor 3.25, da 3.25-mal weniger Aussenluft angesaugt werden muss.

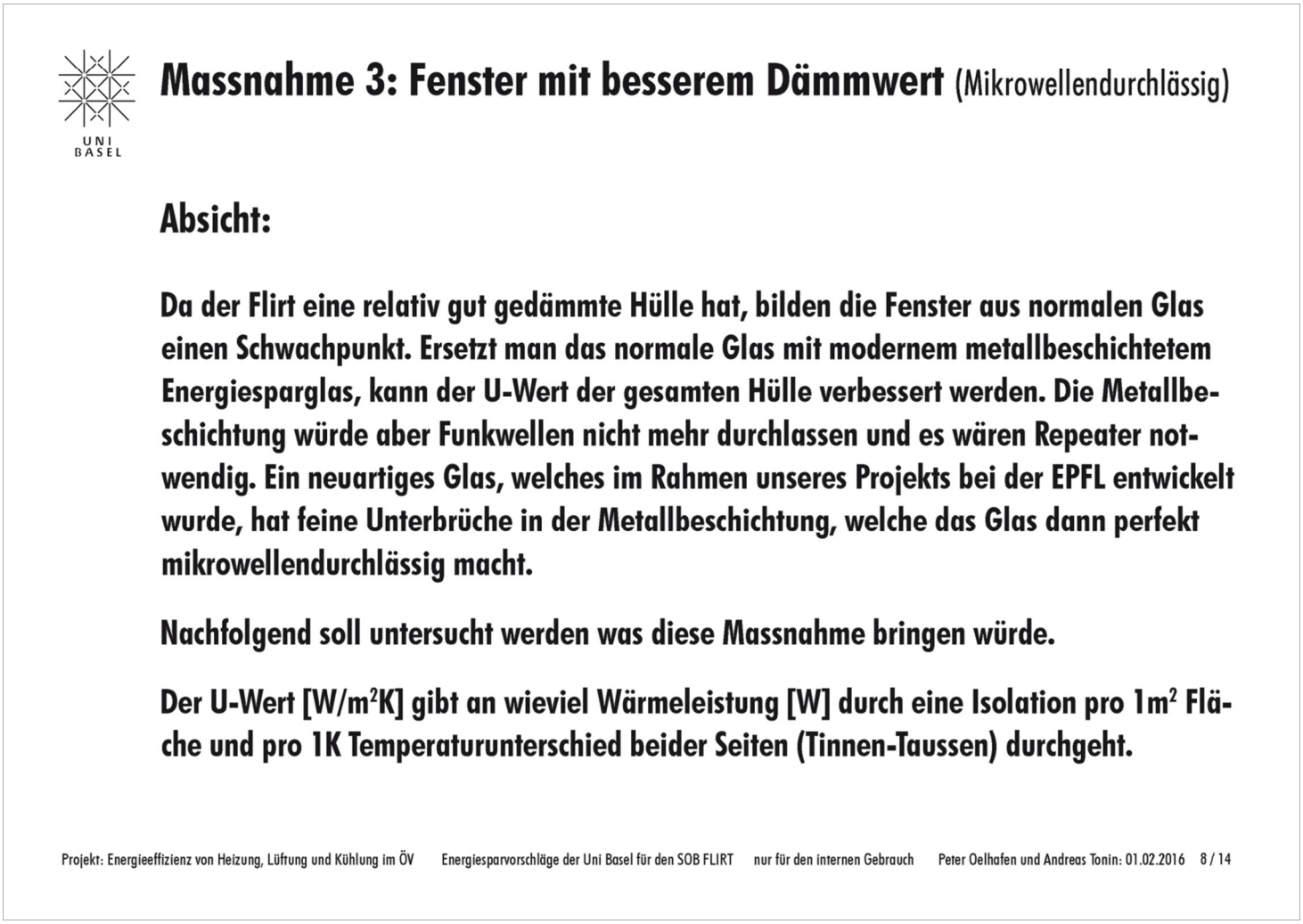
Kapitel 3, Teil 2: SOB Flirt Energiesparvorschläge der Uni Basel



Folie 7 - Berechnung des Sparpotentials

Mit der Reduktion der Lüftungsverluste des FLIRT durch Heizung und Kühlung von 29'561 kWh um den Faktor 3.25 auf 9'096 kWh ergibt sich eine Energieeinsparung von 20'465 kWh, was 15.2% der HLK Energie ausmacht.

Kapitel 3, Teil 2: SOB Flirt Energiesparvorschläge der Uni Basel



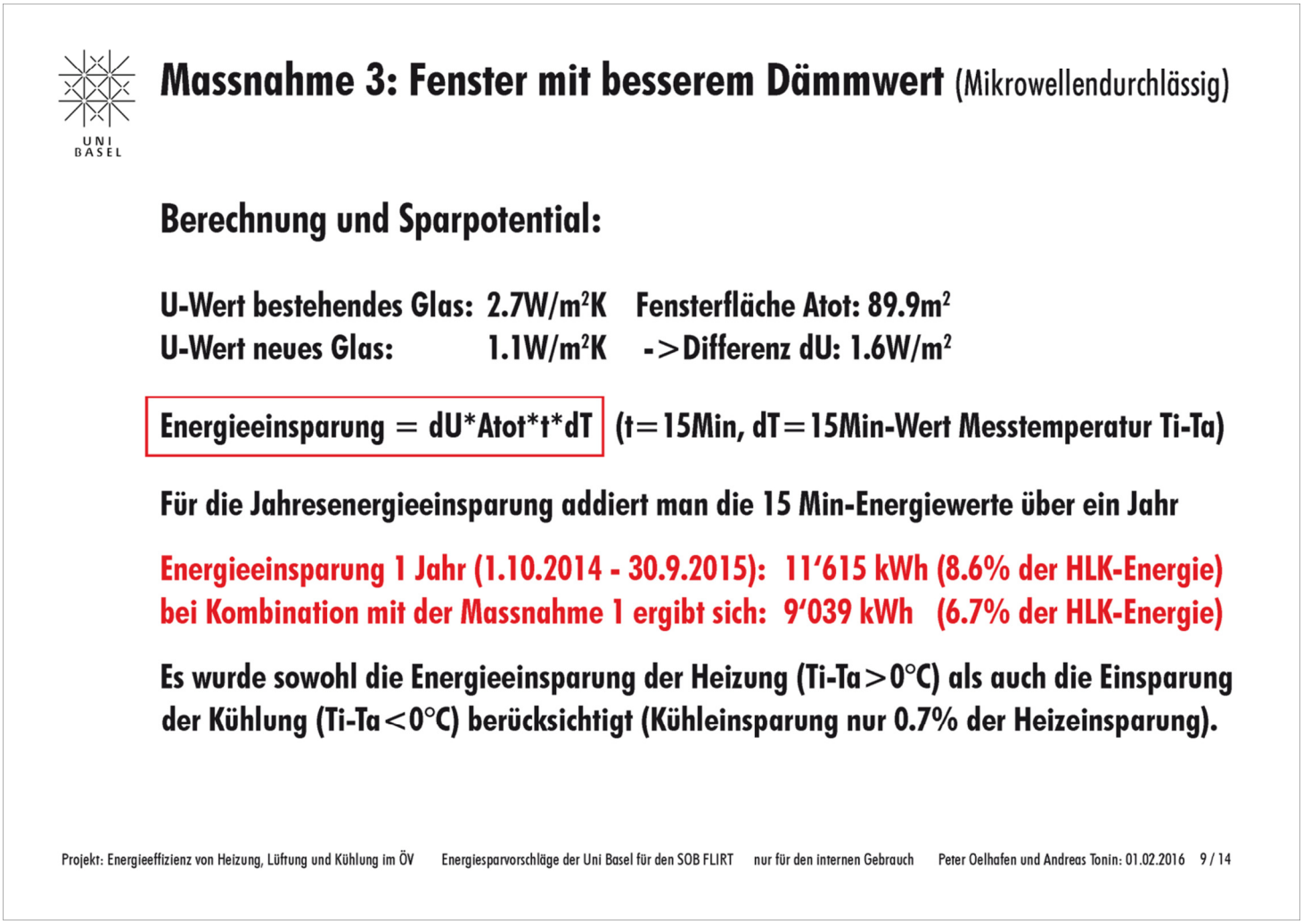
Folie 8 - Massnahme 3: Fenster mit kleinerem U-Wert und hoher Mikrowellentransmission

Da der FLIRT eine relativ gut gedämmte Hülle hat (U-Wert der ungestörten Seitenwand um 1.6 W/m^2 K), bilden die Fenster mit einem einfachen Isolierglas (U-Wert um 2.7 W/m^2 K) einen Schwachpunkt. Ersetzt man das normale Glas durch ein aktuelles low-e Isolierglas mit einer silberbeschichteten Oberfläche im Luftzwischenraum, kann der U-Wert der Fensterfläche auf 1.6 W/m^2 K reduziert werden.

Bis vor kurzem hatten die low-e Isoliergläser in Zügen allerdings den Nachteil, dass sie zusammen mit der Fahrzeughülle einen Faradayschen Käfig bildeten und für die Natel-Kommunikation mussten in die Bahnwagen kostspielige Repeater eingebaut werden. Dank einem neuen Isolierglas, einer Innovation unseres Projektpartners der EPFL (Gruppe von Andreas Schüler am LESO der EPFL[30]), können heute hochwertige low-e Gläser mit hoher Mikrowellentransmission hergestellt werden.

[30] LESO-PB (der EPFL): Laboratoire d'énergie solaire et physique du bâtiment

Kapitel 3, Teil 2: SOB Flirt Energiesparvorschläge der Uni Basel



Folie 9 - Berechnung des Sparpotentials durch Fenster mit verbessertem U-Wert

Die für die Berechnung der Energieeinsparung nötigen Parameter sind zusammen mit der entsprechenden Berechnungsformel oben wiedergegeben. Als Ersatzfenster wurde hier ein Isolierglas mit Edelgasfüllung, mit einem U-Wert von 1.1 W/(m^2 K) angenommen.
Für den Fensterersatz ergibt sich daraus eine Energieeinsparung für die Heizung und Kühlung über ein Kalenderjahr von 11'615 kWh oder 8.6% der HLK Energie. In Kombination mit der Massnahme 1, dem erweiterten Schlummerbetrieb reduziert sich die Einsparung auf 9'039 kWh da ein Energieanteil nicht zweimal eingespart werden kann.

Kapitel 3, Teil 2: SOB Flirt Energiesparvorschläge der Uni Basel

Massnahme 4: Kühlung unter 15°C Aussentemperatur abschalten

Absicht:

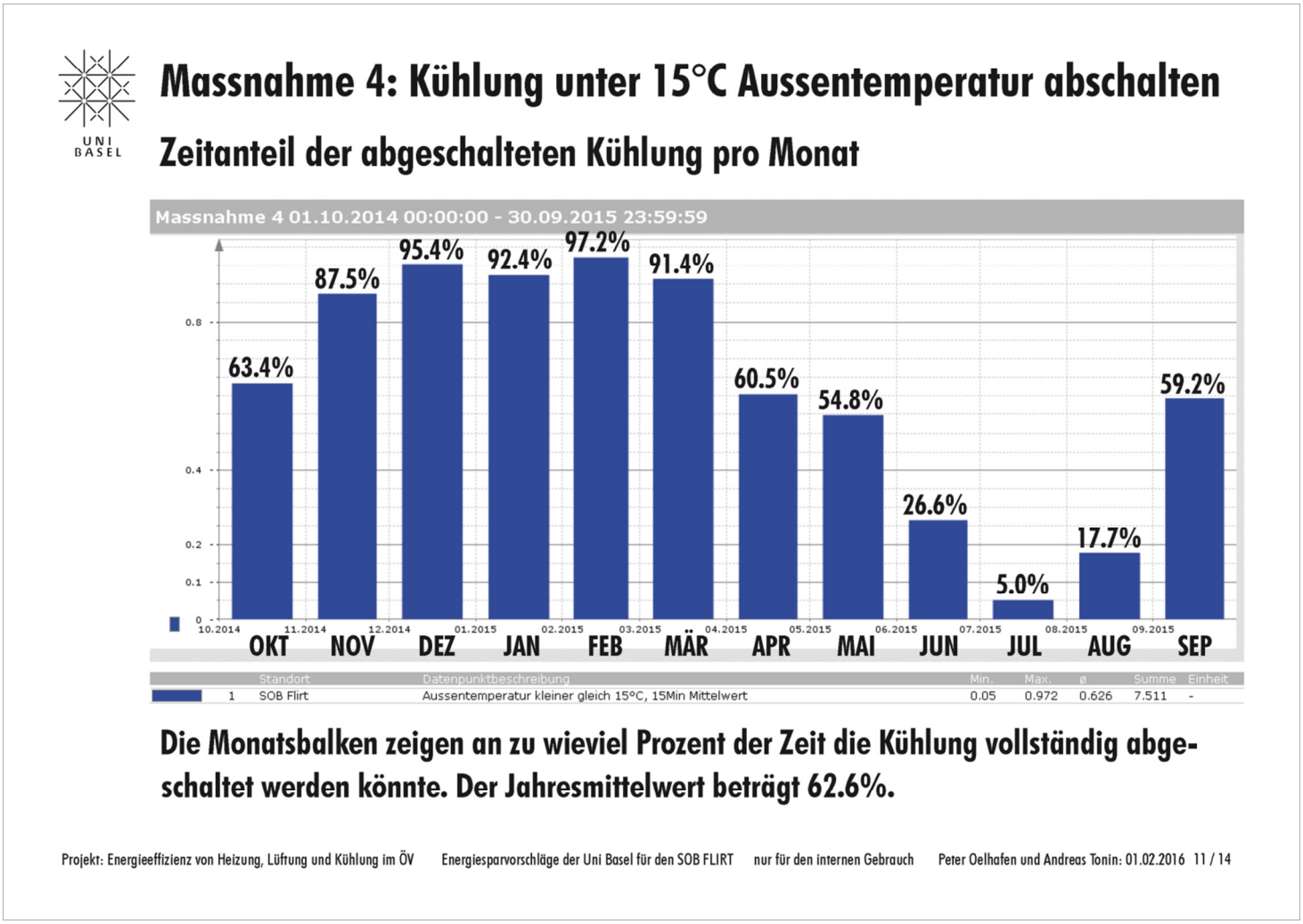
Die Kühlung soll bei Aussentemperaturen unter 15°C komplett abgeschaltet werden:

Alle Kühlaggregate des Flirts benötigen im Standbybetrieb ständig etwa 500W, obwohl nur im Hochsommer gekühlt werden muss. Da erst etwa ab 18°C Aussentemperatur Kühlbetrieb notwendig sein kann, hat das Kühlsystem genügend Zeit sichere Betriebsbedingungen zu schaffen. Es wäre auch denkbar das Kühlsystem einfach während dem Winterhalbjahr manuell abzuschalten.

Diese Bedingung wurde auf die gemessenen Energiedaten angewendet und die Einsparung der Kühlenergie für ein Jahr mit dem Datencenter ausgewertet.

Folie 10 - Massnahme 4: Kühlung bei Aussentemperaturen unter 15°C ausschalten

Kapitel 3, Teil 2: SOB Flirt Energiesparvorschläge der Uni Basel



Folie 11 - Massnahme 4: Zeitanteil der abgeschalteten Kühlung pro Monat

Das Diagramm zeigt den monatlichen Zeitanteil der abgeschalteten Kühlung. Im Jahresmittel kann die Kühlung während 62.6% der Zeit ausgeschaltet werden.

Kapitel 3, Teil 2: SOB Flirt Energiesparvorschläge der Uni Basel

Massnahme 4: Kühlung unter 15°C Aussentemperatur abschalten

Auswertung des Sparpotentials

Die Kühlung wird komplett ausgeschaltet wenn die Aussentemperatur kleiner gleich 15°C ist.

Energieverbrauch des ganzen Flirts 048 vom 01.10.2014 bis 30.09.2015 (1 Jahr)

Bezeichnung	Jahreswert [kWh]	Anteil an Nettoenergie [%]	Anteil an HLK-Energie [%]	Anteil an Kühlenergie [%]
Nettoenergie	970274.8	100.00		
HLK-Energie	134481.8	13.86	100.00	
Kühlenergie	11754.1	1.21	8.74	100.00
Sparpotential Kühlenergie	2643.0	0.27	1.97	22.49

Es können damit jährlich 2'643kWh eingespart werden.
Das sind 22.5% der Kühlenergie, 2% der HLK-Energie und 0.27% der Nettoenergie

Zusammen mit der Massnahme 1 verringert sich die eingesparte Energie auf 1'977kWh.

Projekt: Energieeffizienz von Heizung, Lüftung und Kühlung im ÖV Energiesparvorschläge der Uni Basel für den SOB FLIRT nur für den internen Gebrauch Peter Oelhafen und Andreas Tonin: 01.02.2016 12 / 14

Folie 12 - Massnahme 4: Auswertung des Sparpotentials

Mit dieser Massnahme können jährlich 2'643 kWh eingespart werden, was 22.5% der jährlichen Kühlenergie entspricht. Zusammen mit der Massnahme 1, dem erweiterten Schlummerbetrieb, reduziert sich die eingesparte Energie der Massnahme 4 auf 1'977 kWh.
Bei der Kombination von zwei Sparmassnahmen kann die gleiche Energie nicht zwei mal eingespart werden.

Kapitel 3, Teil 2: SOB Flirt Energiesparvorschläge der Uni Basel

Zusammenfassung der Sparpotentiale

Massnahme	Einsparung pro Jahr	Einsparung zur Nettoenergie	Einsparung zur HLK-Energie
M1: Schlummern	70'239kWh	7.2%	52.22% (inkl. NV)
M2: CO2/Lüftung	20'465kWh	2.1%	15.22%
M3: neue Fenster	11'615kWh	1.2%	8.64%
M3: neue Fenster inkl. M1	9'039kWh	0.9%	6.72%
M4: Kühlung	2'643kWh	0.3%	1.97%
M4: Kühlung inkl. M1	1'977kWh	0.2%	1.47%
SUMME:	101'720kWh	10.5%	75.6% (inkl. NV)

Zeitraum: 01.10.2014 - 30.09.2015 (HLK=Heizen Lüften Kühlen; NV=Nebenverbraucher)
Bisher: Nettoenergie=970'275kWh (Traktion Netto+HLK+NV), **HLK-Energie=134'482kWh**

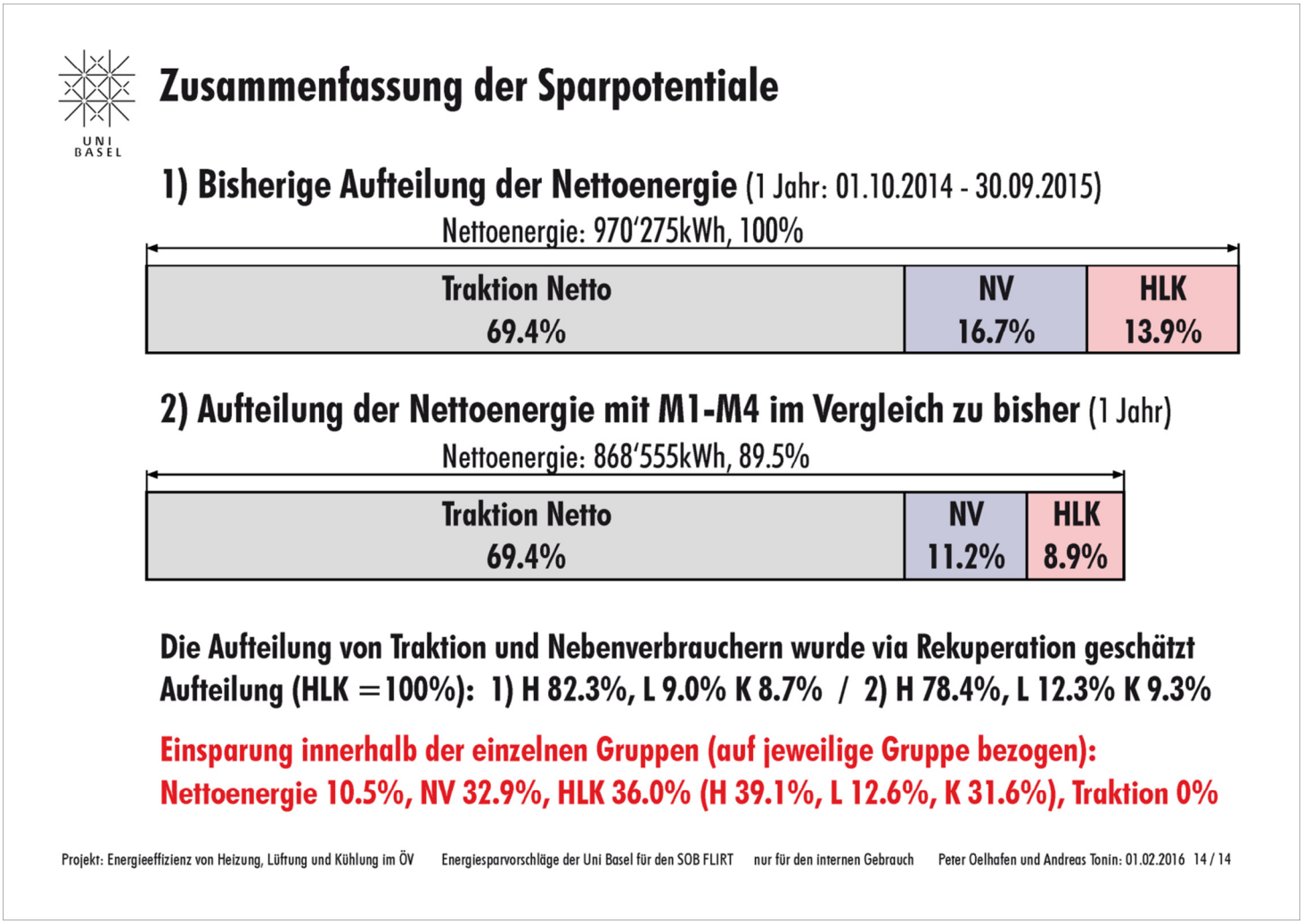
Projekt: Energieeffizienz von Heizung, Lüftung und Kühlung im ÖV Energiesparvorschläge der Uni Basel für den SOB FLIRT nur für den internen Gebrauch Peter Oelhafen und Andreas Tonin: 01.02.2016 13 / 14

Folien 13.- Zusammenfassung der eingesparten Energien der verschiedenen Massnahmen tabellarisch

Obwohl die Massnahme M4 nur wenig Sparpotential aufweist ist sie sehr einfach umzusetzen. Die durch die Massnahmen 1 bis 4 eingesparte Energie pro Jahr und Fahrzeug beträgt also rund 102'000 kWh was 0.1 GWh entspricht. Für eine Flotte von 100 FLIRT Fahrzeugen ergibt das ein jährliches Sparpotential von 1 GWh.
In diesem Zusammenhang ist eine Meldung im Internet vom 16.09.2016 interessant: An diesem Tag wurde von Stadler der eintausendste FLIRT an ein Transportunternehmen in Helsinki ausgeliefert[31]. Mit einer groben Abschätzung (verschiedene Klimazonen[32] und verschiedene Fahrzeugausstattungen) ergibt sich also ein jährliches *Energiesparpotential von 100 MWh oder 2.5 GWh über eine Zeitspanne von 25 Jahren.*

[31] www.stadlerrail.com/de/meta/news-medien/article/der-1000-flirt-ist-auf-der-schiene/ (16.09.2016)
[32] verglichen mit der Schweiz sind FLIRT Züge in kälteren Klimazonen wie Helsinki oder Tallinn oder auch heisseren Zonen wie Algerien unterwegs.

Kapitel 3, Teil 2: SOB Flirt Energiesparvorschläge der Uni Basel



Folie 14 - Zusammenfassung des Sparpotenzials im Balkendiagramm.

Die Umsetzung der vier Massnahmen würde nur den Energieverbrauch der Nebenverbraucher und der HLK verringern, der Traktionsverbrauch bleibt gleich.
Eine konkrete Umsetzung der vorgeschlagenen Massnahmen (oder Teile davon) durch die SOB fand (bis heute) nicht statt.

