

DAK-Demonstrator-Pilotprojekt zur Demonstration, Erprobung und Zulassung der Digitalen Automatischen Kupplung (DAK) für den Schienengüterverkehr

Aktenzeichen: E12 5185.4/9

Zwischenbericht Abschluss Phasen III & IV

Anhang 4: DB Systemtechnik: Prüfbericht Elektrischer Teil

Finanziert durch das Bundesministerium für Verkehr (BMV)



Bundesministerium
für Verkehr

Frankfurt, den 25.09.2025

Rev. 1.0





Systemtechnik

Bericht

Erprobung: Digitale Automatische Kupplung Phase III+IV

Elektrischer Teil

DAK-Dokument: 70992-05-DAK-Phase III+IV
Bericht: 70992-PB05-DAK Elektrischer Teil-V1.0

Datum: 01.09.2025
Seiten: 39
Auftragnehmer: DB Systemtechnik GmbH
Projektmanagement Prüfungen/TVP11
Pionierstraße 10
32423 Minden

Ansprechpartner: [REDACTED]



Die Inhalte beziehen sich ausschließlich auf die in diesem Dokument beschriebenen Sachverhalte. Das Recht zur (auszugsweisen) Weitergabe sowie Vervielfältigung dieses Dokuments, Verwertung und Mitteilung seines Inhalts kann, durch den diesem Dokument zugrundeliegenden Vertrag, eingeschränkt sein. Alle Rechte für den Fall der Patent-, Gebrauchsmuster- oder Designeintragung vorbehalten.

D01692-40_V2

Änderungsindex

Version	Datum	Änderungsinhalte
1.0	01.09.2025	Erstausgabe

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Abkürzungen	4
Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis.....	6
Dokumentenübersicht.....	7
Quellenverzeichnis/Literaturverzeichnis	8
1 Angaben zum Auftrag.....	9
2 Angaben zum Bericht.....	10
3 Messung der Übergangswiderstände.....	11
3.1 Auffälligkeit und nicht vollständige Kontaktierung.....	11
4 Messung der Isolationswiderstände	12
4.1 Gesamtiolationswiderstand	14
4.2 Isolationswiderstand einzelner Leitungen eines Kupplungspaares.....	19
5 Fehlerschutz (Schutz vor indirekter Berührung)	21
5.1 Betrachtung von kapazitiven Effekten des Stromversorgungssystems.....	21
6 Basisschutz (Schutz vor direkter Berührung)	23
6 Stromversorgung.....	26
6.1 Eigenschaften erzeugter Spannung und Strom der Einspeisung	27
6.2 Verhalten der Spannungsversorgung während Messfahrten.....	31
7 Fazit	38
8 Unterschriften	39

Verzeichnis der Abkürzungen

Allgemeine Abkürzungen	
AC	Alternating Current (Wechselstrom)
DAK oder DAC	Digitale Automatische Kupplung für den Güterverkehr oder Digital automatic coupler for freight wagons
DC	Direct Current (Gleichstrom)
EFK	Elektrofachkraft
IMD	Insulation Monitoring Device (Isolationswächter)
IT-Netz	<i>Isolé Terre</i> Netz (ohne Erdpotentialsbezug)
USV oder UPS	Unterbrechungsfreie Stromversorgung oder Uninterruptible Power Source
THD	Total Harmonic Distortion
Gängige Abkürzungen werden im Abkürzungsverzeichnis nicht erläutert.	

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Gezielte Bewässerung einer Kupplungsstelle	13
Abbildung 2: Unterschiedliche Isolationswiderstände für alle Leitungen direkt vor und nach Bewässerung	14
Abbildung 3: Gesamtisolationswiderstand am 30.08.2023, ab 13:59:46 in Minden	15
Abbildung 4: Gesamtisolationswiderstand am 17.10.2023, ab 13:30:52 in Minden	15
Abbildung 5: Gesamtisolationswiderstand am 13.12.2023, ab 12:25:28 in Görlitz	16
Abbildung 6: Gesamtisolationswiderstand am 20.12.2023, ab 08:50:58 während der Fahrt	16
Abbildung 7: Gesamtisolationswiderstand am 29.01.2024, ab 09:09:00 während Fahrt zwischen ...	17
Abbildung 8: Gesamtisolationswiderstand am 19.02.2024 ab 8:11:42 während Fahrt.....	17
Abbildung 9: Gesamtisolationswiderstand am 19.02.2024, ab 15:19:13 während Fahrt.....	18
Abbildung 10: Gesamtisolationswiderstand am 21.02.2024, ab 06:56:03 während Fahrt.....	18
Abbildung 11: Isolationswiderstand Hauptkontakte	19
Abbildung 12: Isolationswiderstand Datenkontakte	20
Abbildung 13: IT-Netz: indirekte Berührung bei Erdschlussfehler (nicht ausreichender Isolationswiderstand)	21
Abbildung 14: Direkte Berührung einer Phase ohne Erdschluss in Leitungsanlage	23
Abbildung 15: Verlauf der Berührspannung an einer Phase am Ende des Zuges in Abh. der Wagenzahl ohne Erdschluss Leitungsanlage.....	24
Abbildung 16: Direkte Berührung einer Phase mit Erdschluss an L2	24
Abbildung 17: Berührungsspannung am offen liegenden DAK-PIN bei 1-fachem Erdschluss L2	25
Abbildung 18 Schematische Darstellung der Stromversorgung	26
Abbildung 19: Spannung zwischen L1 / L2 und dazugehörigem Strom.....	27
Abbildung 20: Spektralanalyse Strom	27
Abbildung 21: Leistung am Wechselrichter, exemplarische Messung während Messfahrt	28
Abbildung 22: Leistung am Wechselrichter, Exemplare Messung ohne USVs	29
Abbildung 23: Spannung, Strom und Leistungsfaktor am Wechselrichter, 1.2[kHz] Messfrequenz ..	30
Abbildung 24: Beispiel Messfahrt Deutschland (Februar 2024), in Teilstrecken	31
Abbildung 25: Strom bei Messfahrt 01.02.2024	32
Abbildung 26: Strom bei Messfahrt 01.02.2024, 50 Sek/Div	32
Abbildung 27: Ströme bei Messfahrt 01.02.2024, 10 Sek/Div	33
Abbildung 28: Ausgewählte Spannung und Strom bei Messfahrt 01.02.2024, 10 Sek/Div	33
Abbildung 29: Unterschiedliche Lokalisierung von Stromereignissen entlang der Zugbildung.....	34
Abbildung 30: Strompeaks und deren Einfluss auf die Spannung.....	34
Abbildung 31: Zeitbegrenzte Erhöhung des Stroms und deren Effekt auf Spannung	35
Abbildung 32: Ströme bei Messfahrt am 19.02.2024.....	36
Abbildung 33: Spannungen und Ströme bei Messfahrt am