Grobe Abschätzung des Aufwandes und der Payback-Zeit der vier Massnahmen:

Massnahme	**Aufwand geschätzt**	**Ersparnis/Jahr (0.1Fr/kWh)**	**Payback-Zeit**
M1	Fr. 20‘000.-	Fr. 7‘000.-	3 Jahre
M2	Fr. 20‘000.-	Fr. 2‘000.-	10 Jahre
M3	Fr. 50‘000	Fr. 1‘000.-	50 Jahre
M4	„Anweisung“	Fr. 200.-	sofort

Bei der Massnahme 1 muss sichergestellt werden, dass der Zug problemlos aus und wieder eingeschaltet werden kann (inkl. Service Einschaltung).
Die Massnahme 3 lohnt sich nur im Zusammenhang mit dem Einbau von mikrowellendurchlässigen Isoliergläsern welches die Kosten der Repeater spart.[33]

[33] https://www.bls.ch/de/unternehmen/medien/medienmitteilungen/2016/08-29

Kapitel 3, Teil 3: Einfluss der Türöffnung auf die Heizleistung beim ST4

ST4 - Einfluss der Türöffnung auf die Heizleistung

Definition der relativen Türöffnungszeit „t_Tür“

Unser Messsystem im ST4-Trolleybus 871 in Lausanne (tl) misst die Türöffnung der 4 Türen sekundengenau.



Gewichtung der Türbreiten:

T1 = 18.55%
T2 = 27.15%
T3 = 27.15%
T4 = 27.15%
Σ = 100%

Sind alle Türen während der Messzeit offen, dann ist t_Tür = 100%
Sind alle Türen während der Messzeit geschlossen, ist t_Tür = 0%

Über die gesamte Laufzeit unserer Messung des ST4 seit November 2014 beträgt die mittlere relative Türöffnungszeit im Einsatz: t_Tür = 7.50%

Projekt: Energieeffizienz von Heizung, Lüftung und Kühlung im ÖV Türöffnung beim ST4, Treff in Olten (Uni BS) nur für den internen Gebrauch Peter Oelhafen und Andreas Tonin: 03.03.2017 1 / 6

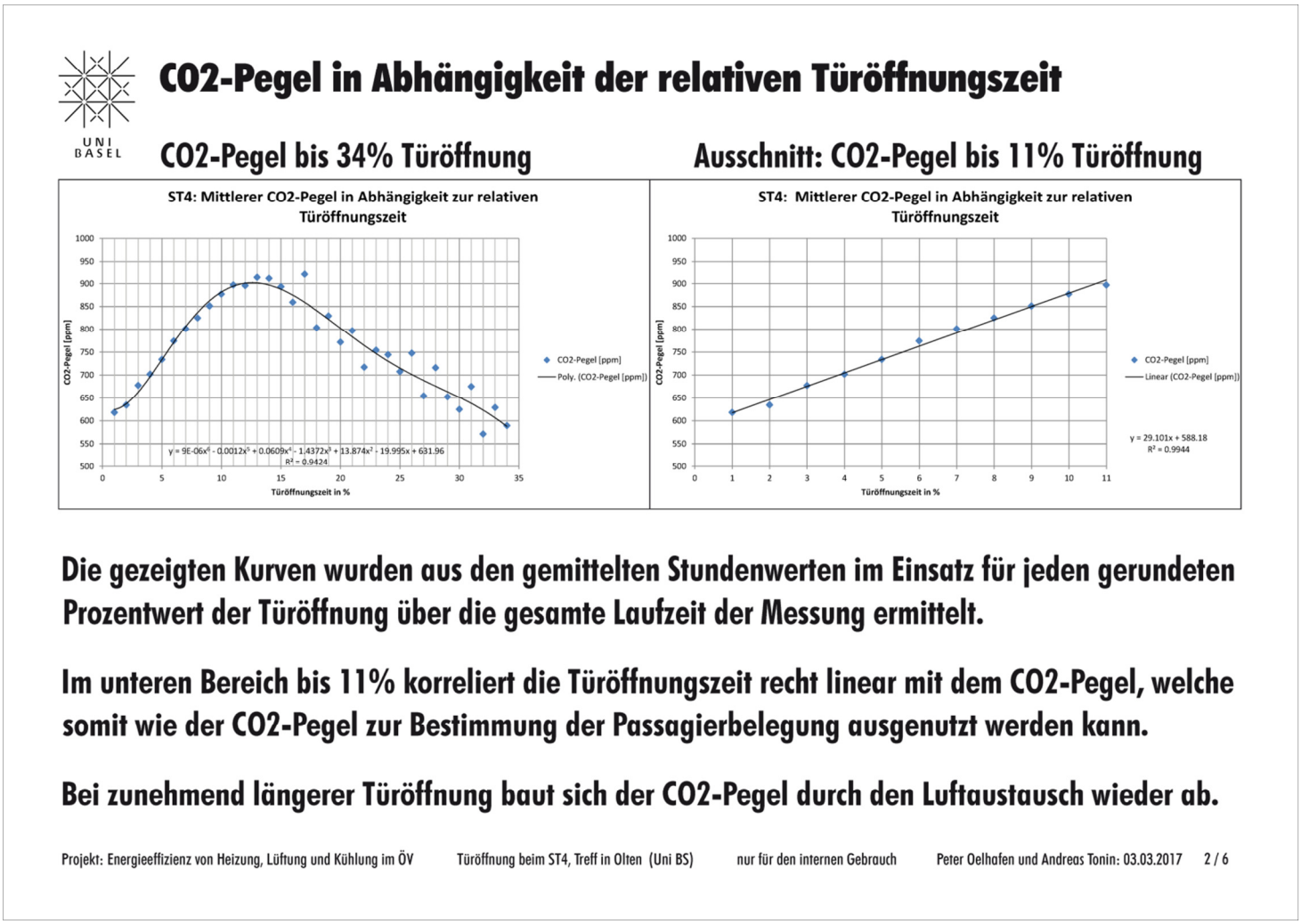
Teil 3: Einfluss der Türöffnungen auf den Heizenergieverbrauch beim ST4
(Stand 28.09.2017)

Mit der sekundengenauen Türabfrage unseres Messsystems im Swisstrolley 4 der tl in Lausanne soll der Einfluss der Türöffnungen auf die Heizenergie ermittelt werden. Bei einem eintägigen Versuch der EPFL an einem Bus konnte dieser Einfluss nicht nachgewiesen werden. Deshalb versuchen wir hier eine statistische Langzeit-Methode anzuwenden, die den Haupteinfluss der Aussentemperatur eliminiert.
Die Türhöhen betragen 1.96m, was eine totale Türfläche von 8.66m^2 ergibt. Das sind nur 4.54% der gesamten Busoberfläche (inkl. Boden) von 190.9m^2

Folie 1 – Definition der relativen Türöffnungszeit "t_Tür"

Relevant sind hier die relativen Türbreiten wie angegeben in der gelben Box auf der rechten Seite der Folie.
Das Maximum und das Minimum von t_Tür über eine Messzeit beträgt 100% bzw. 0% falls alle Türen über ein Auswertungsintervall offen bzw. geschlossen sind. Der Mittelwert im Einsatz von t_Tür über 26 Monate beträgt 7.50%. Das enstpricht einer mittleren „ständig“ geöffneten Türfläche von 0.65m^2 was nur 0.34% der gesamten Busoberfläche ausmacht!

Kapitel 3, Teil 3: Einfluss der Türöffnung auf die Heizleistung beim ST4



Folie 2 – CO_2-Pegel in Abhängigkeit der relativen Türöffnungszeit in %

Linkes Diagramm: CO_2-Pegel bis 34% Türöffnung.

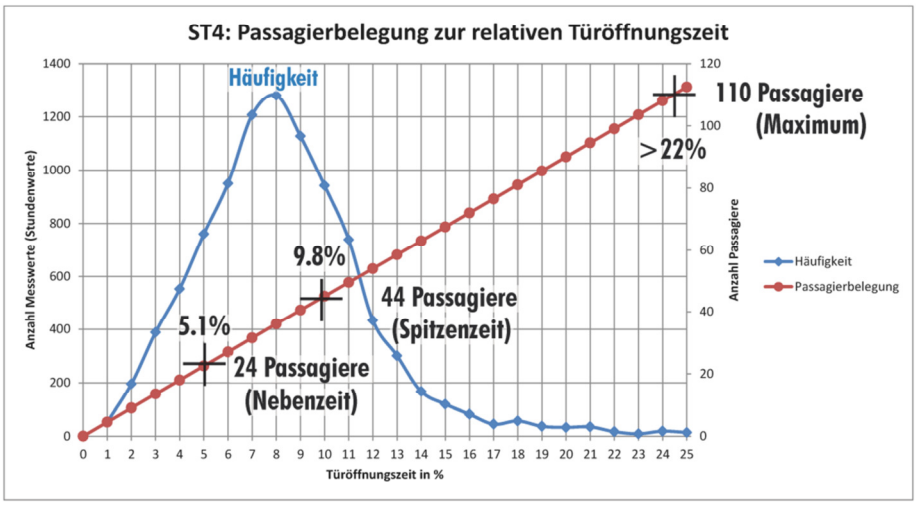
Rechtes Diagramm: Türöffnung bis 11%. Es zeigt eine lineare Abhängigkeit des CO_2-Pegels von der Türöffnungszeit. Bei zunehmender Türöffnung nimmt dann der CO_2-Pegel wieder ab.

Um die Passagierbelegung abzuschätzen eignet sich der CO_2-Pegel deshalb im Bus weniger.

Kapitel 3, Teil 3: Einfluss der Türöffnung auf die Heizleistung beim ST4

Passagierbelegung aus der relativen Türöffnungszeit

Der CO2-Pegel bei Zügen mit konstanter Lüftung ist proportional zur Passagierbelegung. Beim Bus eignet sich die Türöffnungszeit zur Bestimmung der Passagierbelegung besser.



Stützwerte:

Zählung von TL:
24 Passagiere Nebenzeit
44 Passagiere Spitzenzeit
(110 Passagiere max.)

Messung Türöffnung:
5.1% = Datenhälfte mit kurzen Türöffnungen
9.8% = Datenhälfte mit langen Türöffnungen
>22% = sehr selten

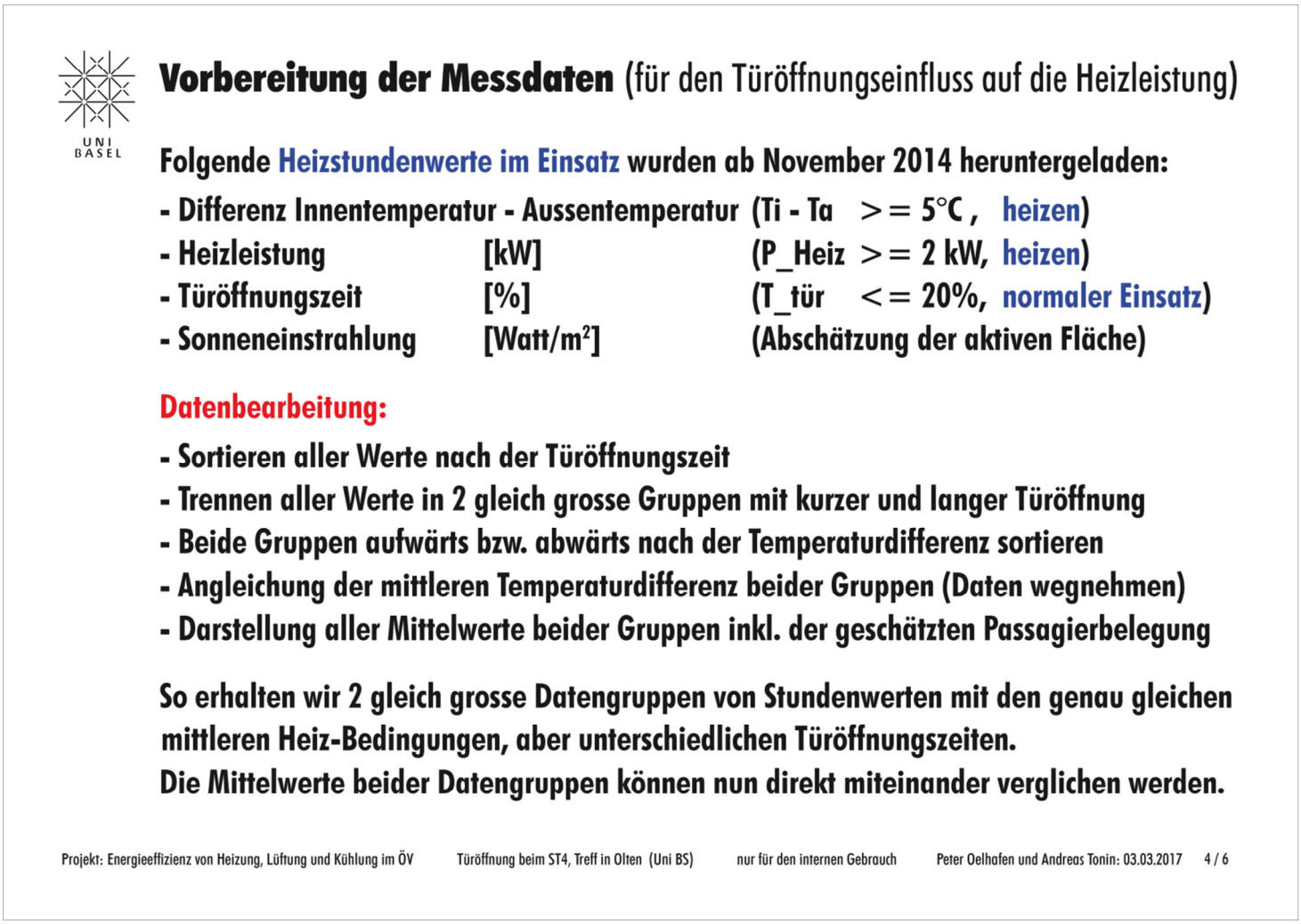
Empirische Formel: Anzahl Passagiere ≅ Türöffnungszeit [in %] x 4.5

Projekt: Energieeffizienz von Heizung, Lüftung und Kühlung im ÖV | Türöffnung beim ST4, Treff in Olten (Uni BS) | nur für den internen Gebrauch | Peter Oelhafen und Andreas Tonin: 03.03.2017 | 3 / 6

Folie 3 – Passagierbelegung

Beim ST4 eignet sich zur Bestimmung der Passagierbelegung die Türöffnungszeit besser als der CO_2-Pegel. Als Stützwerte für die Skalierung des Zusammenhangs zwischen Türöffnungszeit und der Anzahl Passagiere wurden Daten des Transportunternehmens verwendet (gemäss Angaben rechts vom Diagramm). Die maximale Belegung liegt gemäss Typenbild des Fahrzeugs bei 110 Passagieren (inkl. Stehplätzen).
Im Folgenden wird der Zusammenhang zwischen Türöffnungszeit und Belegung des Fahrzeugs durch die gelb hinterlegte lineare Formel angenommen. Die Formel gilt nur für relative Türöffnungszeiten bis 20% (Stundenmittelwert). Relative Türöffnungszeiten über 20% sind relativ selten und können z.B. bei einer Pause des Fahrers an einer Endhaltestelle auftreten.
Für die nachfolgenden Berechnungen werden deshalb nur Stunden mit relativen Türöffnungszeiten bis 20% gewählt, um das das Resultat nicht durch eine (scheinbar) zu hohe Passagierbelegung zu verfälschen.

Kapitel 3, Teil 3: Einfluss der Türöffnung auf die Heizleistung beim ST4



Folie 4 – Vorbereitung der Messdaten für die Bestimmung des Einflusses der Türöffnungen auf die Heizleistung

Es wurden rund 5'400 Stundenwerte nach den oben angegebenen Kriterien ausgewählt. Die Kriterien wurden so ausgewählt, dass die verwendeten Stundenwerte einem normalen Fahrzeugeinsatz entsprechen. So verhindert z.B. die Bedingung T_tür <= 20% dass keine Werte verwendet werden bei denen das Fahrzeug mit offenen Türen auf einem Platz vor einem Depot herumsteht.

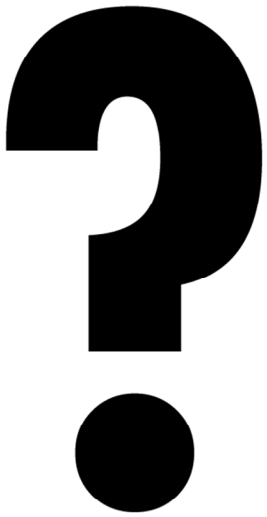
Durch die in 5 Punkten beschrieben Datenbearbeitung erhält man dann zwei gleich grosse Gruppen von Stundenwerten mit den genau gleichen mittleren Heizbedingungen (d.h. die Mittelwerte von T_i - T_a sind für beide Gruppen gleich gross) aber unterschiedlichen Türöffnungszeiten.

Kapitel 3, Teil 3: Einfluss der Türöffnung auf die Heizleistung beim ST4

Vergleich der Heizleistung bei kurzer und langer Türöffnungszeit

Mittelwerte aus je 2'712 Std.-Werten	TI-TA [°C]	P_Heiz [kW]	Türöffnung [%]	Passagiere	Sonne [W/m2]	A_Sonne [m2]
t_Tür_kurz	10.92	12.23	5.14	23.13	54.60	5.35
t_Tür_lang	10.92	11.24	9.81	44.15	92.70	3.05
Differenz pos.	0	0.99	4.67	21.02	38.10	2.30

Hoppla - mehr Heizleistung bei kürzerer Türöffnung!



Projekt: Energieeffizienz von Heizung, Lüftung und Kühlung im ÖV Türöffnung beim ST4, Treff in Olten (Uni BS) nur für den internen Gebrauch Peter Oelhafen und Andreas Tonin: 03.03.2017 5 / 6

Folie 5 – Vergleichstabelle der beiden Heizleistungsgruppen bei kurzer und langer Türöffnungszeit

Die dritte Spalte der Tabelle zeigt die benötigten Heizleistungen P_Heiz (kW) der Datengruppen bei t_Tür_kurz und t_Tür_lang.

Erstaunlicherweise ist die Heizleistung bei der Gruppe mit der kurzen Türöffnung von 5.14% grösser als bei derjenigen mit der langen Türöffnung von 9.81%!

Frage: Warum geht bei der Gruppe mit langer Türöffnungszeit weniger Heizenergie verloren als bei derjenigen mit kurzer Türöffnungszeit?

Offenbar gibt es noch andere Einflussfaktoren die mit einem Energieeintrag die Heizenergiebilanz des Fahrgastraums beeinflussen!

Kapitel 3, Teil 3: Einfluss der Türöffnung auf die Heizleistung beim ST4

Vergleich der Heizleistung bei kurzer und langer Türöffnungszeit

Mittelwerte aus je 2'712 Std.-Werten	TI-TA [°C]	P_Heiz [kW]	Türöffnung [%]	Passagiere	Sonne [W/m2]	A_Sonne [m2]
t_Tür_kurz	10.92	12.23	5.14	23.13	54.60	5.35
t_Tür_lang	10.92	11.24	9.81	44.15	92.70	3.05
Differenz pos.	0	0.99	4.67	21.02	38.10	2.30

Hoppla - mehr Heizleistung bei kürzerer Türöffnung!

Erklärung: Bei kürzerer Türöffnung hat es weniger Passagiere die mitheizen.
Mit einer Heizleistung von 100 W pro Passagier und dem Solargewinn sieht es so aus:

Mittelwerte aus je 2'712 Std.-Werten	TI-TA [°C]	P_Heiz [kW]	P_Pass. [kW]	P_Sonne [kW]	P_Total [kW]	P_Türverl. [kW]	P_Restverl. [kW]	Türöffnung [%]
t_Tür_kurz	10.92	12.23	2.31	0.29	14.83	1.21	13.62	5.14
t_Tür_lang	10.92	11.24	4.41	0.28	15.93	2.31	13.62	9.81
Differenz pos.	0	0.99	2.10	0.01	1.10	1.10	0	4.67
Durchschnitt	10.92	11.74	3.36	0.29	15.38	1.76	13.62	7.48

Nun ist die gesamte Heizleistung aus Heizung, Passagieren und Sonneneinstrahlung bei längerer Türöffnung grösser, als bei kürzerer Türöffnung. In dieser Differenz steckt der Türverlust bei 4.67% Türöffnung. Daraus lassen sich die Türverluste linear hochrechnen. Die Türverluste machen nur einen relativ kleinen Teil der restlichen Verluste durch die Hülle und Lüftung aus und werden sogar mit der Passagierabwärme überkompensiert.

Projekt: Energieeffizienz von Heizung, Lüftung und Kühlung im ÖV Türöffnung beim ST4, Treff in Olten (Uni BS) nur für den internen Gebrauch Peter Oelhafen und Andreas Tonin: 03.03.2017 6 / 6

Folie 6 – Wie ist diese Beobachtung zu erklären?

Was sich hier als Erklärung anbietet und schliesslich ein in sich konsistentes Werteensemble bildet ist hauptsächlich der Heizenergiebeitrag der Passagiere, der hier mit 100 W/Person angenommen wurde und die Sonneneinstrahlung, die hier allerdings eine eher untergeordnete Rolle spielt.
Die untere Tabelle zeigt nun alle beteiligten Heizquellen in diesem System: die Heizung des Fahrzeugs (P-Heiz), der Beitrag der Passagiere (P_Pass.) und die solare Einstrahlung (P_Sonne). Nun ist P_Total bei der Gruppe mit der längeren Türöffnungszeit um 1.1 kWh grösser als bei derjenigen mit der kurzen Türöffnungszeit was auf die um 4.67% längere Türöffnungszeit zurückzuführen ist.

Die Türverluste machen im Durchschnitt 15% der elektrischen Heizleistung aus. Auf die Heizenergie eines Jahres von 32‘806 kWh (Winter 2015 - Sommer 2016) gehen also auch etwa 15% durch die Türverluste verloren, was in diesem Jahr etwa 5‘921 kWh entspricht. 85% der Verluste entstehen aber durch die nicht isolierte Hülle des Fahrgastraums und der Lüftung, was 26‘885 kWh ergibt!

Auf der nächsten Seite wird der Lüftungsverlust in m^3/h und die mittlere Strömungsgeschwindigkeit in m/s durch die Türöffnungen berechnet.

Kapitel 3, Teil 3: Einfluss der Türöffnung auf die Heizleistung beim ST4

Berechnung des Lüftungsverlusts in m^3/h durch die Türöffnungen:

Da wir die stündlichen Türöffnungsverluste in kWh und die Temperaturdifferenz T_i-T_a kennen, können wir mit Hilfe der spezifischen Wärmekapazität und der Dichte der Luft die mit den Türöffnungen verbundenen Lüftungsverluste in m^3/h berechnen.
Für die kurze Türöffnungszeit von 5.14% ergibt sich ein Verlust von 330 m^3/h und entsprechend für die lange Türöffnungszeit von 9.81% beträgt der Verlust 631 m^3/h (berechnet mit der spezifischen Wärmekapazität von c_p = 1'003 J/(kg·K) sowie der Dichte ρ = 1.204 kg/m^3 jeweils bei 20°C).
Bei einer mittleren Türöffnungszeit von 7.5% beträgt der Lüftungsverlust 480 m^3/h.

Berechnung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit in m/s durch die Türen:

Die mittlere effektiv wirksame Türfläche beträgt bei 7.5% Türöffnung 0.65 m^2.Teilt man nun den mittleren Lüftungsverlust in m^3/h durch diese mittlere Türfläche (und 3‘600 s), dann erhält man die mittlere **Strömungsgeschwindigkeit von 0.206 m/s** durch die offenen Türen. Dieser Wert ist unabhängig von der Türöffnungszeit, weil bei zunehmender Türöffnungszeit auch das Luftvolumen im gleichen Mass zunimmt.

Schlussfolgerung:

Wichtig ist schliesslich noch die Erkenntnis, dass die Türverluste mit 1.76 kW nur einen relativ kleinen Teil der restlichen Verluste (P_Restverl. = P_Total - P_Tür = 13.62 kW) durch die Hülle und Lüftung ausmachen und schliesslich durch die Passagierabwärme von 3.36 kW überkompensiert wird.

Daraus kann der Schluss gezogen werden, dass bei Fahrzeugen wie Trolleybussen oder vergleichbaren Fahrzeugen keineswegs auf wirkungsvolle Wärmedämmmassnahmen der Fahrzeughülle verzichtet werden sollte.

Kapitel 3, Teil 4: Einsparpotential beim NINA mit verbesserter Hülle

Teil 4: Überblick zu den bisherigen Energiesparmassnahmen des NINA

Anlässlich der Nachrüstung aller 36 Fahrzeuge der BLS NINA-Flotte mit Klimageräten wurde bei einem Fahrzeug (NINA-006) Anfangs 2011 ein umfassendes Mess-System der Uni Basel eingebaut.

Nach einem Jahr Messzeit zeigte sich, dass der HLK-Verbrauch ganze 33% vom Gesamtverbrauch betrug (Traktion: 56%, Nebenverbraucher inkl. Licht: 11%). Erstaunlicherweise wurden über 28% der Gesamtenergie in der Parkstellung verbraucht.

Das war der Beginn einer ganzen Reihe von Verbesserungen die von der BLS umgesetzt wurden, oder geplant sind. Die ersten beiden Verbesserungen wurden beim NINA-006 bereits vorgenommen.

1. Verbesserung im Dezember 2013 senkt den Heizenergieverbrauch um 26.4%:
- Einführung Schlummerbetrieb (Softwareänderung)
- Optimierung Temperaturregler (Softwareänderung, Umplatzierung Temperaturfühler)

2. Verbesserung vom Juni bis November 2015 senkt den Heizenergieverbrauch um 28%:
- CO_2 gesteuerte Aussenluftzufuhr (Hard und Softwaremassnahmen)
- Low e-Glas Seitenfenster (Mobilfunkdurchlässig)
- Korrektur Schlummerbetrieb (Hard und Softwaremassnahmen)
- Ersatz der Leuchtstoffröhren durch LED-Beleuchtung (genauer: LCC)

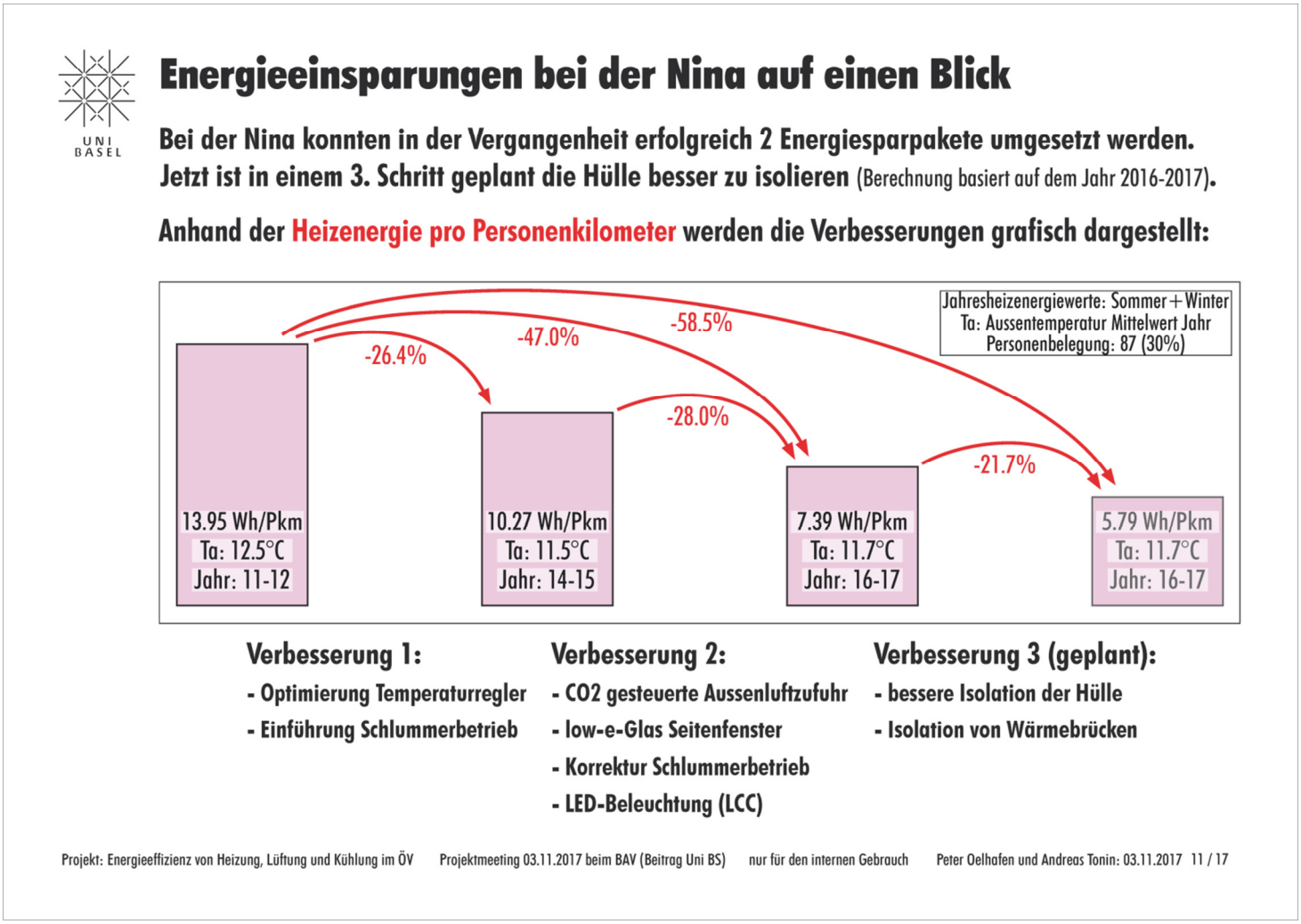
3. Verbesserung der Dämmung nur beim NINA-005 (Pilot in Umsetzung Anfang 2018)
- Die Überprüfung des möglichen Heizenergie-Einsparpotentials wird auf den folgenden Seiten beschrieben (Heizenergieverbrauchsenkung von 21.7% möglich)

4. Vollständiges Ausschalten von parkierten Zügen zwischen 5°C und 25°C Aussentemp.
- Energieeinsparung ca. 20% des gesamten Jahresverbrauchs. In Kombination mit den Massnahmen 1 und 2 könnten ca. 31% des gesamten Jahresverbrauchs eingespart werden. Diese Massnahme ist auch für viele andere Züge geplant welche teilweise schon dafür vorbereitet sind, ist aber noch nicht im Betrieb[34].

Mit den beiden umgesetzten Massnahmen 1 und 2 entspricht der Nettoenergieverbrauch pro Personenkilometer der 3-teiligen NINA-Züge mit 41.7 Wh/Pkm in etwa dem der moderneren 4-teiligen FLIRT-Züge der SOB mit 42.5 Wh/Pkm. Davor lag der Nettoenergieverbrauch des NINA bei 53 Wh/Pkm – es konnten bisher also über 21% der Gesamtenergie eingespart werden.

[34] Vortrag BKM-E Christoph Isenschmid 06.11.2015

Kapitel 3, Teil 4: Einsparpotential beim NINA mit verbesserter Hülle



Teil 4: Folie 1 - Heizenergieeinsparung bei der Nina über die Jahre

In der Grafik sieht man gut wie die gemessene Heizenergie pro Personenkilometer der NINA nach jeder Verbesserung eindrücklich abnimmt (Verbesserung: 1+2 an NINA006, 3 an NINA005).

Der 3. Schritt mit der Verbesserung der Isolation soll am NINA 005 im Jahr 2018 vorgenommen werden, wo dann auch neue low-E Fenster zum Einsatz kommen sollen. Das Ziel dieser Massnahme ist es durch eine verbesserte Wärmedämmung den U-Wert um mindestens 20% zu senken, um Heizenergie zu sparen. Im Auftrag der BLS hat Herr Renato Gartner eine aufwändige Neuausstattung des Fahrzeugs mit effizienteren Dämmstoffen und zusätzlichen Massnahmen zur Reduktion der thermischen Verluste durch Wärmebrücken ausgearbeitet (Bericht BLS[35]).Die Verbesserung des U-Werts vor und nach der thermischen Sanierung der Fahrzeughülle hat er dann in einem aufwändigen Verfahren unter Berücksichtigung der Wärmebrücken berechnet:
U-Wert alte Nina-Hülle: 2.42 W/m^2K (mit alten Fenstern und alter Isolation)
U-Wert neue Nina-Hülle: 1.83 W/m^2K (mit neuen Fenstern und neuer Isolation)
Mit diesen U-Werten konnten wir auf den nächsten Seiten die mögliche Einsparung bei der Jahresheizenergie der Nina über das Jahr vom 1.4.2016 - 31.3.2017 mit den gemessenen Stundenwerten der Temperaturdifferenzen (T_i - T_a) berechnen.

[35] Potentialanalyse für Verbesserung der thermischen Isolation der Aussenhülle beim Gliederzug BLS RABe 525 NINA (BLS Bericht)

Kapitel 3, Teil 4: Einsparpotential beim NINA mit verbesserter Hülle

Berechnung der Energieeinsparung durch die verbesserte Hülle

Eine bessere Isolation der Fahrzeughülle des NINA soll den U-Wert von bisher 2.42 W/m^{2}K auf 1.83 W/m^{2}K senken. Die im NINA 006 bereits realisierten neuen Fenster sind in dieser U-Wert Senkung aber schon enthalten und deren Einsparung muss deshalb nochmals einzeln berechnet werden. Der U-Wert der neuen Fenster wurde von 2.9 W/m^{2}K um 1.03 W/m^{2}K auf 1.87 W/m^{2}K gesenkt. Es soll nun untersucht werden wieviel Heizenergie durch diese neue Massnahme eingespart werden könnte (verbesserte Hülle inkl. neue Fenster).

Anhand des bestehenden U-Wertes der Hülle, der gesamten Abteil-Fahrzeugaussenfläche von 507.46 m^2 und der stündlich gemessenen Differenz der Innentemperatur minus der Aussentemperatur (Ti-Ta) über das Jahr vom 1.4.2016 - 31.3.2017 kann der Wärmeenergieverlust durch die Hülle für jede Stunde in einer Tabelle ausgerechnet und aufsummiert werden: Jahressumme von (2.42 W/m^{2}K * 507.46 m^2 * (Ti-Ta) / 1000) ergibt 104‘165.7 kWh pro Jahr (= Verluste durch die Hülle)
Das ist mehr als der gemessene Heizenergieverbrauch von 94‘250.1 kWh im selben Jahr!

Folgende Faktoren müssen deshalb noch berücksichtigt werden:

- Der U-Faktor der Hülle von 2.42 W/m^{2}K beinhaltet auch die schon verbauten neuen Fenster. Deshalb erhöht sich der Heizenergieverbrauch mit den alten Fenstern um 4‘945.0 kWh auf 99‘195.1 kWh (ähnliche Berechnung wie oben durch Aufsummierung der Stundenwerte über 1 Jahr mit echten ΔT-Werten, ΔU = 1.03 W/m^{2}K und A_Fenster = 56.6 m^2).
- Der Solareintrag beträgt 539.4 kWh und spart Heizenergie (Berechnung via wirksamer Solarfläche über ein Jahr).
- Der Personeneintrag beträgt etwa 24‘966 kWh und spart viel Heizenergie (Berechnung: Besetzung 20%, 100 W/Person, ergibt während jeder Heizstunde 3.8 kWh ausser von 01:00-06:59 nachts).
- Der Verlust über die Lüftung ergibt sich dann als Differenz aus der folgenden Energiebilanz:

  Heizenergiebilanz des NINA allgemein:
  E_Heiz + E_Solar + E_Personen = E_Verlust_Hülle + E_Verlust_Lüftung

Heizenergiebilanz des NINA vor der besseren Isolation und mit alten Fenstern (U_Hülle = 2.42 W/m^{2}K):

E-Heiz = 99‘195.1 kWh (Jahresverbrauch von 94‘250.1 kWh + Mehrverbrauch durch alte Fenster von 4‘945.0 kWh)
E-Solar = 539.4 kWh
E_Personen = 24‘966.0 kWh
E_Verlust_Hülle =104‘165.7 kWh (Aufsummierung der Stundenwerte mit U_Hülle = 2.42 W/m^{2}K)
E_Verlust_Lüftung = 20‘534.8 kWh (Differenz: (E_Heiz + E_Solar + E_Personen) - E_Verlust_Hülle)

Heizenergiebilanz des NINA nach der besseren Isolation der Hülle und mit neuen Fenstern (U_Hülle = 1.83 W/m2K):

E-Heiz = 73‘799.3 kWh (Jahresverbrauch von 99‘195.1 kWh minus Einsparung von 25‘395.8 kWh)
E-Solar = 539.4 kWh (bleibt)
E_Personen = 24‘966.0 kWh (bleibt)
E_Verlust_Hülle = 78‘769.9 kWh (Summierung Std-Werte mit U_Hülle = 1.83 W/m^{2}K, Einsparung: 25'395.8 kWh)
E_Verlust_Lüftung = 20‘534.8 kWh (bleibt)

Kapitel 3, Teil 4: Einsparpotential beim NINA mit verbesserter Hülle

Fazit:
Die Verbesserung der Hülle inkl. Fenster spart voraussichtlich 25.6% der Heizenergie ein: (100 * 25‘395.8 kWh / 99‘195.1 kWh). Da die Fenster des NINA aber schon vorher verbessert wurden bringt die neue Hülle allein nur noch eine Heizenergie-Einsparung von 21.7% (100 * (25‘395.8 kWh – 4‘944.97 kWh) / 94‘250.1 kWh).

Zusammenfassung des bisherigen Heizenergie-Verbrauchs des NINA pro Personenkilometer und den Einsparungen:

realisiert:	Jahresverbrauch	Einsparung
01.04.2011 - 31.03.2012:	13.95 Wh/Pkm	(Anfangszustand vor Verbesserungen)
01.04.2014 - 31.03.2015:	10.27 Wh/Pkm	(1. Verbesserung: -26.4% auf Vorperiode)
01.04.2016 - 31.03.2017:	7.39 Wh/Pkm	(2. Verbesserung: -28.0% auf Vorperiode, -47.0% auf Anfangszustand)
noch nicht realisiert:		
01.04.2016 - 31.03.2017:	5.79 Wh/Pkm	(Verbesserung der Hülle: -21.7% von 7.39 Wh/Pkm, -58.5% auf den Anfangszustand)

19.06.2017 peter.oelhafen@unibas.ch / andreas.tonin@unibas.ch

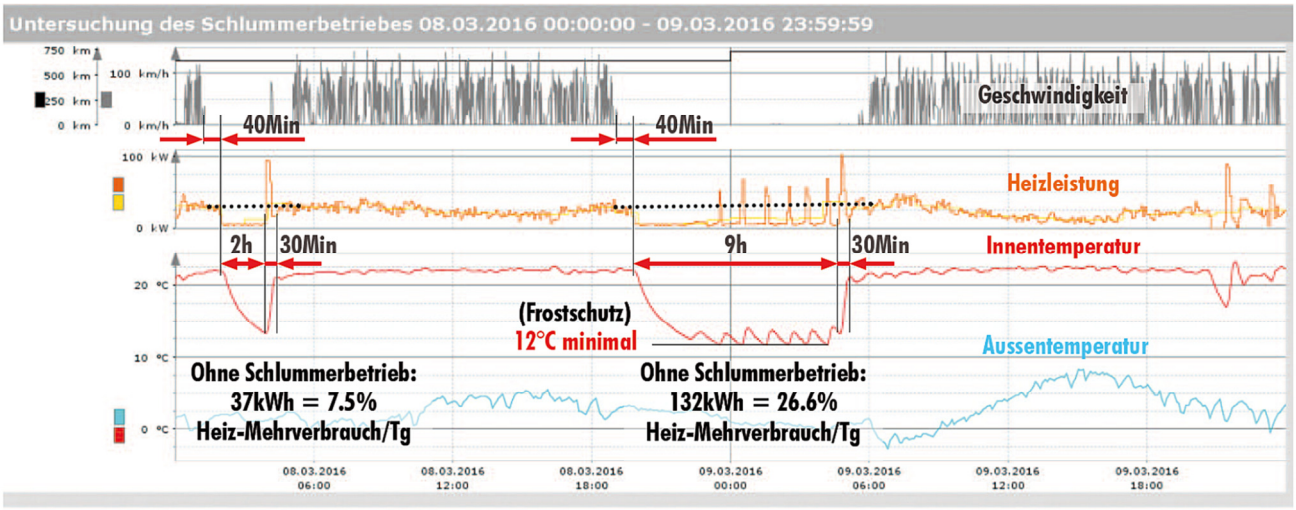
Die Grafik zu den letzten Zahlen ist auf der Seite 44 oben dargestellt.

Die Wärmedämmung reduziert den Durchgang von Wärmeenergie durch die Fahrzeughülle. Dabei spielen die Wärmeleitung, die Wärmestrahlung und die Konvektion eine Rolle. Die spezifischen Eigenschaften der Wärmedämmung wird über Wärmedurchkgangskoeffizient (U-Wert in W/m^2K) beschrieben, der möglicht klein sein sollte. Bei der Wahl einer Wärmedämmung müssen aber auch Faktoren wie Wasseraufnahme, Alterungsbeständigkeit, Verarbeitbarkeit , biologische Degradation (Schimmelbildung) und Feuerschutz berücksichtigt werden. Die notwendige Fahrzeugbelüftung reduziert die Wirkung der Wärmedämmung und sollte massvoll eingesetzt werden (z.B. CO2 Regelung der Aussenluftzufuhr).

Eine gute Wärmedämmung der Hülle ergibt neben den reduzierten Wärmeverlusten durch die Hülle, eine geringe Temperaturdifferenz zwischen der Innenwandoberfläche und der Lufttemperatur des Fahrgastraums. Dadurch kann die Solltemperatur des Innenraums gegenüber einem schlecht gedämmten Fahrzeug ohne Verminderung der Behaglichkeit gesenkt werden, was nochmals Energie spart.

Kapitel 3, Teil 5: Schlummerbetrieb bei NINA, GEX und ICN

Schlummerbetrieb bei der NINA (Zeitverhalten während 2 Tagen bei kühler Aussentemperatur)



		Standort	Datenpunktbeschreibung	Min	Max	ø	Summe	Einheit
	3	Bern Lötschberg Simplon	Geschwindigkeit (Mittelwert)	0.00	142.02	29.45	88'718.16	km/h
	3	Bern Lötschberg Simplon	Fahrstrecke aus gps (v>5km/h)aggregierbar	645.11	734.51	674.91	2'024.73	km
	2	Bern Lötschberg Simplon	Heizleistung total 5Min Wert aus Energiedifferenzen	0.0	101.2	20.6	11'891.2	kW
	2	Bern Lötschberg Simplon	Heizleistung total Stundenmittelwert aus Energiedifferenzen	4.4	39.9	20.6	990.9	kW
	1	Bern Lötschberg Simplon	Aussentemperatur minimal (Mittelwert)	-2.7	8.3	2.5	2'139.4	°C
	1	Bern Lötschberg Simplon	Innentemperatur Wagen gemittelt (ohne Fst)	11.6	23.2	20.0	52'558.4	°C

Im Diagramm sind während zwei Tagen zwei nächtliche Schlummerphasen zu sehen (Diagramm zeigt den wichtigen Teil).
Man sieht gut, wie trotzdem die Innenmindesttemperatur von etwa 12°C eingehalten wird.
Der Schlummerbetrieb setzt nun immer 40 Min. nach der Parkstellung des Zuges ein (Nachlauf) und spart so Energie.
Die Aufheizung erfolgt in 30 Min. rasch und erreicht die Endtemperatur kurz bevor der Zug den Einsatz beginnt.
Der Schlummerbetrieb bei der Nina läuft seit dem 19.02.2016 fehlerfrei (Softwareupdate und Hardwarefehlerbehebung).

Teil 5: Schlummerbetrieb bei NINA, GEX und ICN

Der Schlummerbetrieb startet automatisch nach einer gewissen Zeit in Parkstellung und spart vor allem bei den Komforteinrichtungen Heizung und Kühlung Energie. Auf 3 Folien zeigen 3 Zeitdiagramme wie der Schlummerbetrieb bei diesen verschiedenen Fahrzeugen in etwa abläuft.

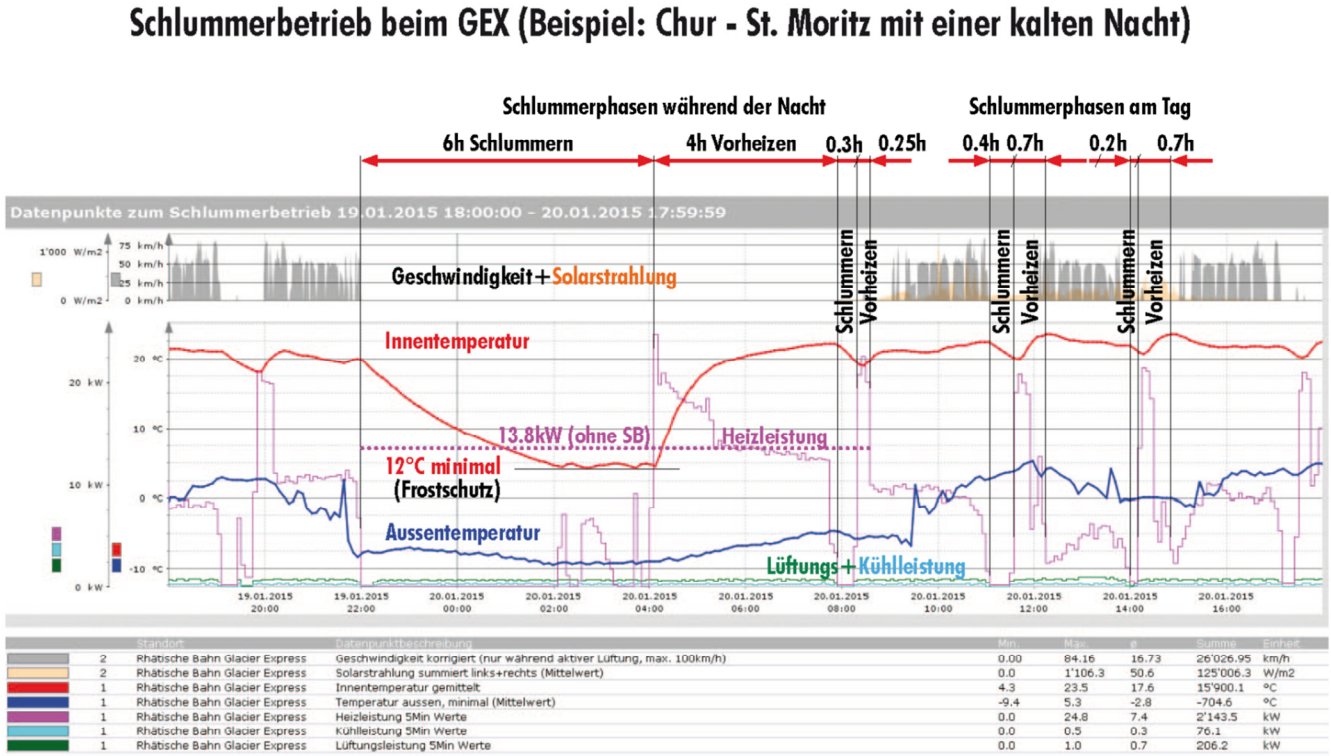
Folie 1 – Schlummerbetrieb bei der NINA

Beim NINA setzt der Schlummerbetrieb nach 40 Min in der Parkstellung ein, lässt die Innentemperatur nicht unter 12°C sinken oder über 30°C steigen und heizt in etwa 30 Min kurz bevor der Zug fährt wieder auf eine Innentemperatur von etwa 22°C auf.

Die BLS hat gemessen, dass der NINA006 in der Messperiode 2011/2012 ganze 28% der Gesamtenergie in der Parkstellung verbraucht hatte! Deshalb wurde der Schlummerbetrieb bei der HLK Ende 2013 eingeführt (siehe auch Grafik, Seite 44).
Neu geplant ist nun ein **erweiterter** Schlummerbetrieb mit dem vollständigen Ausschalten des ganzen Zuges in Parkstellung zwischen 5°C und 25°C Aussentemperatur. Das soll zusätzliche 11% des gesamten Jahresverbrauchs sparen[36].

[36] 4. Forum Energieeffizienz (VöV), 24.01.2017, BLS, Christoph Isenschmid

Kapitel 3, Teil 5: Schlummerbetrieb bei NINA, GEX und ICN



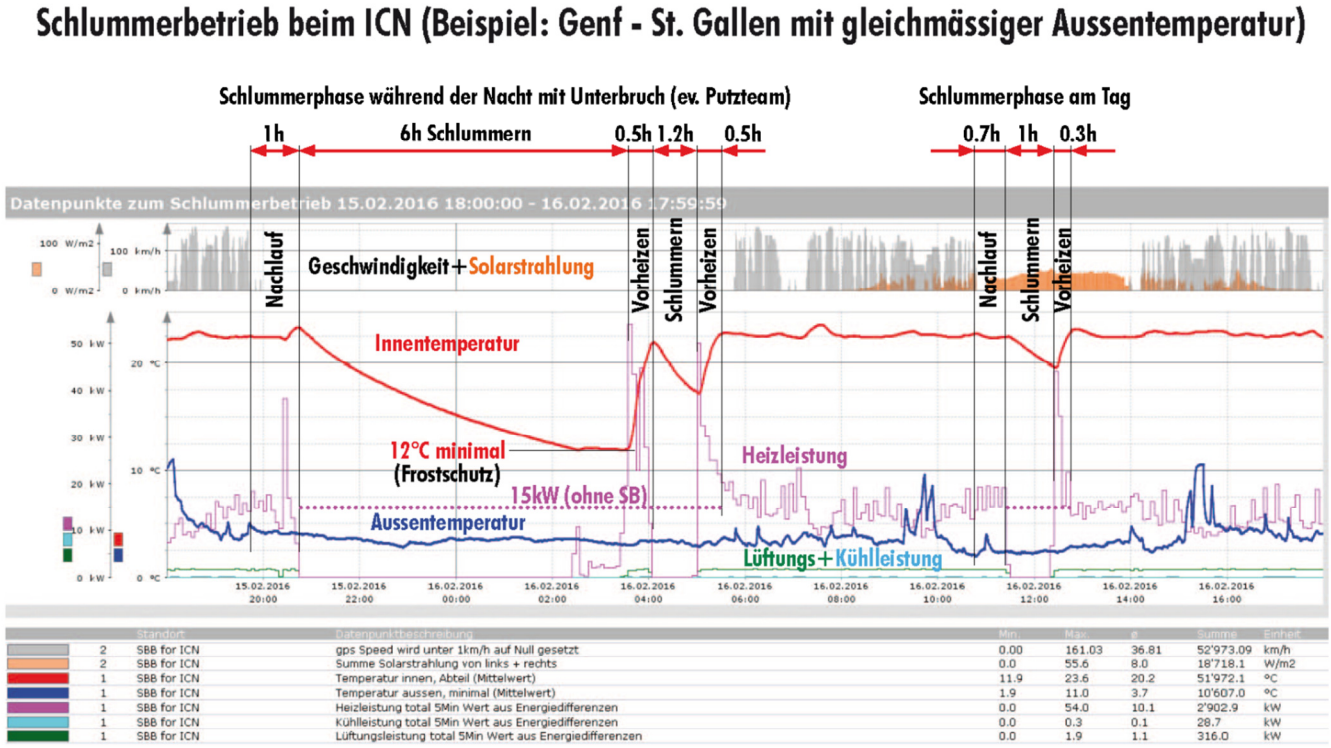
Ohne die Schlummerphasen während der Nacht wäre in diesem Beispiel der Tagesheizenergiebedarf von 178.6 kWh etwa 43% höher (255.6 kWh).
Die kurzen Schlummerphasen am Tag bringen kaum eine Energieeinsparung. Der Schlummerbetrieb beginnt in Parkstellung sofort.
In der Nacht wird der GEX immer ab 4:00 vorgeheizt, damit der Wagen frühestens um 6:00 für den Einsatz bereit ist.

Folie 2 – Schlummerbetrieb beim GEX

Beim GEX setzt der Schlummerbetrieb sofort nach der Parkstellung ein, lässt die Innentemperatur nicht unter 12°C fallen und heizt nachts meist schon um 4 Uhr auf, um dann um 6 Uhr (bei Betriebsbeginn) eine Innentemperatur von etwa 22°C zu gewährleisten. Am Tag gibt es immer wieder sehr kurze Schlummerpausen, die aber kaum etwas bringen dürften.

Vor allem die längeren nächtlichen Schlummerphasen können überproportional viel Energie einsparen, da es dann meist viel kälter ist als am Tag. So würde in diesem Beispiel der Tagesheizenergiebedarf ohne die 6 stündige Schlummerphase um 43 % höher ausfallen (statt um die anteilsmässig erwarteten 33%), obwohl das Schlummern nur ein Viertel des Tages dauerte.

Kapitel 3, Teil 5: Schlummerbetrieb bei NINA, GEX und ICN



	Standort	Datenpunktbeschreibung	Min.	Max.	ø	Summe	Einheit
2	SBB for ICN	gps Speed wird unter 1km/h auf Null gesetzt	0.00	161.03	36.81	52'973.09	km/h
2	SBB for ICN	Summe Solarstrahlung von links + rechts	0.0	55.6	8.0	18'718.1	W/m2
1	SBB for ICN	Temperatur innen, Abteil (Mittelwert)	11.9	23.6	20.2	51'972.1	°C
1	SBB for ICN	Temperatur aussen, minimal (Mittelwert)	1.9	11.0	3.7	10'607.0	°C
1	SBB for ICN	Heizleistung total 5Min Wert aus Energiedifferenzen	0.0	54.0	10.1	2'902.9	kW
1	SBB for ICN	Kühlleistung total 5Min Wert aus Energiedifferenzen	0.0	0.3	0.1	28.7	kW
1	SBB for ICN	Lüftungsleistung total 5Min Wert aus Energiedifferenzen	0.0	1.9	1.1	316.0	kW

Folie 3 – Schlummerbetrieb beim ICN

Beim ICN setzt der Schlummerbetrieb nachts etwa 1 Stunde nach der Parkstellung ein, lässt die Innentemperatur nicht unter 12°C fallen und heizt morgens meist schon vor 4 Uhr auf um dann um 5:30 Uhr (bei Betriebsbeginn) eine Innentemperatur von etwa 22°C zu gewährleisten. Am Tag gibt es immer wieder sehr kurze Schlummerpausen, die in diesem Beispiel doch etwa 3.4% Heizenergie einsparen.

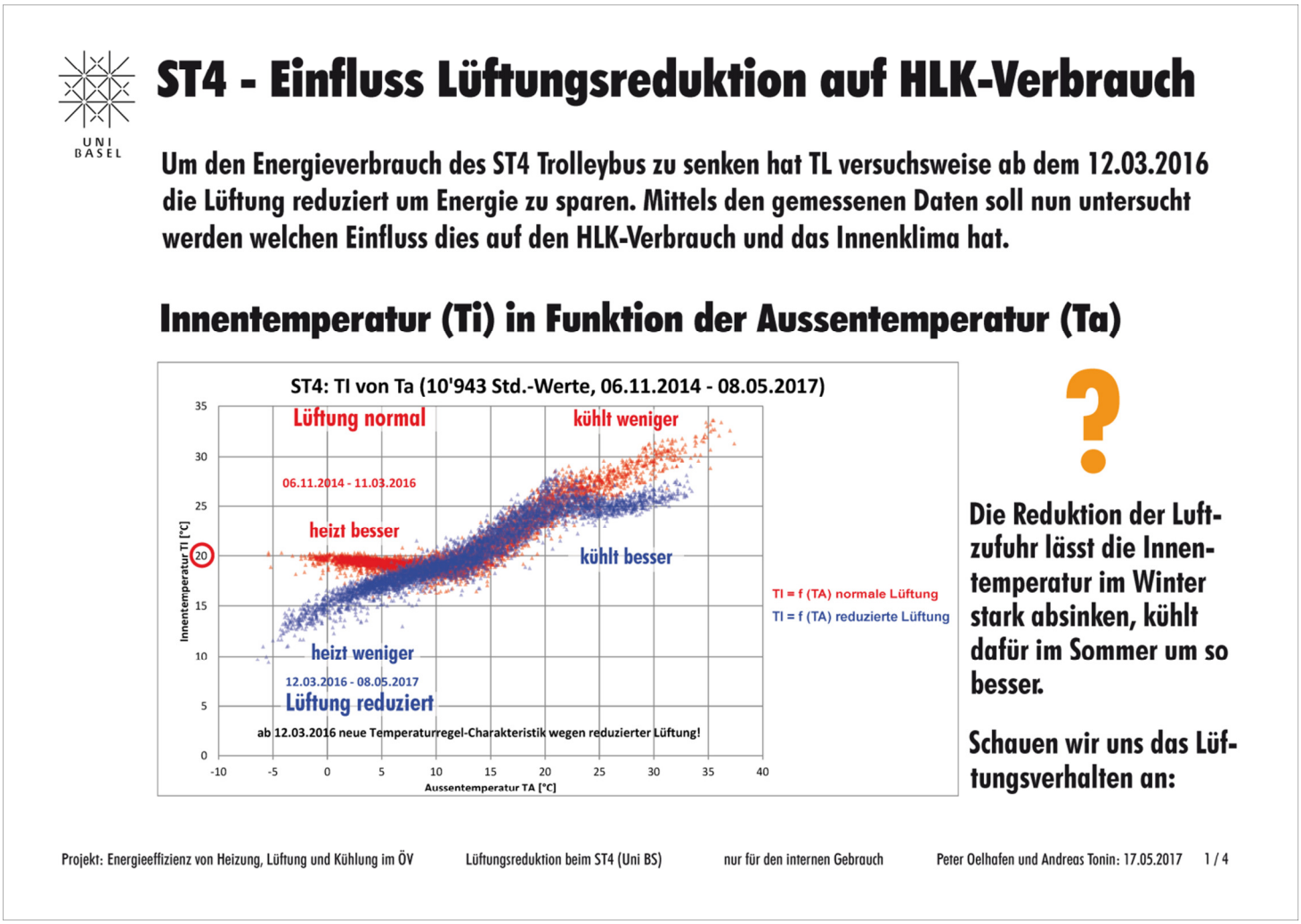
Fazit:
Der Schlummerbetrieb läuft auf allen 3 Fahrzeugen recht gut und spart vor allem in der kalten Jahreszeit viel Energie. Die Minimaltemperatur von 12°C in den Abteilen sorgt für den Frostschutz bei den WC's. Bei neuen Fahrzeugen ist der Schlummerbetrieb meist vorhanden.

Das neuartige Konzept der BLS unter günstigen Bedingungen das ganze Fahrzeug in der Parkstellung stromlos zu machen ist gut, da der Standby-Verbrauch der Nebenverbraucher wegfällt. Bei Neufahrzeugen sollten zumindest unnötige Nebenverbraucher mitschlummern.
Im Bericht der BLS wird auf folgende Probleme hingewiesen[37]:

- Für das Reinigungspersonal müssen einfache Einschaltmöglichkeiten für die Beleuchtung und die Staubsaugersteckdosen geschaffen werden
- Das Aufrüsten von Zügen benötigt mehr Zeit, mindestens 15 Minuten

[37] 4. Forum Energieeffizienz (VöV), 24.01.2017, BLS, Christoph Isenschmid

Kapitel 3, Teil 6: Reduktion der Lüfterleistung beim ST4



Teil 6: Einfluss der Lüftungsreduktion auf den HLK-Verbrauch beim ST4
(Stand 17.05.2017)

Mit einer Lüftungsreduktion wollte tl die Heiz- und Kühlenergieverluste beim ST4 senken. Da tl aber in den vorher und nachher gemessenen Daten keine Energieersparnis herauslesen konnten, haben sie uns angefragt was der Grund dafür sein könnte.

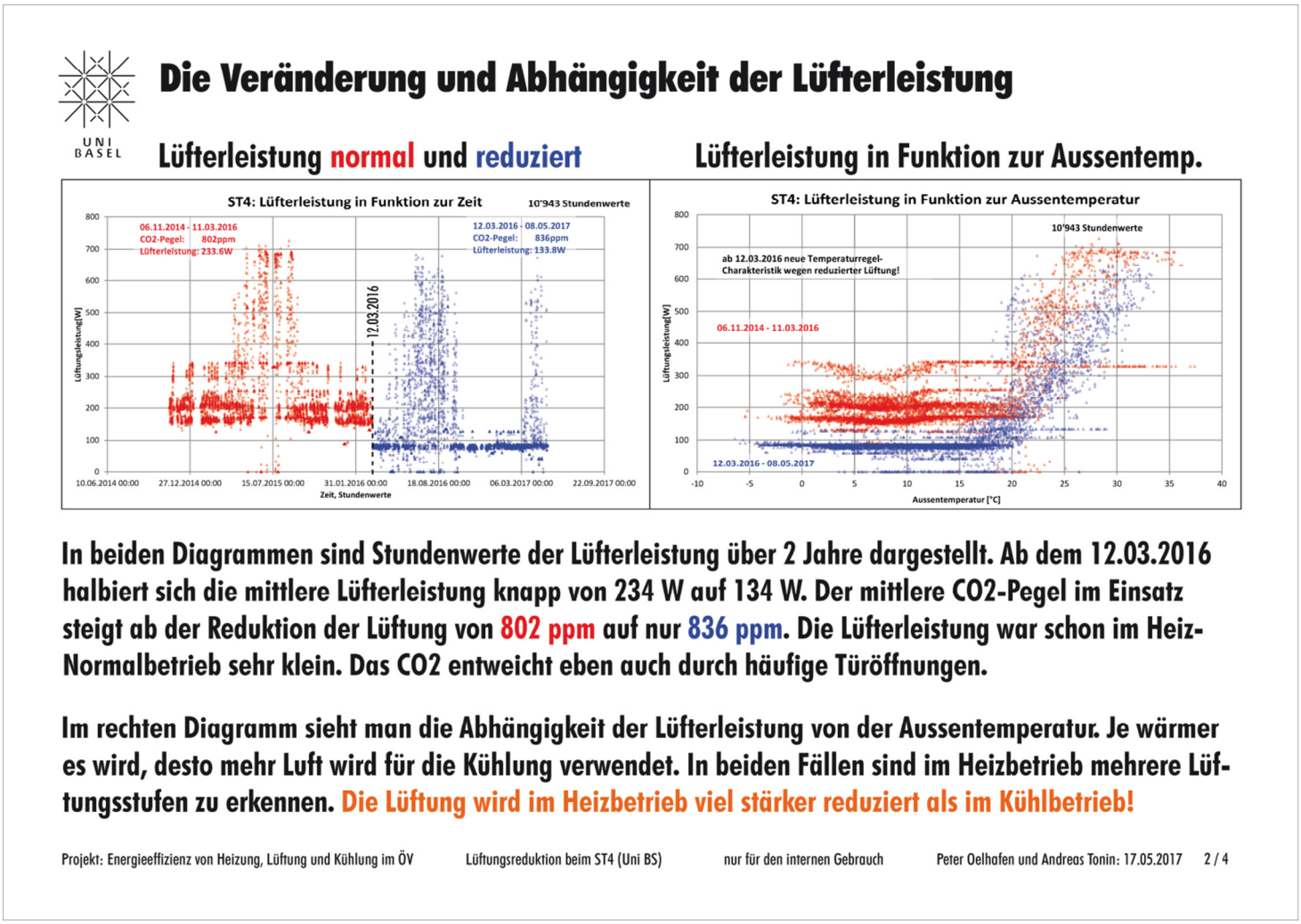
Das gab uns den Anstoss nach den Gründen dieses nicht erwarteten Verhaltens des ST4 zu suchen, da bekanntlich eine Reduktion der Lüftungsleistung zu markanten Einsparungen der Heizenergie führt.

Folie 1 – Innentemperatur (Ti) in Funktion der Aussentemperatur (Ta)

Das Diagramm zeigt wie gut die Innentemperatur in Abhängigkeit von der Aussentemperatur geregelt wird. Die roten Stundenwerte wurden dabei mit normaler Lüftung gemessen und die blauen mit reduzierter Lüftung.

Schon hier zeigen sich unerwartete Effekte auf die Innentemperaturregelung mit weniger Heizvermögen im Winter und besserem Kühlvermögen im Sommer.

Kapitel 3, Teil 6: Reduktion der Lüfterleistung beim ST4



Folie 2 – Die Veränderung und Abhängigkeit der Lüfterleistung

Im linken Diagramm werden die Stundenwerte der Lüfterleistung in Funktion der Zeit dargestellt – zuerst 365 Tage mit normaler Lüftung und dann 365 Tage mit reduzierter Lüftung. Die Lüfterleistung mit reduzierter Lüftung ist dabei im Schnitt etwa halb so gross wie mit normaler Lüftung.

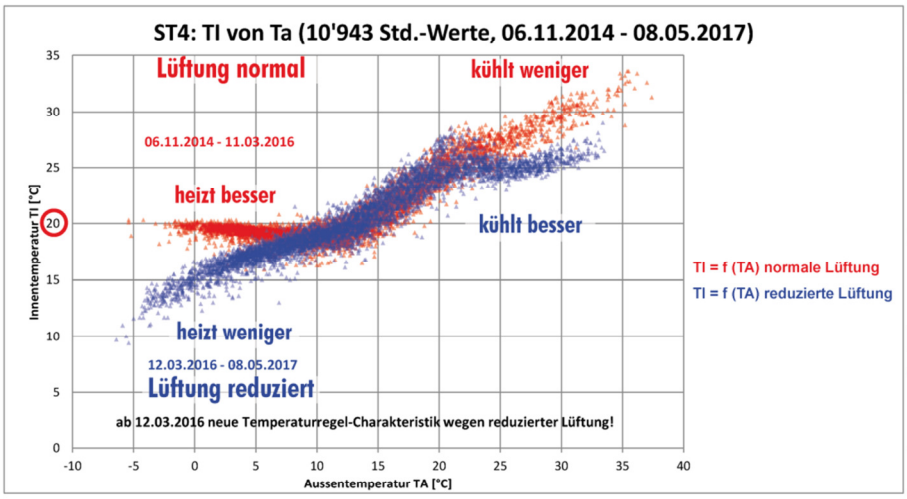
Steigt die Aussentemperatur über 15°C vergrössert sich die Lüfterleistung kontinuierlich, um die Kühlung des Fahrgastraumes zu gewährleisten (rechtes Diagramm). Dabei entsprechen die roten Punkte den Stundenwerten mit normaler Lüftung und die blauen Punkte denjenigen mit reduzierter Lüftung. Im reinen Heizbetrieb (unter 15°C) wird die Lüftung deutlich stärker reduziert als im Kühlbetrieb wo die Lüfterleistung kontinuierlich ansteigt.

Kapitel 3, Teil 6: Reduktion der Lüfterleistung beim ST4

ST4 - Einfluss der Lüftungsreduktion auf den HLK-Verbrauch

Die Lüftung muss im Kühlbetrieb stärker sein als im Heizbetrieb, weil nur über die Deckenventilation gekühlt wird, während dem die Heizung zusätzlich auch über Warmwasserradiatoren erfolgt. Warum hat die Reduktion der Luftzufuhr nun diesen Einfluss auf die Innentemperatur?

Innentemperatur (Ti) in Funktion der Aussentemperatur (Ta)



Erklärung:

Bei stark reduzierter Luftzufuhr im Heizbetrieb kann die kalte Aussenluft beim Wärmetauscher zu wenig Wärme mitnehmen.

Bei nur leicht reduzierter Luftzufuhr im Kühlbetrieb lässt sich die warme Aussenluft dafür effektiver kühlen.

Projekt: Energieeffizienz von Heizung, Lüftung und Kühlung im ÖV | Lüftungsreduktion beim ST4 (Uni BS) | nur für den internen Gebrauch | Peter Oelhafen und Andreas Tonin: 17.05.2017 | 3 / 4

Folie 3 – Innentemperatur (Ti) in Funktion der Aussentemperatur (Ta)

Beim ST4 heizt eine aussenliegende wenig isolierte Boilerheizung elektrisch Wasser auf, welches in einem Kreislauf einerseits die Radiatoren der Konvektionsheizung im Fahrgastraum erwärmt und andererseits die kaum isolierten Heizregister auf dem Dach für die Luftheizung mit Wärme versorgt. Dieses System ist nicht effizient, da viel Wärme ungenutzt verloren geht. Der einzige Vorteil dieser Heizung liegt in der Speicherung von Rekuperationsenergie beim Bremsen in Form von Wärme. Bei neueren Busmodellen hat Hess dieses Heizungskonzept deshalb überarbeitet.

Aus der Tatsache, dass die Lüftung im Heizbetrieb stärker reduziert wird als im Kühlbetrieb lassen sich die unerwarteten Effekte auf die Innentemperaturregelung besser erklären:

Da im Winter die Luftheizung über die stark reduzierte Lüftung praktisch ausfällt kann die Konvektionsheizung allein die Soll-Innentemperatur von 20°C nicht mehr erreichen. Im Heizregister auf dem Dach verpufft viel Wärmeenergie.

Im Sommer hingegen kann bei nur leicht reduzierter Luftzufuhr die heisse Aussenluft im Wärmetauscher des Kühlaggregates auf dem Dach besser abgekühlt werden und kühlt den Fahrgastraum dadurch effektiver. Die Wirksamkeit der Kühlung wird dadurch optimiert.

Kapitel 3, Teil 6: Reduktion der Lüfterleistung beim ST4

UNI BASEL

Energieverbrauch der HLK vor und nach der Lüftungsreduktion

Jahresverbrauch der HLK vor+nach dem 12.03.2017 (ohne Klimaausgleich, nur Tage im Einsatz):

Mittlere Tageswerte im Einsatz, ohne Klimaausgleich	Zeitraum	Anzahl Tageswerte	E_Netto/Tag	E_Heiz/Tag	E_Lüft/Tag	E_Kühl/Tag	E_HLK/Tag	Tages-Einsatzzeit	Tages-Strecke	Klima Ti -Ta
			[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[h]	[km]	[°C]
Lüftung normal	12.03.2015 - 11.03.2016	315	454.46	100.22	3.94	8.80	112.97	15.33	205.45	5.94
Lüftung reduziert	12.03.2016 - 11.03.2017	320	474.61	110.74	2.15	7.56	120.45	15.77	209.71	6.25
Differenz: normal - reduziert		-5	-20.14	-10.52	1.79	1.24	-7.48	-0.43	-4.26	-0.31

Jahresverbrauch der HLK vor+nach dem 12.03.2017 (mit Klimaausgleich durch Tagesauswahl):

Mittlere Tageswerte im Einsatz, mit Klimaausgleich	Zeitraum	Anzahl Tageswerte	E_Netto/Tag	E_Heiz/Tag	E_Lüft/Tag	E_Kühl/Tag	E_HLK/Tag	Tages-Einsatzzeit	Tages-Strecke	Klima Ti -Ta
			[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[h]	[km]	[°C]
Lüftung normal	12.03.2015 - 11.03.2016	311	448.55	99.86	3.86	7.92	111.64	15.12	202.63	6.02
Lüftung reduziert	12.03.2016 - 11.03.2017	311	457.26	103.14	2.11	7.56	112.81	15.32	204.18	6.02
Differenz: normal - reduziert		0	-8.70	-3.28	1.75	0.36	-1.17	-0.20	-1.55	0.00

Um die Jahreswerte besser vergleichen zu können, wurden nur Tage mit durchgehendem Einsatz gewählt und alle Werte pro Tag gezeigt (obere Tabelle). Der Einfluss des Klimas kann eliminiert werden, indem Tage gezielt weggelassen werden, damit die mittlere Temperaturdifferenz (Ti-Ta) Null wird (untere Tabelle). Nur die Lüftungs- und Kühlenergie verringert sich bei reduzierter Lüftung, die mittlere Heizenergie nimmt zu!

Die Lüftungsreduktion spart beim ST4 unter dem Strich keine HLK-Energie, weil die Effizienz der Heizung abgenommen hat. Da die Heizung in der kalten Jahreszeit ungenügend heizt, sollte im Heizbetrieb die Lüftungsreduktion aufgehoben werden und im davon profitierenden Kühlbetrieb beibehalten werden.

Projekt: Energieeffizienz von Heizung, Lüftung und Kühlung im ÖV | Lüftungsreduktion beim ST4 (Uni BS) | nur für den internen Gebrauch | Peter Oelhafen und Andreas Tonin: 17.05.2017 | 4 / 4

Folie 4 – Energieverbrauch der HLK vor und nach der Lüftungsreduktion

Es ist nicht so einfach den Jahresverbrauch der Heizung und der Kühlung zweier unterschiedlicher Jahre miteinander zu vergleichen. Die mittlere Temperaturdifferenz von der Innentemperatur zur Aussentemperatur (Ti – Ta) müsste bei beiden Jahren exakt gleich sein. Das lässt sich durch den oben gezeigten Trick bewerkstelligen, indem ein paar Tage gezielt wegelassen werden um die Temperaturdifferenz beider Jahre anzugleichen. Zum Vergleich ist es aber auch wichtig nur Tage mit durchgehendem Einsatz auszuwählen und den mittleren Tagesverbrauch zu verwenden.
Durch die Lüftungsreduktion haben zwar die Lüftungs- und Kühlenergie im Tagesmittel um 2.07 kWh abgenommen, aber gleichzeitig hat die Heizenergie um 3.28 kWh zugenommen. Unter dem Strich resultiert dadurch ein HLK-Tagesmehrverbrauch von 1.21 kWh, was etwa 1.2% entspricht und ohne Klimaausgleich nicht messbar ist.

TL hat als Konsequenz am 8.11.2017 die Lüftung im Heizbetrieb des ST4 wieder erhöht, dafür den Sollwert der Innentemperatur im Heizbetrieb von 17°C auf 15°C erniedrigt. Sofern der Versuch nicht an den Reklamationen der Passagiere scheitert ist mit dieser neuen Massnahme eine starke Heizenergiereduktion bis zu 20% zu erwarten. Auf die Anfrage von tl haben wir diese Heizersparnis mittels zweier Modelle abgeschätzt.

Kapitel 3, Teil 7: Auswirkung der Feuchtigkeit auf die Heizenergie (FLIRT, NINA)

UNI BASEL

Auswirkung der Feuchtigkeit auf die Heizenergie

Mit einer neuen Methode wird bei 2 Fahrzeugen abgeschätzt wieviel Heizenergie durch feuchte Isolation verloren geht. Bei der Nina wird zudem gezeigt wie sich die Lüftungsreduktion durch die CO2 gesteuerte Zuluft auf die spezifische Heizleistung und die Innenfeuchtigkeit auswirkt.



FLIRT RABe526-048 (SOB)



NINA RABe525-006 (BLS)

- Taupunktwahrscheinlichkeit (TPW) - am Flirt erklärt
- Heizenergieverlust durch feuchte Isolation (aus Messdaten)
- Abschätzung Heizenergieverlust durch feuchte Isolation (Flirt und Nina)
- Taupunktwahrscheinlichkeit bei Flirt und Nina
- CO2 gesteuerte Zuluft bei der Nina - vorher und nachher

Projekt: Energieeffizienz von Heizung, Lüftung und Kühlung im ÖV Projektmeeting 03.11.2017 beim BAV (Beitrag Uni BS) nur für den internen Gebrauch Peter Oelhafen und Andreas Tonin: 03.11.2017 1 / 10

Teil 7: Auswirkung der Feuchtigkeit auf die Heizenergie (FLIRT, NINA)
(Stand 03.11.2017)

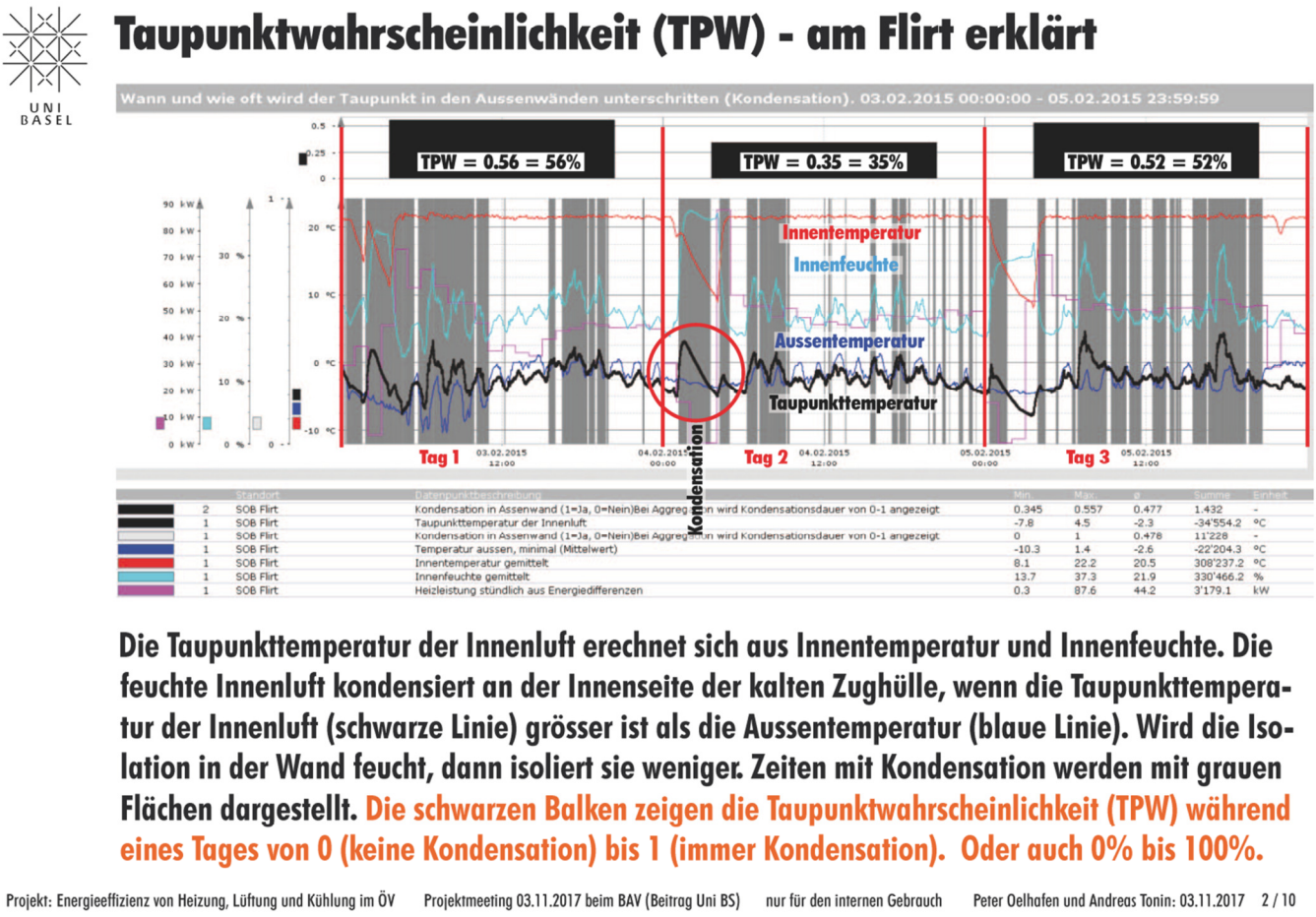
Wenn die Wärmedämmung Kondensationsfeuchtigkeit aufnimmt stellt sich die Frage wie stark dies die Wärme-Isolation verringert. Durch die langjährigen Messungen von Klimabedingungen und Heizenergie verschiedener Züge lässt sich die Spezifische Heizenergie bei verschiedenen Kondensationsbedingungen bestimmen.

Folie 1 – Inhaltsverzeichnis

Projektmeeting: 03.11.2017 (Auszug Vortrag A. Tonin):

Folie.	2:	Definition der Taupunktwahrscheinlichkeit
Folien	3 - 4:	Erklärung der Methode: Heizenergieverlust durch feuchte Isolation
Folien	5 - 7:	Anwendung der Methode auf FLIRT und NINA
Folien	8 – 9:	Taupunktwahrscheinlichkeit bei FLIRT und NINA
Folie	10:	CO_2 gesteuerte Zuluft bei der NINA – vorher und nachher

Kapitel 3, Teil 7: Auswirkung der Feuchtigkeit auf die Heizenergie (FLIRT, NINA)



Folie 2 – Taupunktwahrscheinlichkeit (TPW) – am FLIRT erklärt

Die Taupunktwahrscheinlichkeit eines Tages ist das Verhältnis der Zeit in Stunden mit Kondensation (graue Flächen: Taupunktunterschreitung) geteilt durch 24 Stunden (Minutenauflösung). Das Tagesergebnis ist jeweils ganz oben in den breiten schwarzen Balken dargestellt.

Wenn es draussen kalt ist, im Fahrzeug geheizt wird und die relative Innenfeuchte gross ist, tritt vermehrt Kondenswasser an der kalten Innenseite der Zughülle auf[38]. In der Folge wird die Isolation feucht und die Isolationsfähigkeit wird vermindert. Obwohl ein grosser Teil des Kondensats nach unten ausläuft muss angenommen werden, dass die Isolation relativ lange braucht um vollständig zu trocknen. Es macht deshalb Sinn mit Tagesdurchschnittsdaten zu arbeiten.

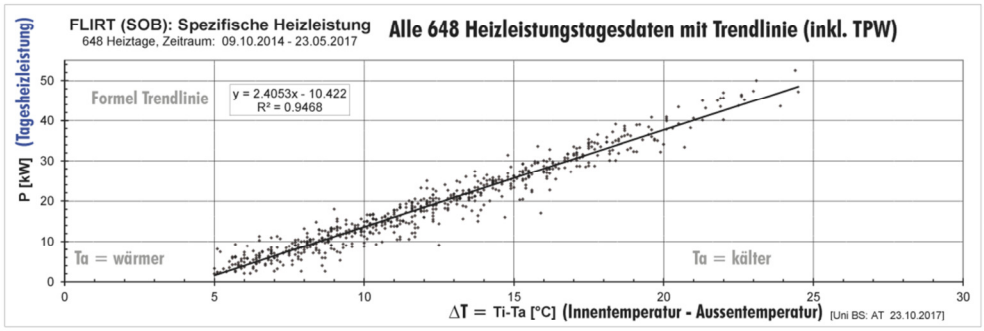
Die Taupunktwahrscheinlichkeit ist hauptsächlich in den Wintermonaten und den kälteren Morgen und Abenden in der Übergangszeit erhöht. Auch die Passagierbelegung spielt mit der dadurch erhöhten Innenfeuchtigkeit eine Rolle. Weniger Aussenluftzufuhr erhöht ebenfalls die Innenfeuchte und damit die Taupunktwahrscheinlichkeit bei kalten Aussentemperaturen.

[38] Beim FLIRT besteht die Aussenwand aus einem Aluminiumprofil auf das innen der offenporige, hydrophile Dämmstoff Basotect aufgeklebt ist. Kondensation entsteht zuerst an der Grenzfläche Aluminium / Dämmstoff (deren Temperatur praktisch der Aussentemperatur entspricht).

Kapitel 3, Teil 7: Auswirkung der Feuchtigkeit auf die Heizenergie (FLIRT, NINA)

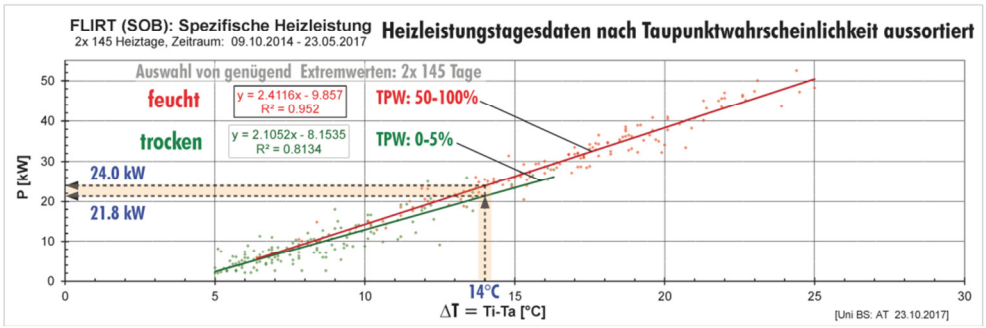
Heizenergieverlust durch feuchte Isolation (aus Messdaten)

Erklärung unserer Methode:



Erfassung aller Heiztagesdaten eines Fahrzeugs: Heizleistung, ΔT und TPW.

Tagesheizenergie = Tagesheizleistung x 24h



Finden von 2 Trendlinien für extrem feuchte und extrem trockene Heiztage.

Bei grösseren Temperaturdifferenzen erhält man daraus die Heizleistung für feuchte und trockene Isolation.

Projekt: Energieeffizienz von Heizung, Lüftung und Kühlung im ÖV Projektmeeting 03.11.2017 beim BAV (Beitrag Uni BS) nur für den internen Gebrauch Peter Oelhafen und Andreas Tonin: 03.11.2017 3 / 10

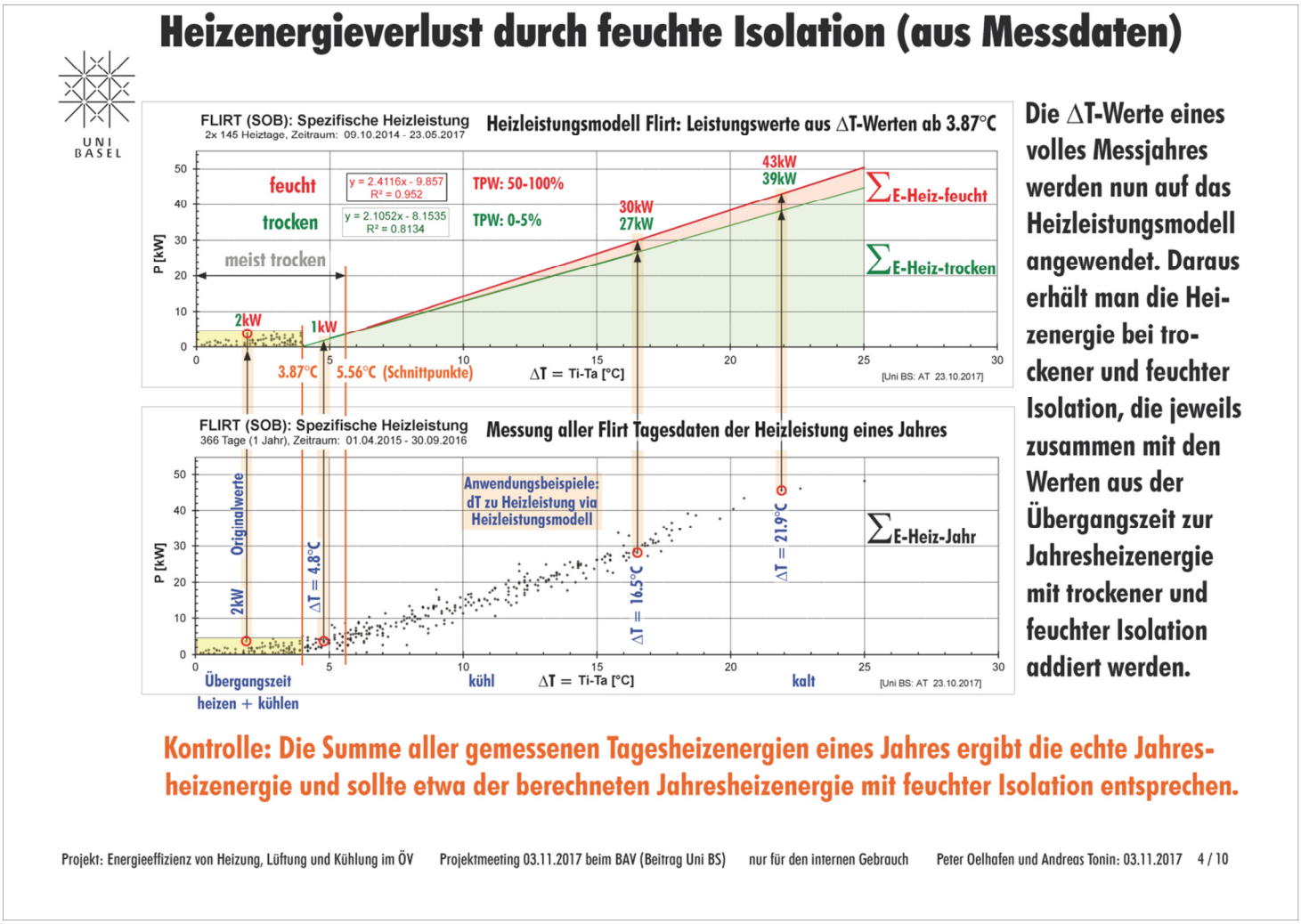
Folie 3 – Erklärung der Methode (Grundlage)

Die mittleren Tagesheizleistungen eines Fahrzeugs in Abhängigkeit zu den mittleren Temperaturdifferenzen (innen minus aussen) aufgetragen, ergeben das spezifische Heizleistungsdiagramm. Anhand der linearen Trendlinie lässt sich leicht ablesen wieviel Heizleistung bei einer bestimmten Temperaturdifferenz benötigt wird (oberes Diagramm).

Sortiert man nun die Heiztagesdaten nach der Taupunktwahrscheinlichkeit und bildet nur aus den extrem trockenen und feuchten Tagen je eine Gruppe aus genügend Tagen (100-150), dann erhält man 2 entsprechende Trendlinien unterschiedlicher Steigung. Die Trendlinie bei trockenen Heiztagen verläuft typischerweise flacher als die an sehr feuchten Heiztagen, da die Isolation im trockenen Zustand besser dämmt[39]. Jetzt können aus beiden Trendlinien bei einer Temperaturdifferenz (ΔT) der Heizleistungswert bei trockener und feuchter Isolation abgelesen werden (unteres Diagramm).

[39] Der feuchte Dämmstoff hat wegen der Wasseraufnahme eine höhere Wärmeleitfähigkeit und isoliert deshalb schlechter als im trockenen Zustand.

Kapitel 3, Teil 7: Auswirkung der Feuchtigkeit auf die Heizenergie (FLIRT, NINA)



Folie 4 – Simulation der Jahresheizenergie aus dem Heizleistungsmodell

Mit den beiden aus möglichst vielen Heiztagen gewonnenen Trendlinien kann nun ein Heizleistungsmodell für dieses Fahrzeug erstellt werden. Aus den ΔT-Tageswerten eines Messjahres können nun via diesem Modell die Heiztagesdaten bei trockener und feuchter Isolation herausgelesen und jeweils zu den unterschiedlichen Jahresenergiedaten aufsummiert werden.

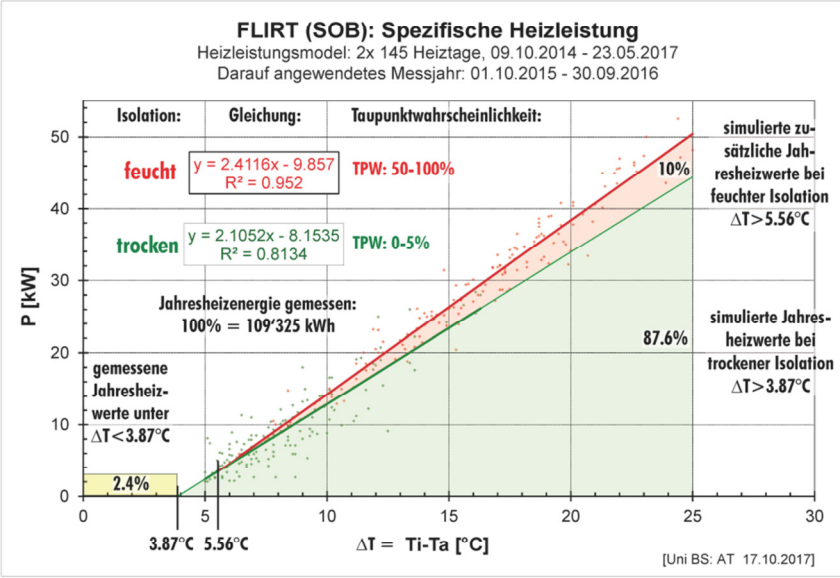
Zum Heizleistungsmodell muss noch folgendes beachtet werden:

Die gewonnenen Heizleistungswerte müssen mit 24 Stunden multipliziert werden um die Tages-Heizenergie zu erhalten. Erst ab dem Schnittpunkt beider Trendlinien (oberhalb 5.56°C im Beispiel) ergeben sich 2 unterschiedliche Leistungswerte für trockene und feuchte Mess-Tage. Unterhalb dieses Schnittpunktes bei 5.56°C ist es trocken und es gelten nur die Leistungswerte gemäss der Trendlinie für trockene Tage bis diese die Abszisse bei 0 kW schneidet. Darunter, in der sogenannten Übergangszeit (heizen und kühlen), werden die gemessen Tagesheizwerte direkt aufsummiert.
Zur Kontrolle vergleicht man zum Schluss die mit dem Heizleistungsmodel gewonnene Jahresheizenergie bei feuchter Isolation mit der gemessenen Jahresheizenergie. Die Qualität des Heizleistungsmodells spiegelt sich dann in der möglichst kleinen Abweichung der beiden Heizenergien (Modell- und Messwert).

Kapitel 3, Teil 7: Auswirkung der Feuchtigkeit auf die Heizenergie (FLIRT, NINA)

Abschätzung Heizenergieverlust durch feuchte Isolation (Flirt)

Um statistisch verlässliche Werte zu erhalten wurden 2 Trendlinien aus je 145 Heiztagen bei einer Taupunktwahrscheinlichkeit von 0-5% (kaum Kondensation) und 50-100% (viel Kondensation) bestimmt. Aus beiden Geraden kann ein linearisiertes spezifisches Heizleistungsmodell zusammengesetzt werden, mit dem man aus den gemessenen ΔT-Tagesdaten eines beliebigen Jahres die Tagesenergiewerte mit und ohne Kondensation erhält und dann getrennt aufsummieren kann.



Angewendetes Messjahr: 01.10.2015 - 30.09.2016.

Die gemessenen Heizenergiewerte unter ΔT=3.87°C wurden direkt summiert, darüber wurden sie an den beiden Geraden ausgerechnet und summiert. Die simulierte Jahresheizenergie (gelb+grün+rot) weicht erstaunlicherweise nur um 0.07% von der gemessenen Jahresenergie ab.

Durch die feuchte Isolation gehen übers Jahr etwa 10% Heizenergie verloren.

Projekt: Energieeffizienz von Heizung, Lüftung und Kühlung im ÖV Projektmeeting 03.11.2017 beim BAV (Beitrag Uni BS) nur für den internen Gebrauch Peter Oelhafen und Andreas Tonin: 03.11.2017 5 / 10

Folie 5 – Abschätzung des Heizenergieverlustes durch feuchte Isolation beim FLIRT

Hier wird das vorher beschriebene Heizleistungsmodell mit den ΔT-Daten eines vollen Messjahres (01.10.2015 – 30.09.2016) gefüttert und man erhält folgende Energieaufteilung:

In Zahlen sieht das anteilsmässig so aus (ausführliche Version):

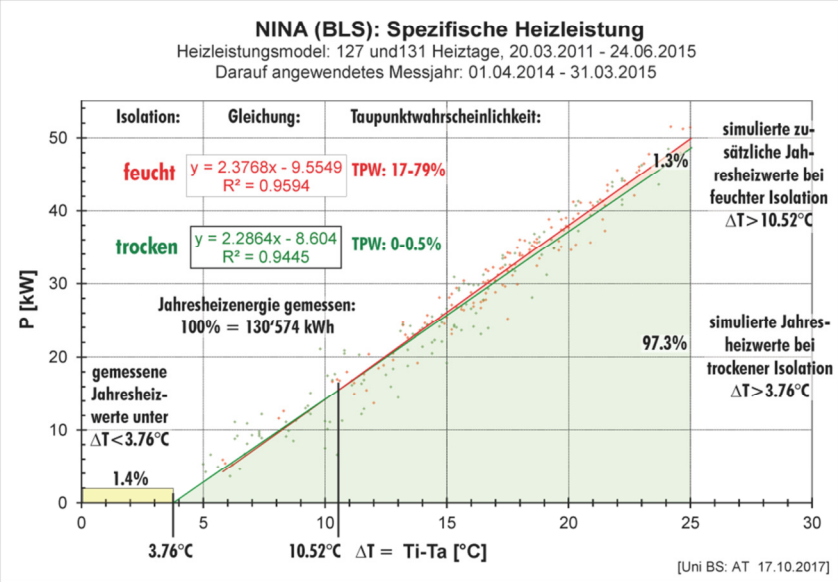
- Gemessene Jahresheizenergie (ohne Modell): 109‘324.8 kWh (100%)
- Energie unter ΔT = 0…3.87°C gemessen: 2‘599.2 kWh (2.4%)
- Energie feuchte Isolation über ΔT = 3.87°C: 106‘725.6 kWh (97.6%)
- Energie trockene Isolation über ΔT = 3.87°C: 95‘801.7 kWh (87.6%)
- Energie feuchte Isolation total: 109‘324.8 kWh (100%)
- Energie trockene Isolation total: 98‘400.9 kWh (90 %)
- Energieersparnis bei trockener Isolation: 10‘923.9 kWh (10%)

Beim FLIRT geht durch die feuchte Isolation übers Jahr etwa 10% Heizenergie verloren.

Kapitel 3, Teil 7: Auswirkung der Feuchtigkeit auf die Heizenergie (FLIRT, NINA)

Abschätzung Heizenergieverlust durch feuchte Isolation (Nina)

Die Messdaten für die Trendlinien stammen aus der Zeit vor der CO2-gesteuerten Zuluft, mit relativ starker Lüftung. Bei der Nina definieren 127 Heiztage bei einer Taupunktwahrscheinlichkeit von 0-0.5% die flachere Trendline (kaum Kondensation) und 131 Heiztage von 17-79% die steilere Trendlinie (viel Kondensation). Der Unterschied der Steigung beider Trendlinien ist sehr klein, was auf eine kleine Feuchtigkeit in der Wand schliessen lässt (Moniflex Isolation).



Angewendetes Messjahr: 01.04.2014 - 31.03.2015.

Es wurde gleich verfahren wie beim Flirt. Die simulierten Energiesummen mussten hier zwar um 3.25% nach unten angepasst werden, um mit der gemessenen Jahresheizenergie zu korrespondieren, was sich auf das Ergebnis jedoch kaum auswirkt.

Durch die feuchte Isolation gehen übers Jahr nur etwa 1.3% Heizenergie verloren.

Projekt: Energieeffizienz von Heizung, Lüftung und Kühlung im ÖV Projektmeeting 03.11.2017 beim BAV (Beitrag Uni BS) nur für den internen Gebrauch Peter Oelhafen und Andreas Tonin: 03.11.2017 6 / 10

Folie 6 – Abschätzung des Heizenergieverlustes durch feuchte Isolation beim NINA

Auch hier wird ein neu erstellte Heizleistungsmodell für ein volles Messjahr angewendet (01.04.2014 – 31.03.2015).

In Zahlen sieht das anteilsmässig so aus:

- Gemessene Jahresheizenergie (ohne Modell): 130‘574.4 kWh (100%)
- Energie feuchte Isolation total: 130‘574.4 kWh (100%)
- Energie trockene Isolation total: 128‘827.7 kWh (98.7%)
- Energieersparnis bei trockener Isolation: 1‘746.7 kWh (1.3%)

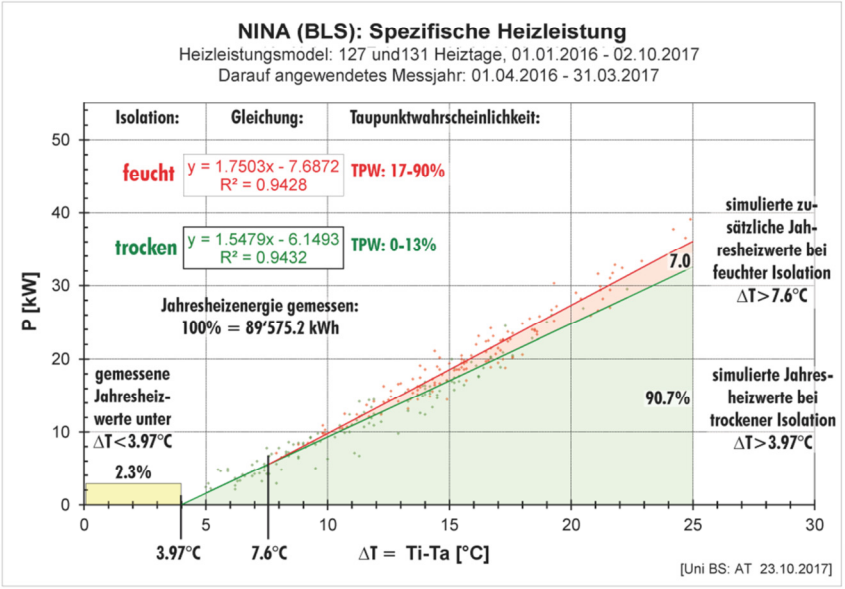
Beim NINA geht durch die feuchte Isolation übers Jahr nur etwa 1.3% Heizenergie verloren. Dies gilt für den Betrieb **ohne** CO_2-gesteuerte Zuluft!

Kapitel 3, Teil 7: Auswirkung der Feuchtigkeit auf die Heizenergie (FLIRT, NINA)

UNI BASEL

Abschätzung Heizenergieverlust durch feuchte Isolation (Nina)

Die Messdaten für die Trendlinien stammen aus der Zeit nach der CO2-gesteuerten Zuluft, mit reduzierter Lüftung. Bei der Nina definieren je 124 Heiztage bei einer Taupunktwahrscheinlichkeit von 0-13% die flachere Trendline (kaum Kondensation) und von 17-90% die steilere Trendlinie (viel Kondensation). Der Unterschied der Steigung beider Trendlinien ist viel grösser, was auf eine starke Zunahme der Feuchtigkeit in der Wand bei weniger Lüftung schliessen lässt (Moniflex).



Angewendetes Messjahr: 01.04.2016 - 31.03.2017.

Die simulierten Energien mussten um nur 0.5% nach oben angepasst werden. Wegen dem kürzeren Messzeitraum mit CO2-Regelung, ist das Ergebnis noch ungenau.

Durch die feuchte Isolation gehen übers Jahr nun etwa 7% Heizenergie verloren. Die CO2-Regelung spart trotzdem etwa 20% Heizenergie.

Projekt: Energieeffizienz von Heizung, Lüftung und Kühlung im ÖV Projektmeeting 03.11.2017 beim BAV (Beitrag Uni BS) nur für den internen Gebrauch Peter Oelhafen und Andreas Tonin: 03.11.2017 7 / 10

Folie 7 – Abschätzung des Heizenergieverlustes durch feuchte Isolation beim NINA

Hier wird ebenfalls ein neu erstelltes Heizleistungsmodell für ein volles Messjahr angewendet (01.04.2016 – 31.03.2017).

In Zahlen sieht das anteilsmässig so aus:

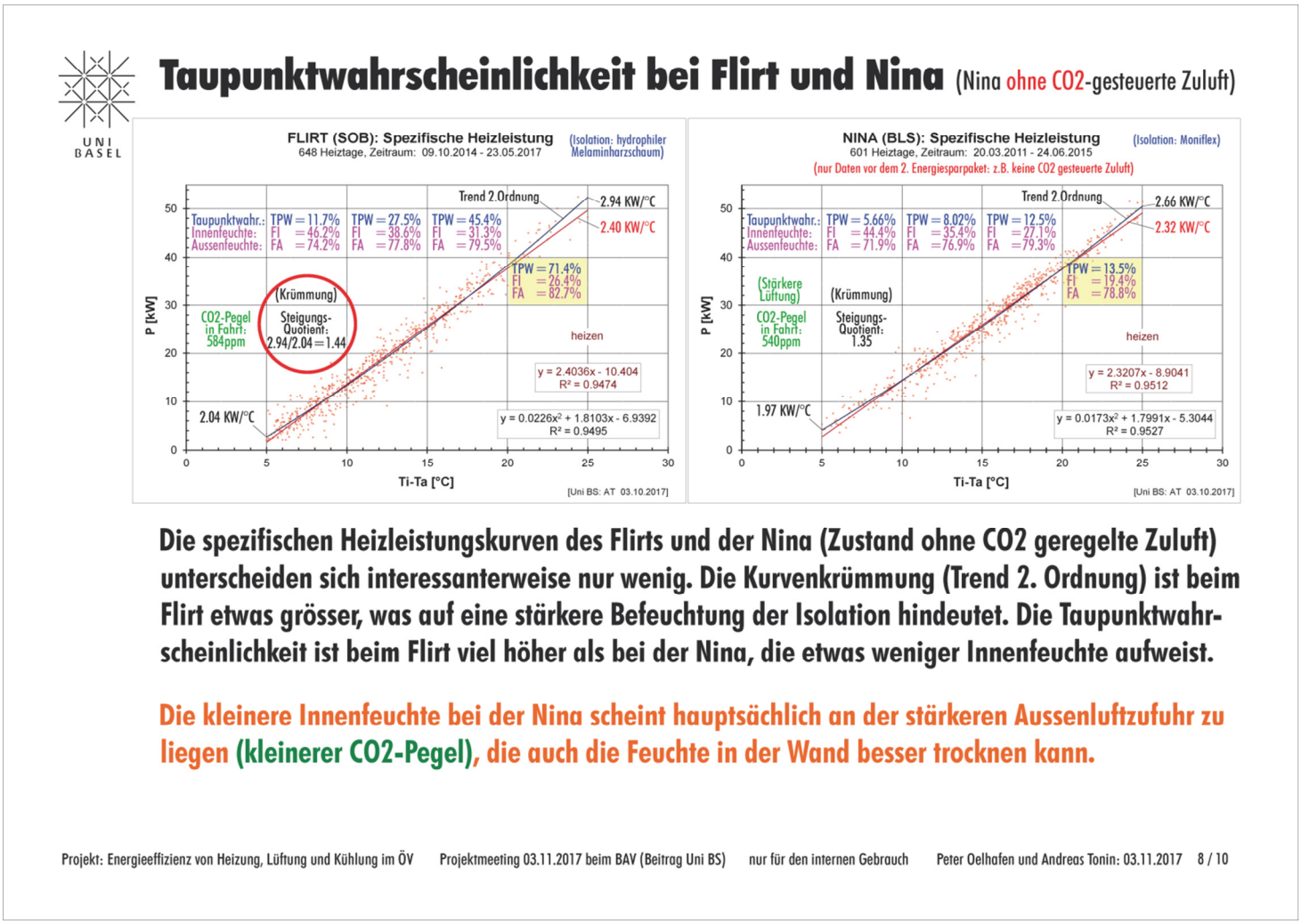
- Gemessene Jahresheizenergie (ohne Modell): 89‘575.2 kWh (100%)
- Energie feuchte Isolation total: 89‘575.2 kWh (100%)
- Energie trockene Isolation total: 83‘331.0 kWh (93 %)
- Energieersparnis bei trockener Isolation: 6‘244.2 kWh (7%)

Beim NINA geht durch die feuchte Isolation übers Jahr nun etwa 7% Heizenergie verloren. Dies gilt für den Betrieb **mit** CO_2-gesteuerter Zuluft!

Insgesamt spart die CO_2 Regelung immerhin 20% Heizenergie!

Auf den nächsten Folien wird gezeigt wie sich das Innenklima und die Taupunktwahrscheinlichkeit bei NINA und FLIRT unterscheiden.

Kapitel 3, Teil 7: Auswirkung der Feuchtigkeit auf die Heizenergie (FLIRT, NINA)



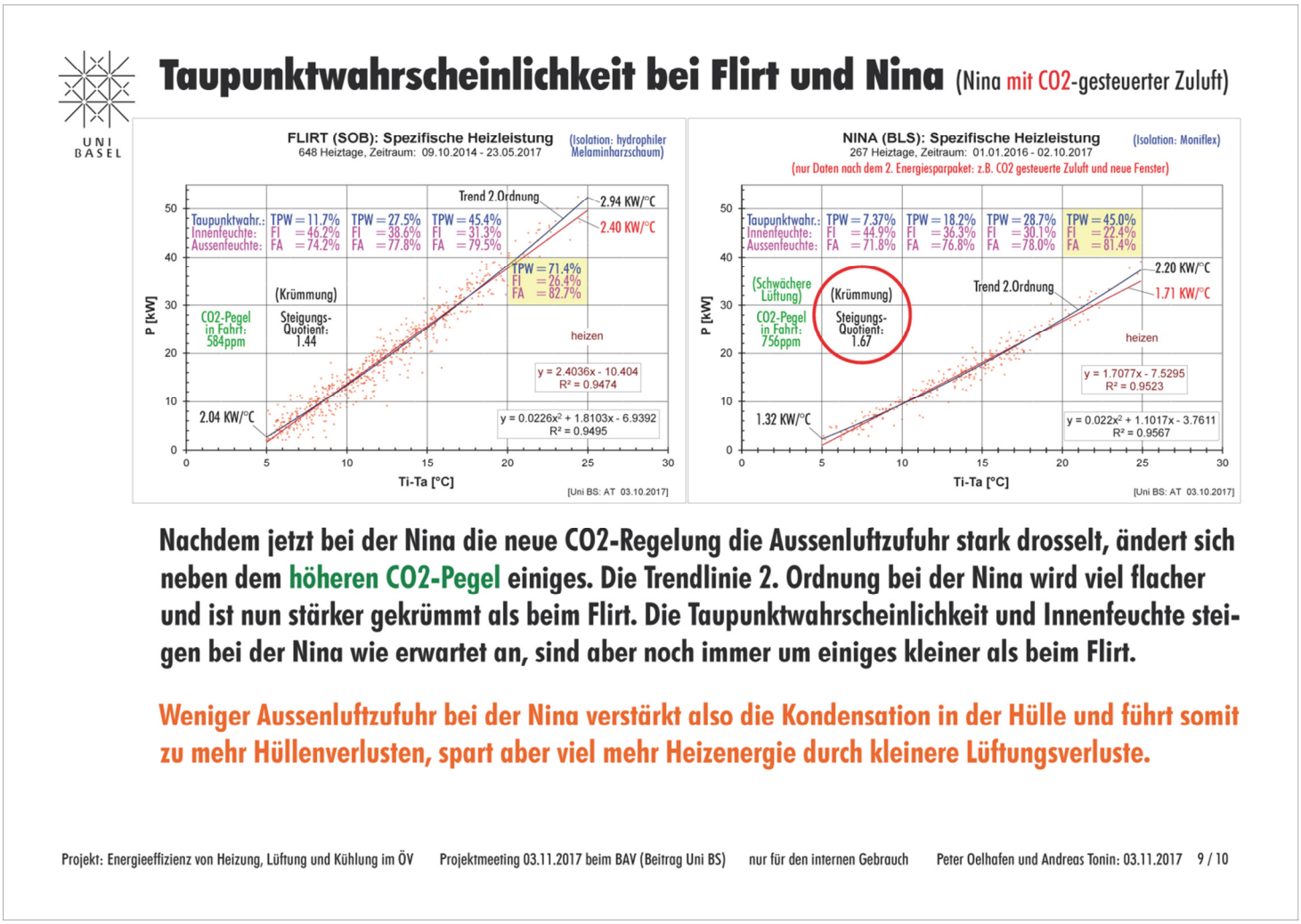
Folie 8 – Taupunktwahrscheinlichkeit bei FLIRT und NINA (NINA ohne CO_2 Regelung)

Zusätzliche Erklärung der verschiedenen Elemente in den obigen Diagrammen (Folien 8 – 10):

- Die Kurvenkrümmung des Trends 2. Ordnung (Parabel) der Messpunkte wird aus dem Quotienten der Kurvensteilheiten bei ΔT = 25°C und ΔT = 5°C ausgerechnet. Krümmt sich die Parabel stärker vergrössert sich dieser Wert, was auf mehr Feuchtigkeit in der Isolation hindeutet.
- Die Taupunktwahrscheinlichkeit (TPW), die Innen- und Aussenfeuchte (FI, FA) werden immer als Durchschnittswerte innerhalb eines ΔT-Bereiches von 5°C angegeben.
- Der CO_2-Pegel in Fahrt hängt nicht von ΔT (Ti-Ta) ab und sagt etwas über die Stärke der Lüftung und die Personenbelegung aus. Über längere Zeiträume ist die Personenbelegung bei einem Fahrzeugtyp nahezu konstant, weshalb man sagen kann: Je kleiner der mittlere CO_2-Pegel ist, desto stärker ist die Lüftung mit frischer Aussenluft.

Obwohl die Kurven von FLIRT und NINA sehr ähnlich aussehen, ist die Innenfeuchte und die Taupunktwahrscheinlichkeit im NINA wesentlich kleiner (stärkere Lüftung).

Kapitel 3, Teil 7: Auswirkung der Feuchtigkeit auf die Heizenergie (FLIRT, NINA)



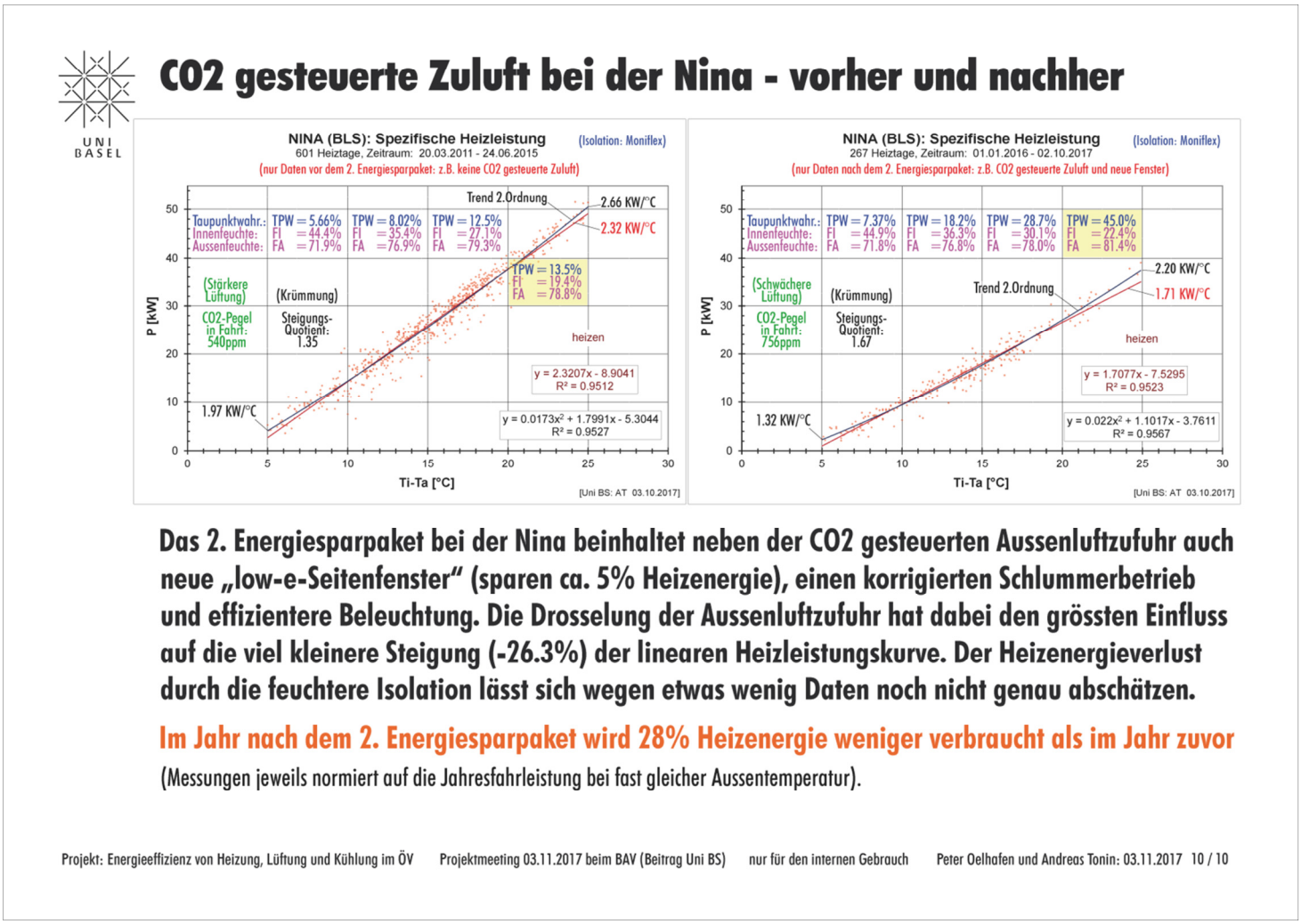
Folie 9 – Taupunktwahrscheinlichkeit bei FLIRT und NINA (NINA mit CO_2 Regelung)

Mit der CO_2-Regelung der Aussenluftzufuhr beim NINA wird die spezifische Heizleistungskurve viel flacher, was durch die reduzierte Lüftung enorm Heizenergie spart.

Durch die reduzierte Lüftung erhöht sich dafür beim NINA die Innenfeuchte und die Taupunktwahrscheinlichkeit in der Hülle, weshalb sich auch die Parabel der Trendlinie stärker krümmt.

Dass beim FLIRT (hydrophile Melaminharzschaum Isolation) die Innenfeuchte und die Taupunktwahrscheinlichkeit immer noch grösser als beim NINA (Moniflex Isolation) sind könnte an der unterschiedlichen Befeuchtbarkeit der beiden verbauten Isolationsmaterialien liegen.

Kapitel 3, Teil 7: Auswirkung der Feuchtigkeit auf die Heizenergie (FLIRT, NINA)



Folie 10 – CO_2 gesteuerte Zuluft beim NINA – vorher und nachher

Durch weniger Zuluft steigt neben dem CO_2-Pegel auch die Innenfeuchte und damit die Taupunktwahrscheinlichkeit in der Hüllenisolation an.
Auch auf der Folie 6 und 7 wurde beim NINA der prozentuale Heizenergieverlust durch die feuchte Isolation vor und nach der CO_2 Steuerung abgeschätzt. Dieser Verlust stieg von 1.3% (ohne CO_2-Steuerung) auf 7% (mit CO_2-Steuerung).
Insgesamt spart die Massnahme aber über 20% der Heizenergie ein und lohnt sich trotz den grösseren Hüllenverlusten.

Kapitel 3, Teil 7: Auswirkung der Feuchtigkeit auf die Heizenergie (FLIRT, NINA)

Fazit:

Kurzbeschreibung der beiden Fahrzeuge bezüglich Wärmedämmung und Lüftung:

Der FLIRT besitzt eine Wärmedämmung aus Melaminharzschaum (hydrophil, offenporig) in den Seitenwänden und ist mit einer gewichtsabhängigen 3-stufigen Aussenluftsteuerung unterwegs, welche meist konstant in der schwächsten Stufe läuft (Belegungsgewicht unter 33%).
Der NINA hingegen ist mit dem kaum hydrophilen Moniflex gedämmt und ist ab 2016 mit einer stufenlosen CO_2-Aussenluftsteuerung unterwegs, was über 20% an Heizenergie spart.

Mögliche Gründe für die Auffeuchtung der Wärmedämmung:

- Taupunktunterschreitung der feuchten Innenluft in der Wärmedämmung
- Wasseraufnahme durch hydrophiles, offenporiges Material
- Mehr Passagiere lassen die Luftfeuchtigkeit ansteigen
- Feuchte Bekleidung bei Regenwetter
- Weniger Belüftung durch frische Aussenluft sorgt auch für mehr Innenfeuchtigkeit

Ergebnisse des Vergleiches zwischen dem FLIRT und der NINA (ohne CO_2-Lüftungs-Steuerung):

- Beide Fahrzeuge haben eine sehr ähnliche spezifische Heizleistungskurve
- Der mittlere CO_2-Pegel ist bei beiden Fahrzeugen ähnlich
- Die Innenfeuchte und die Taupunktwahrscheinlichkeit ist beim NINA viel kleiner
- Der relative Verlust durch feuchte Isolation ist beim NINA fast 8x kleiner als beim FLIRT

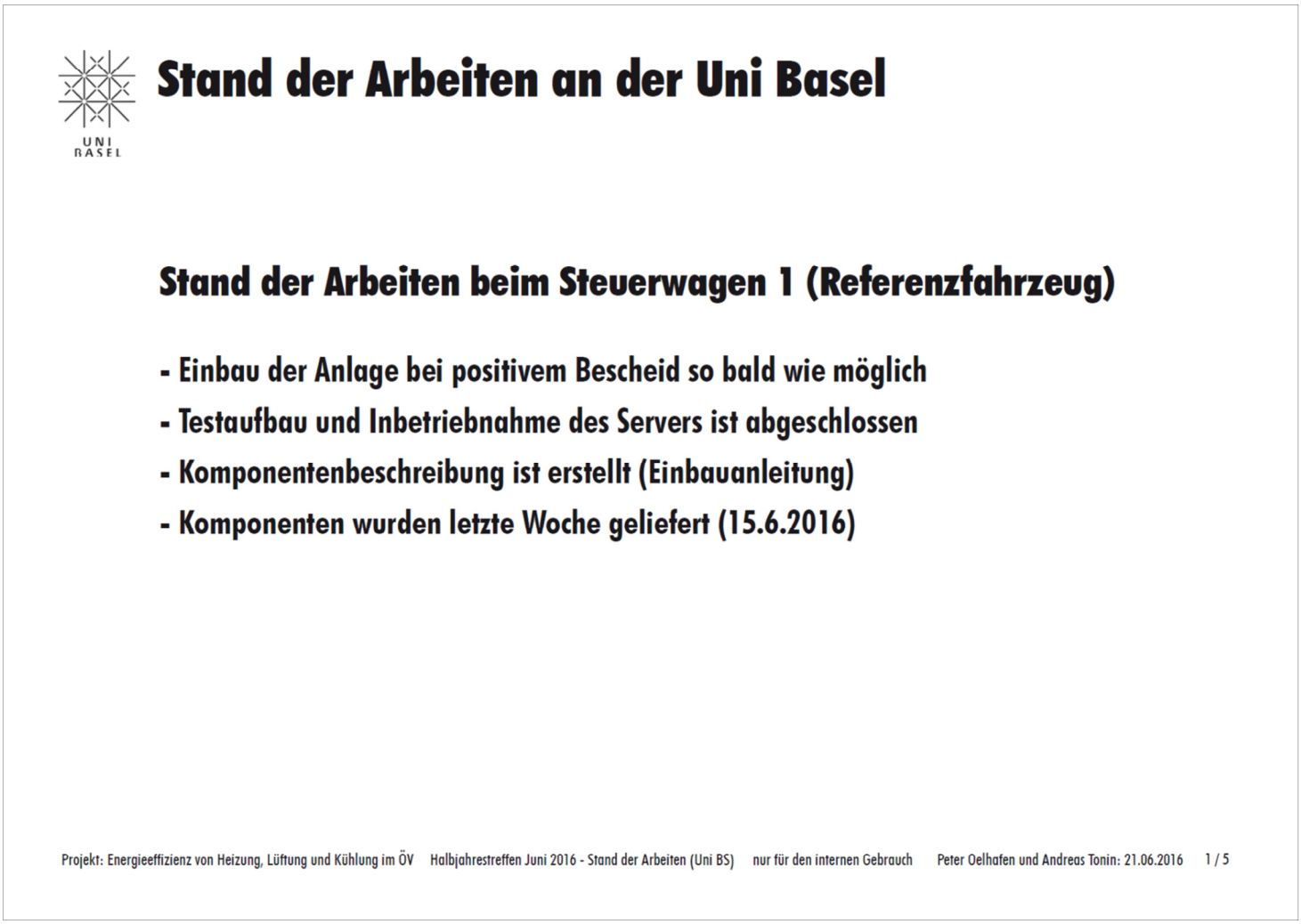
Ergebnisse des Vergleiches zwischen dem FLIRT und dem NINA (mit CO_2-Lüftungs-Steuerung):

- Die spezifische Heizleistungskurve beim NINA wurde um 26% flacher
- Der mittlere CO_2-Pegel ist beim NINA stark angestiegen
- Die Innenfeuchte und die Taupunktwahrscheinlichkeit ist beim NINA stark gestiegen
- Der rel. Verlust durch feuchte Isolation ist beim NINA nur noch 1.4x kleiner wie beim FLIRT.

Mit genügend Messdaten ist es also durchaus möglich einen Zusammenhang der Isolationsverminderung durch Kondensation und der zusätzlich benötigten Heizenergie herzustellen. Allerdings gelingt das nur bei isolierten Fahrzeugen bei denen auch Dämmmateriel vorhanden ist, welches nass werden kann. Ebenso muss die Komforteinrichtung sauber funktionieren, das heisst z.B. es darf nicht gleichzeitig geheizt und gekühlt werden. Die Variation der Fahrzeuglüftung in Abhängigkeit zur Aussentemperatur kann das Resultat verfälschen (z.B. steuerungsbedingte Lüftungsverminderung bei sehr tiefer Aussentemperatur um die Innentemperatur bei knapp bemessener Heizleistung zu halten). Das Trocknungsverhalten der Wärmedämmung konnte bei dieser Auswertung nicht berücksichtigt werden, da Feuchtemessungen in der Wand fehlen.
Genauere Messergebnisse der Wandfeuchtigkeit über die Zeit und den genauen Wärmefluss sollte das auf der nächsten Seite folgende Projekt der BFH liefern, da diese Werte direkt in der Innenwand eines Steuerwagens der RhB gemessen werden (Referenzfahrzeug und Fahrzeug mit besserer Wärmedämmung).
Das Refitvorhaben des BLS NINA 005 mit einer geschlossenporigen Wärmedämmung wird vermutlich zeigen, wie die Dämmung weniger feuchtigkeitsempfindlich und effektiver gemacht werden kann.[40]

[40] Potentialanalyse für Verbesserung der thermischen Isolation der Aussenhülle beim Gliederzug BLS RABe 525 NINA (BLS Bericht)

Kapitel 3, Teil 8: RhB Steuerwagen Referenzfahrzeug



Teil 8: Folie 1/5 – Stand der Arbeiten beim RhB Steuerwagen 1 (Referenzfahrzeug)
(21.06.2016)

Beim Projekt der Berner Fachhochschule in Biel (BFH)[41] sollen 2 Steuerwagen der RhB mit je 2 Messeinrichtungen ausgerüstet werden – eine von der DPUB. zur Erfassung von Energieverbrauchswerten und Messungen der relevanten Aussen- und Innenklimadaten und eine von der BFH mit speziellen Sensoren (Temperatur, relative Feuchtigkeit, Wärmeflüsse) zur Charakterisierung des Mikroklimas im Bereich der Wärmedämmung der Fahrzeughülle. Der erste Steuerwagen wird unverändert gelassen und ist das *Referenzfahrzeug* um das es in diesem Teil 3 geht. Das zweite Fahrzeug soll energetisch derart saniert werden, dass eine optimale Steigerung der Energieeffizienz beim Heizenergieverbrauch erreicht wird. Dabei sollen auch neue Dämmkonzepte und -Materialien evaluiert werden. Durch Verbrauchsanalysen der beiden Fahrzeuge wird es dann möglich sein, präzise Aussagen über die Steigerung der Energieeffizienz durch die verbesserte Fahrzeughülle machen zu können
In diesem Bericht wird der Bau der Basler Messeinrichtung anhand von 2 Vorträgen dokumentiert.

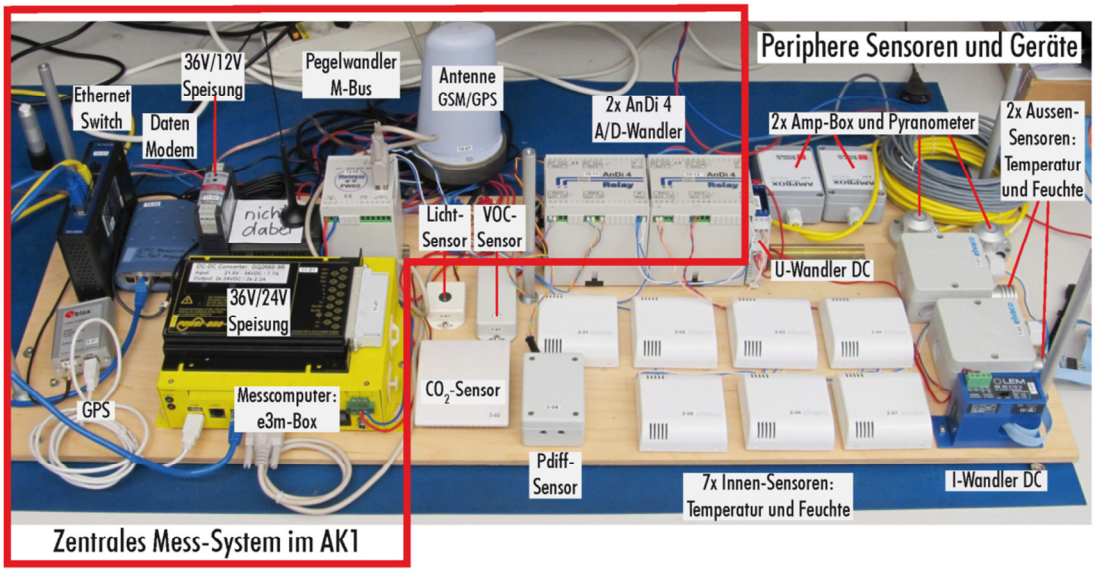
[41] Projekttitel: Reduzierung des Heizenergiebedarfs von Bahnfahrzeugen durch eine verbesserte Wärmedämmung der Fahrzeughülle

Kapitel 3, Teil 8: RhB Steuerwagen Referenzfahrzeug

Stand der Arbeiten beim Steuerwagen 1 (Referenzfahrzeug)

Testaufbau: Zentrales Mess-System

Im Testaufbau wurden alle Geräte für den Einsatz konfiguriert, das Zusammenspiel getestet und der Datenserver dafür eingerichtet.



Projekt: Energieeffizienz von Heizung, Lüftung und Kühlung im ÖV Halbjahrestreffen Juni 2016 - Stand der Arbeiten (Uni BS) nur für den internen Gebrauch Peter Oelhafen und Andreas Tonin: 21.06.2016 2 / 5

Folie 2/5 – Testaufbau Zentrales Mess-System

Komponenten der Messeinrichtung im Labor: Testaufbau zum Prüfen der Arbeitsweise aller Komponenten. Messcomputer, Innen- und Aussentemperatur- und Feuchtesensoren, CO_2 und VOC (volatile organic compounds) Sensoren, diverse Speisegeräte, GSM/GPS Antenne, Pyranometer zur Messung der Sonneneinstrahlung, Datenmodem, Lichtsensor (Fahrgastraum) sowie Differenzdrucksensor (*p*-innen - *p*-aussen) und DC-Strom- und Spannungswandler.
Die Komponenten zur Erfassung der Energieverbrauchswerte sind auf der folgenden Seite 67 abgebildet.

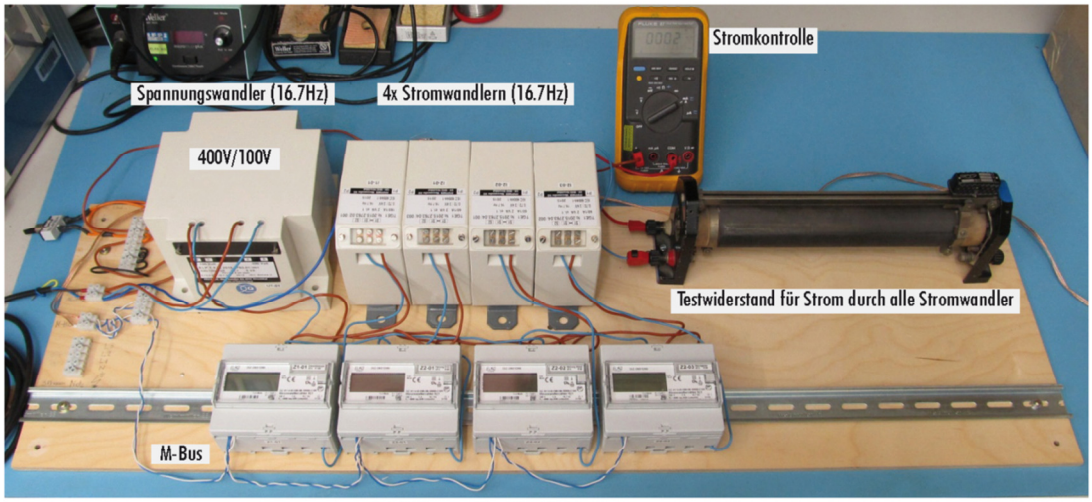
Kapitel 3, Teil 8: RhB Steuerwagen Referenzfahrzeug

UNI BASEL

Stand der Arbeiten beim Steuerwagen 1 (Referenzfahrzeug)

Testaufbau: AC-Energiemessung

Die 4 Energiezähler (mit M-Bus Auslesung) messen über 4 Stromwandler und einem gemeinsamen Spannungswandler die Gesamtenergie und 3 verschiedene Heiz-Energien.



4x DIZ Stromzähler (16.7Hz)

Projekt: Energieeffizienz von Heizung, Lüftung und Kühlung im ÖV Halbjahrestreffen Juni 2016 - Stand der Arbeiten (Uni BS) nur für den internen Gebrauch Peter Oelhafen und Andreas Tonin: 21.06.2016 3 / 5

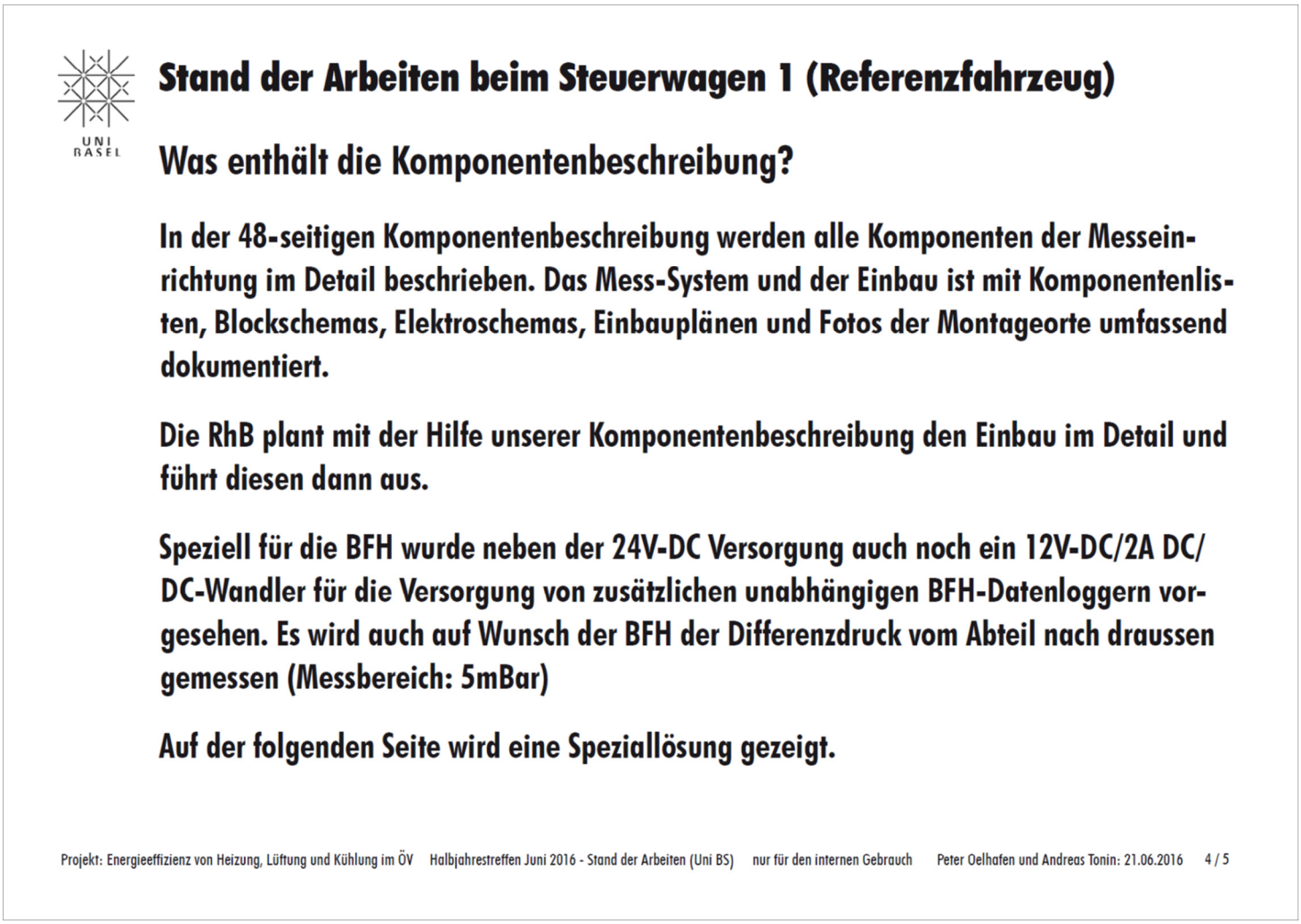
Folie 3/5 – Testaufbau AC-Energiemessung

Spannungswandler 16.7Hz 400V/100V, Stromwandler 16.7Hz, 4 DIZ (digitale Industrie-Stromzähler 16.7Hz). Der Testwiderstand dient der Prüfung der korrekten Messung von Leistung mit unterschiedlichen Strömen.
AC-Energiemesspunkte im Referenzfahrzug:

- Gesamtenergieverbrauch des Steuerwagens
- Konvektionsheizung Eingangs- und Gepäckbereich
- Konvektionsheizung Fahrgastabteil
- Registerheizung Fahrgastabteil (Lüftungsenergie über DC-Messung von Spannung und Strom)

Die Funktionalität der Messeinrichtung kann mit dem Labortestaufbau inklusive der Datenübermittlung mittels Datenmodem zum Datacenter getestet werden.

Kapitel 3, Teil 8: RhB Steuerwagen Referenzfahrzeug



Stand der Arbeiten beim Steuerwagen 1 (Referenzfahrzeug)

Was enthält die Komponentenbeschreibung?

In der 48-seitigen Komponentenbeschreibung werden alle Komponenten der Messeinrichtung im Detail beschrieben. Das Mess-System und der Einbau ist mit Komponentenlisten, Blockschemas, Elektroschemas, Einbauplänen und Fotos der Montageorte umfassend dokumentiert.

Die RhB plant mit der Hilfe unserer Komponentenbeschreibung den Einbau im Detail und führt diesen dann aus.

Speziell für die BFH wurde neben der 24V-DC Versorgung auch noch ein 12V-DC/2A DC/DC-Wandler für die Versorgung von zusätzlichen unabhängigen BFH-Datenloggern vorgesehen. Es wird auch auf Wunsch der BFH der Differenzdruck vom Abteil nach draussen gemessen (Messbereich: 5mBar)

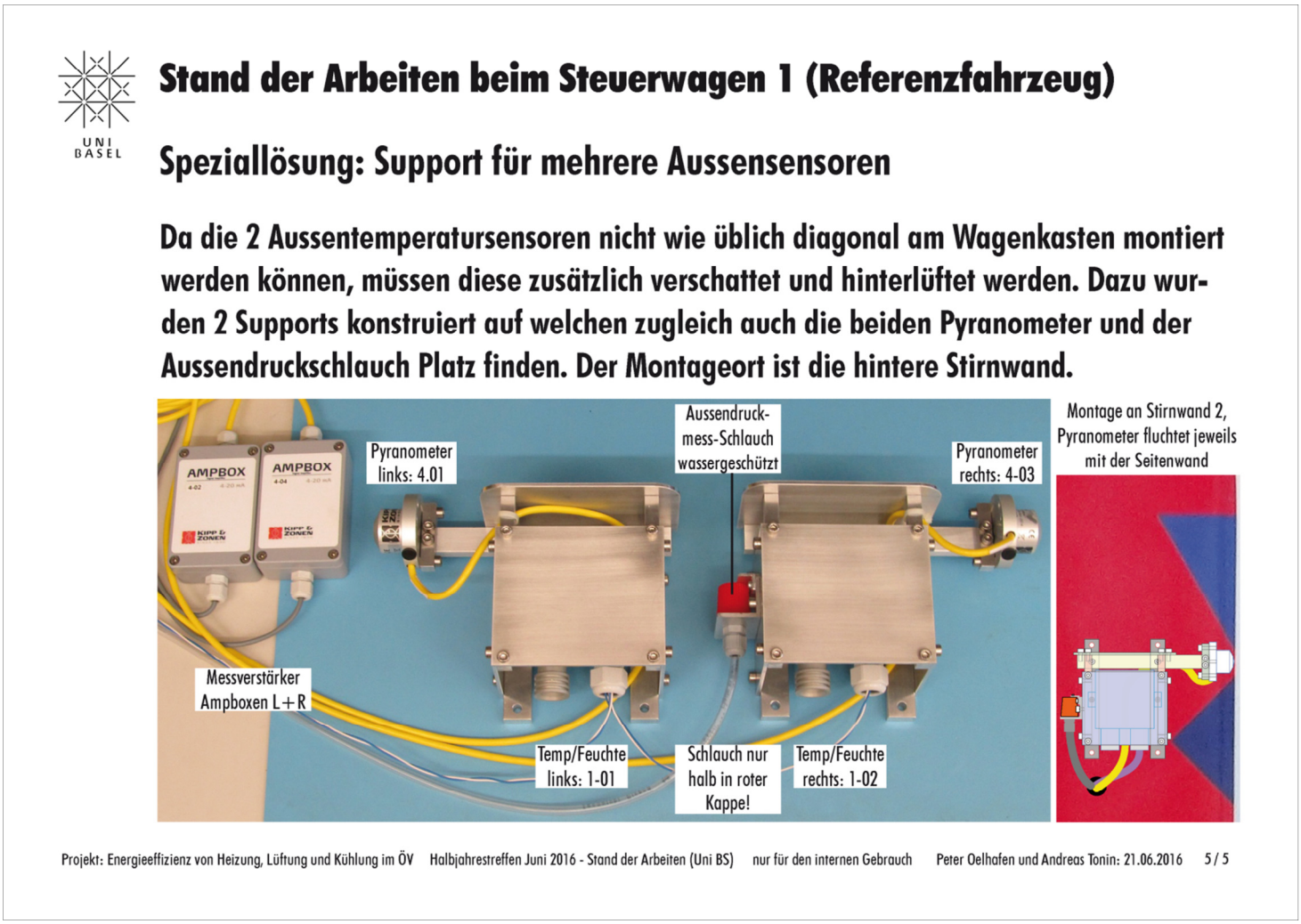
Auf der folgenden Seite wird eine Speziallösung gezeigt.

Projekt: Energieeffizienz von Heizung, Lüftung und Kühlung im ÖV Halbjahrestreffen Juni 2016 - Stand der Arbeiten (Uni BS) nur für den internen Gebrauch Peter Oelhafen und Andreas Tonin: 21.06.2016 4 / 5

Folie 4/5 – Komponentenbeschreibung

Zu jeder Messeinrichtung erstellen wir eine sogenannte Komponentenbeschreibung die alle Informationen zuhanden der Transportunternehmen zum Einbau der jeweiligen Messeinrichtung enthält.

Kapitel 3, Teil 8: RhB Steuerwagen Referenzfahrzeug



Folie 5/5 – Speziallösung zur kombinierten Befestigung von Aussensensoren

Zu den Aussensensoren gehören zwei Pyranometer zur Messung der auf die Fenster auftreffende Solarstrahlung (in W/m^2) sowie zwei kombinierte Temperatur/Feuchte Sensoren. Da die Aussentemperatur einen wichtigen Klimaparameter darstellt wird diese Grösse mit zwei Sensoren erfasst. Dies ermöglicht meistens eine Montage an den Stirnwänden eines Fahrzeugs so dass immer mindestens ein Sensor nicht direkt von der Sonne beschienen wird. Verwendet wird in diesen Fällen nur der Messwert mit der tieferen Temperatur. Im vorliegenden Fall wurden die zwei Temperatur/Feuchte Sensoren zusätzlich mit Gehäusen vor der direkten Sonnenbestrahlung geschützt, da diese auf der gleichen Stirnwand montiert werden mussten.

Die Bilder auf der obigen Folie zeigen die von uns gefertigten Gehäuse zu Positionierung der zwei Temperatur/Feuchte Sensoren, der beiden Pyranometer (senkrecht zu den Seitenwänden nach aussen gerichtet) und ferner einen Aussendruck-Schlauch zur Messung der Luftdruckdifferenz innen-aussen. Die zwei Ampboxen (Speisung und Messverstärker der Pyranometer) werden im Innern des Fahrzeugs montiert.

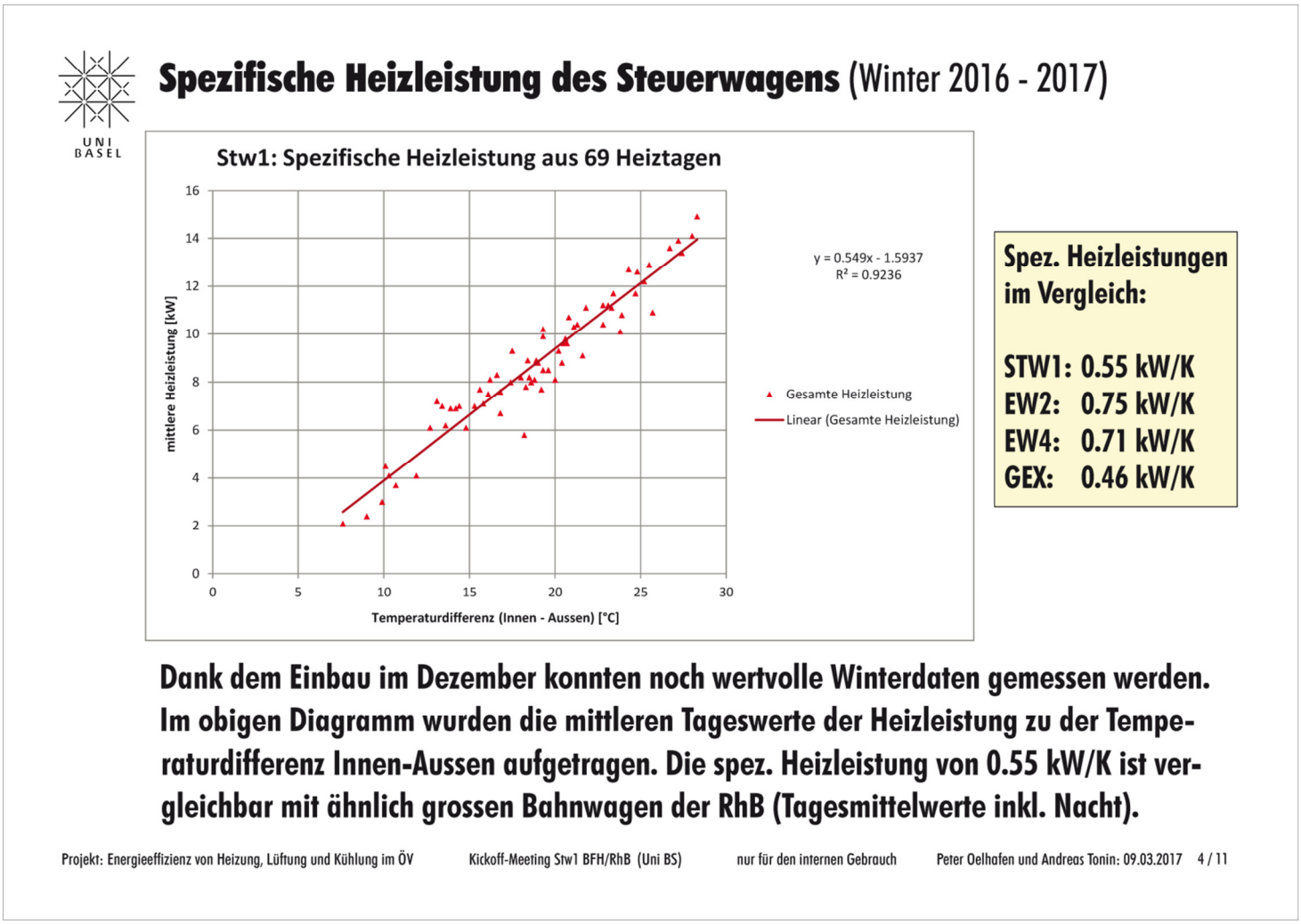
Kapitel 3, Teil 8: RhB Steuerwagen Referenzfahrzeug



Folie 3/11 – Einbau der Messeinrichtung im Steuerwagen BDt 1758 (Referenzfahrzeug)

Die Messeinrichtung wurde im Dezember 2016 durch die RhB in das Fahrzeug eingebaut. Die in der Folge gemachten Datenanalysen zeigten ein korrektes Arbeiten der Messsysteme. Für die BFH wurde ein Konto auf dem Datenserver eingerichtet und eine Anleitung erstellt.

Kapitel 3, Teil 8: RhB Steuerwagen Referenzfahrzeug

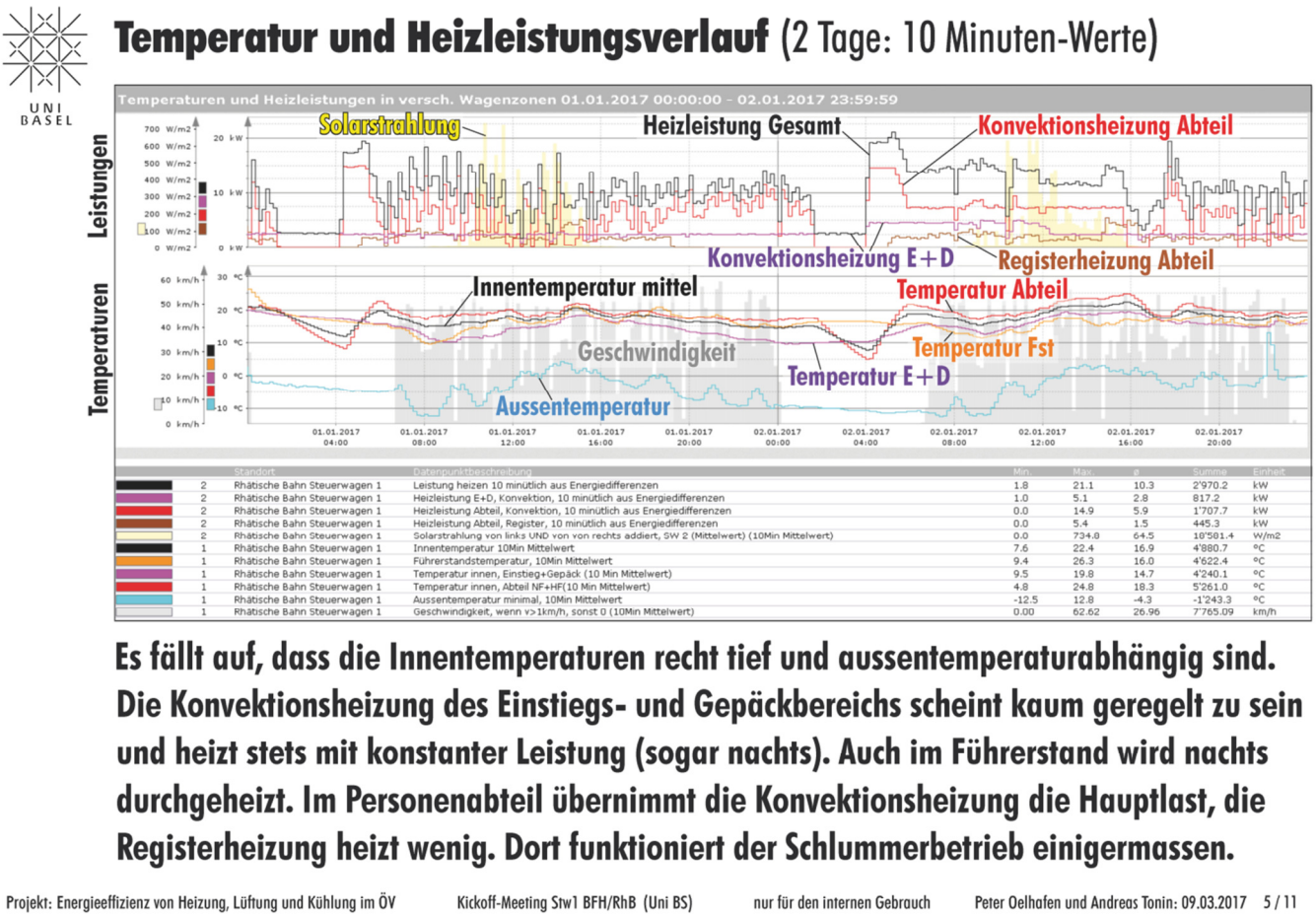


Folie 4/11 – Spezifische Heizleistung des Steuerwagens (Winter 2016 - 2017)

Das obige Diagramm zeigt die spezifische Heizleistung. Die lineare Trendlinie zeigt wie die Heizleistung auf eine Zu- oder Abnahme der Temperaturdifferenz „$\Delta T = T_{innen} - T_{aussen}$“ zur Erhaltung der Solltemperatur T_i reagiert.

Gelb hinterlegte Box rechts des Diagramms: Spezifischen Heizleistungen einiger Fahrzeuge der RhB im Vergleich. Der Steuerwagen liegt im Mittelfeld bezüglich der benötigten Heizleistung verglichen mit ähnlich grossen Personenwagen der RhB.

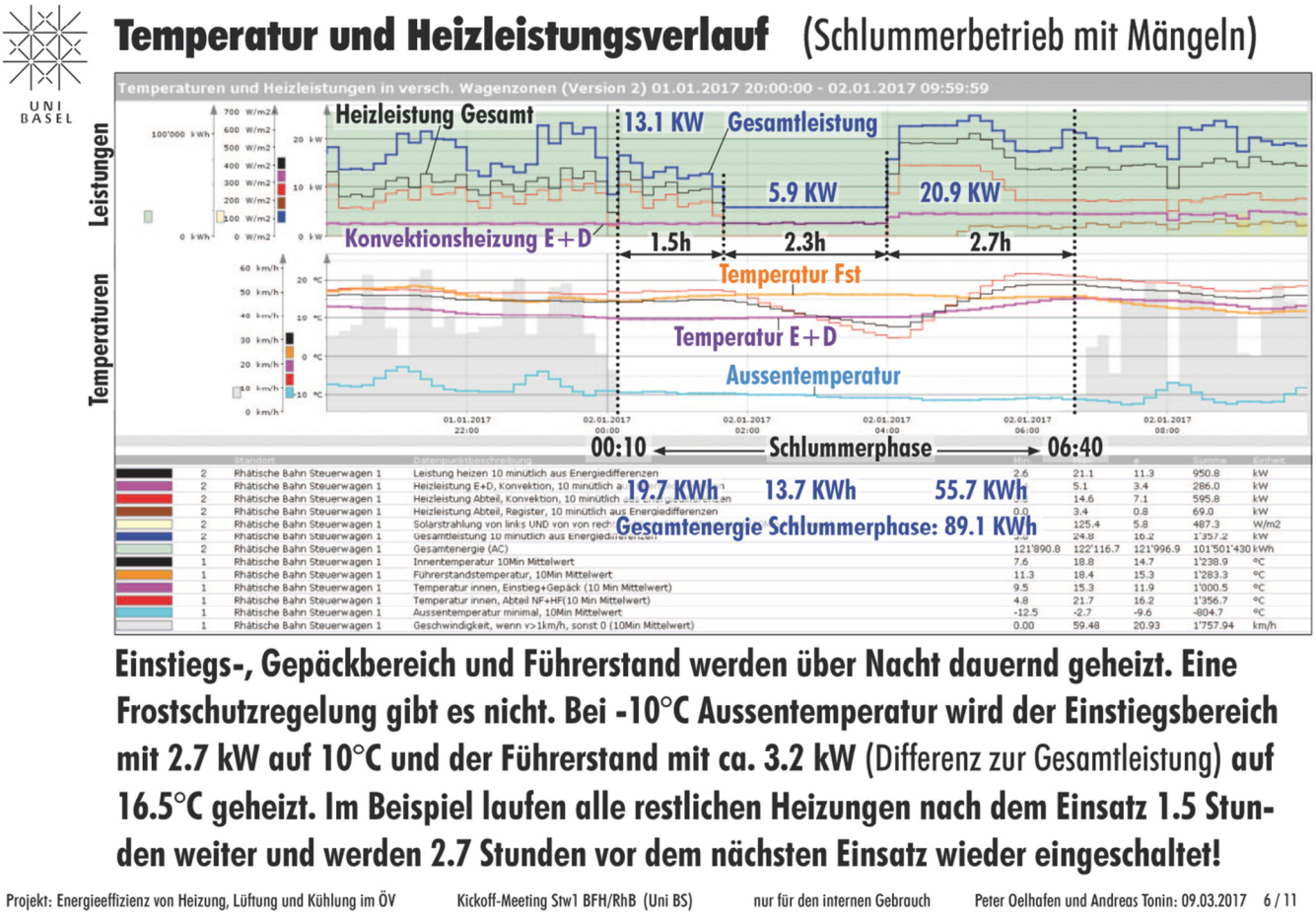
Kapitel 3, Teil 8: RhB Steuerwagen Referenzfahrzeug



Folie 5/11 – Temperatur und Heizleistungsverlauf des Steuerwagens

Ein Zeitdiagramm über 2 Tage mit den Heizleistungen, der Aussentemperatur und den verschiedenen Innentemperaturen gibt einen Überblick. Die Temperatur wird nur in den Abteilen und dem Führerstand geregelt.

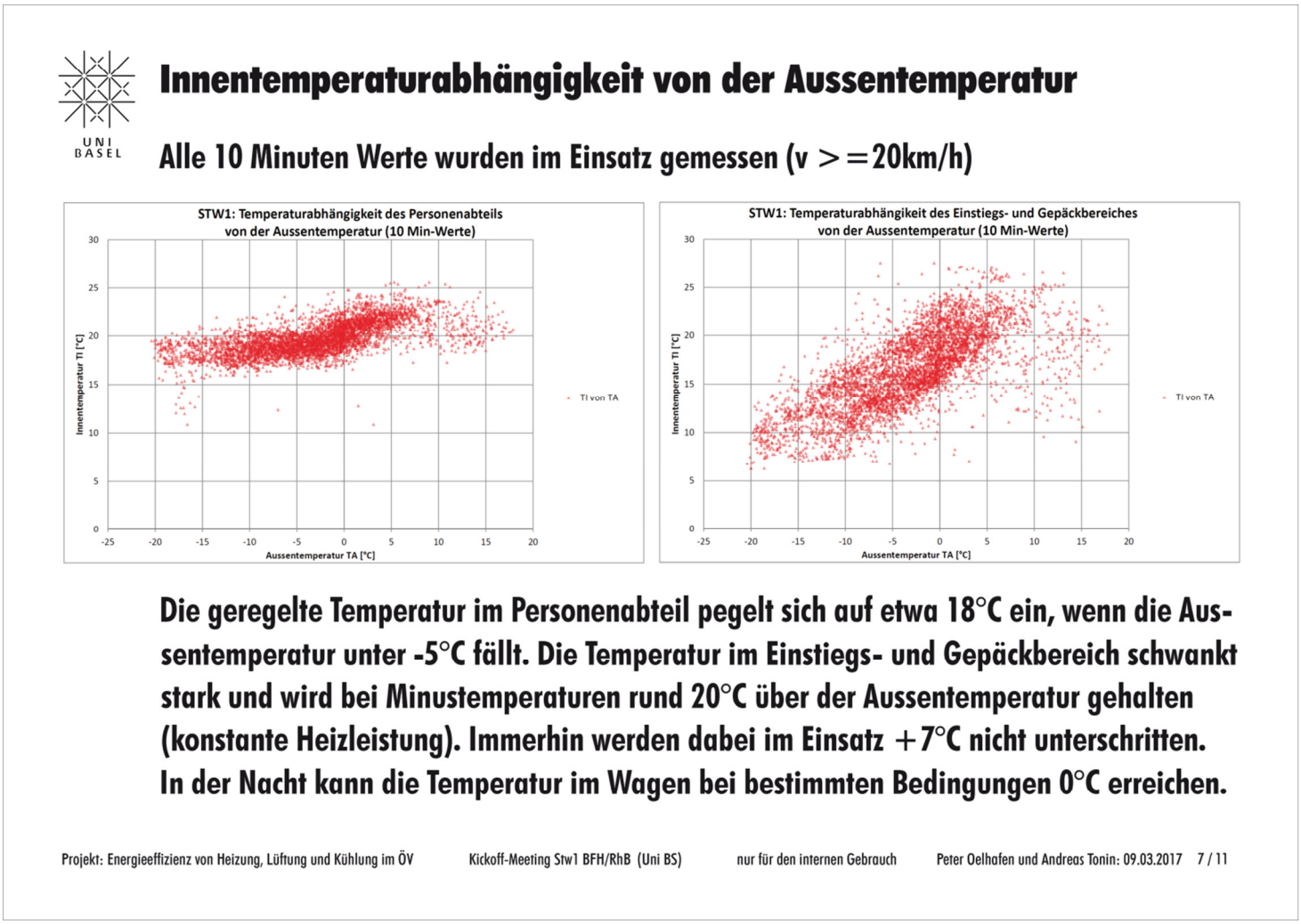
Kapitel 3, Teil 8: RhB Steuerwagen Referenzfahrzeug



Folie 6/11 – Kontrolle des Schlummerbetriebs beim Steuerwagen

Der nächtliche Schlummerbetrieb zeigt Mängel. Im Einstiegsbereich (10°C) und im Führerstand (16.5°C) wird während der Nacht durchgeheizt und die restlichen Heizungen haben eine lange Nachlauf- und Vorheizzeit.

Kapitel 3, Teil 8: RhB Steuerwagen Referenzfahrzeug



Folie 7/11 – Innentemperaturabhängigkeit von der Aussentemperatur

Zwei Plots von Innentemperaturwerten in Abhängigkeit von der Aussentemperatur (10 Minuten-Werte) zeigen die relativ gute Temperaturstabilisierung in den Abteilen und den ungeregelten Dauerheizbetrieb im Einstiegsbereich.

Damit später das zweite besser isolierte Fahrzeug mit dem Referenzfahrzeug verglichen werden kann, darf am Heizmanagement nichts verändert werden!

Kapitel 4: Fazit des vorliegenden Schlussberichts

Teil 1:
Die umfangreichen Messeinrichtungen erlauben eine ständige Langzeiterfassung des aufgeschlüsselten Energieverbrauchs der Fahrzeuge und den klimatischen Bedingungen unterwegs. Die Daten zeigen den Ist-Zustand der teils recht unterschiedlichen Fahrzeuge, was den direkten Vergleich etwas erschwert. Durch die Messungen kann ein unnötig hoher Energieverbrauch identifiziert werden (Bsp. Gegenheizen beim ICN Klimagerät), um daraus massgeschneiderte Energiesparmassnahmen abzuleiten.

Teil 2:
Am Beispiel des FLIRTs wird die Wirksamkeit verschiedener Energiesparmassnahmen anhand der Mess- und Klimadaten geprüft. Mit den gemessenen Daten lassen sich mittels physikalischer Zusammenhänge einfache Jahressimulationen durchrechnen. Es zeigt sich, dass der Aufwand und der Nutzen der Massnahmen nicht immer in einem vernünftigen Verhältnis stehen. Besonders wirkungsvoll sind umfassende Energiesparmassnahmen in Parkstellung des Fahrzeugs.

Teil 3:
Da es bisher noch nicht möglich war den Heizenergieverlust durch geöffnete Türen eines Fahrzeuges im Einsatz zu messen, wurde eine innovative statistische Methode entwickelt um den Energieverlust aus den Messdaten von 5‘400 Heizstunden des St4 Trolleybus zu extrahieren. Das Ergebnis zeigt, das beim Bus nur 15% der Heizenergie durch die Türöffnung und 85% durch die nicht gedämmte Hülle und die Lüftung verloren geht. Dabei hat sich gezeigt, dass der Türverlust durch die Wärmeabgabe der Passagiere mehr als kompensiert wird und deshalb bei langer Türöffnung und damit mehr Passagieren weniger geheizt werden muss. Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit durch die geöffneten Türen beträgt etwa 0.2 m/s.

Teil 4:
Am Beispiel des NINA 006 konnte gezeigt werden wie die Heizenergie mit 2 realisierten Verbesserungs-Paketen um 47% gesenkt wurde. Die wichtigsten Massnahmen waren dabei der Schlummerbetrieb und die CO_2 gesteuerte Aussenluftzufuhr. Nun soll beim NINA 005 durch den Einbau einer besseren Wärmedämmung nochmals gut 20% Heizenergie eingespart werden.

Teil 5:
Der Schlummerbetrieb in Parkstellung ist bei den meisten modernen Fahrzeugen realisiert. Dabei wird vor allem beim Heizen, Kühlen und Lüften viel Energie gespart (20-25%). Neu ist nun die Idee der BLS bei gewissen Bedingungen das Fahrzeug ganz vom Netz zu trennen und damit zusätzlich noch im gleichen Umfang Energie der Nebenverbraucher zu sparen.

Teil 6:
Der Versuch von tl bei ihrem Bus Heizenergie durch weniger Lüftung zu sparen brachte nichts, obwohl diese Massnahme normalerweise sehr gut funktioniert. Unsere Untersuchung zeigte, dass die Lüftung schon im Normalbetrieb sehr schwach ist und die kaum wärmegedämmte Wasserheizung und der Wasserkreislauf sehr ineffizient sind. Der Versuch wurde wieder rückgängig gemacht, da die Innentemperatur nicht mehr auf dem Sollwert gehalten werden konnte.

Teil 7:
Mit einer weiteren statistischen Auswertung von Heiztagesdaten konnte der schwierig nachweisbare Einfluss der Feuchtigkeit im Dämmmaterial auf die Heizenergie beim FLIRT und beim NINA abgeschätzt werden. Würde die bestehende Wärmedämmung trocken bleiben so könnten beim Flirt 10% und beim NINA 1.3% (ohne CO2-Steuerung) der Heizenergie eingespart werden. Beim NINA mit CO_2-Steuerung wurden gut 20% Heizenergie eingespart, aber durch die reduzierte Lüftung wird die Dämmung feuchter und es hätten zusätzlich noch 7% Heizenergie gespart werden können.

Teil 8:
In diesem Projekt der BFH soll konkret nachgewiesen werden was eine verbesserte Wärmedämmung bei einem von zwei Steuerwagen der BLS an Heizenergieeinsparung bringt. Dabei sollen im Einsatz die Feuchtigkeit der Dämmung und den Wärmefluss und durch die Wärmedämmung gemessen werden. Die Messdaten des umgebauten und des normalen Fahrzeuges erlauben einen sehr guten Vergleich. Beide Fahrzeuge sollen 1 Jahr lang möglichst auf der gleichen Strecke verkehren.

DANKE!
Die Autoren dieses Berichts (A.T. und P.O.) möchten sich bedanken für die Unterstützung unseres Projekts durch das BAV und möchten auch den Austausch mit allen Kollegen der assoziierten Institutionen, der HSLU, des LESO, der Empa und der BFH - Biel, verdanken.

Basel, 21. März 2018

Chapitre 4 : conclusions du présent rapport final

Partie 1 :
Les vastes dispositifs de mesure permettent de saisir en permanence et à long terme la consommation d'énergie, répartie entre les véhicules, et les conditions de climatisation en cours de route. Les données indiquent l'état effectif des véhicules, assez différents les uns des autres, ce qui complique la comparaison directe. Les mesures permettent de détecter une consommation d'énergie inutilement élevée (par ex. réchauffage par le climatiseur de l'ICN) afin d'en déduire des mesures individualisées d'économie d'énergie.

Partie 2 :
Les rames FLIRT servent à examiner l'efficacité de différentes mesures d'économie d'énergie à partir des données de mesure et des données climatiques. Les données mesurées permettent de calculer de simples simulations pour une année à l'aide des interactions physiques. Le coût et l'utilité des mesures ne présentent pas toujours un rapport raisonnable. De vastes mesures d'économie d'énergie sont particulièrement efficaces lorsque le véhicule est en position de garage.

Partie 3 :
Comme il n'était pas encore possible jusqu'ici de mesurer les pertes d'énergie de chauffage dues à l'ouverture des portes d'un véhicule, une méthode statistique innovante a été développée afin d'extrapoler les pertes d'énergie à partir des données mesurées durant 5400 heures de chauffage du trolleybus St4. Le résultat montre que seuls 15 % de l'énergie de chauffage se perdent du fait de l'ouverture des portes contre 85 % par le manque d'isolation du véhicule et par l'aération. La perte d'énergie due à l'ouverture des portes est plus que compensée par le dégagement de chaleur des passagers : lorsque les portes restent ouvertes longtemps et qu'il y a davantage de passagers, il faut moins chauffer. La vitesse moyenne des courants d'air dus aux portes ouvertes est d'env. 0,2 m/s.

Partie 4 :
La rame NINA 006 a permis de montrer que l'énergie de chauffage a pu être réduite de 47 % à l'aide de deux paquets d'optimisation. Les principales mesures étaient l'exploitation en mode veille et l'approvisionnement en air extérieur commandé par des capteurs de CO_2. Une nouvelle économie d'énergie de l'ordre de 20 % est prévue pour la rame NINA 005 grâce à une amélioration de l'isolation thermique.

Partie 5 :
La plupart des véhicules modernes disposent du mode veille en position de garage. Cela permet d'économiser beaucoup d'énergie de chauffage, de climatisation et d'aération (20-25 %). Le BLS a débranché totalement les véhicules lorsque certaines conditions étaient remplies, afin d'économiser encore 20-25 % de l'énergie utilisée par les équipements auxiliaires.

Partie 6 :
L'expérience des tl visant à économiser de l'énergie par une ventilation réduite ne s'est pas avérée concluante, bien que cette mesure fonctionne habituellement très bien. L'étude a montré que la ventilation était déjà très faible en exploitation normale et que le chauffage d'eau, de même que le circuit de l'eau, guère isolés sur le plan thermique, étaient particulièrement inefficients. L'essai a été abandonné, car la température-cible intérieure ne pouvait pas être maintenue.

Partie 7 :
Une nouvelle évaluation statistique des données recensées les jours de chauffage a permis d'estimer l'influence, difficile à attester, que l'humidité du matériel d'isolation a sur l'énergie de chauffage des rames FLIRT et NINA. Si l'isolation thermique restait sèche, on pourrait économiser 10 % d'énergie de chauffage pour les FLIRT et 1,3 % pour les NINA (sans commande par capteur de CO_2). Pour les NINA avec commande par capteur de CO_2, les économies d'énergie se sont chiffrées à 20 %, mais l'humidité de l'isolation est plus élevée du fait de la ventilation réduite ; ce point recèle un potentiel d'économie d'énergie de chauffage de 7 %.

Partie 8 :
Ce projet de la Haute école spécialisée de Berne (BFH) vise à prouver l'économie d'énergie de chauffage que permet une isolation thermique optimisée sur une voiture de commande du BLS. Il s'agit de mesurer l'humidité de l'isolation thermique et le flux de la chaleur dans le matériel isolant. Les données mesurées sur le véhicule optimisé et sur le véhicule normal permettent une très bonne comparaison. Les deux véhicules circuleront durant une année, autant que possible sur le même itinéraire.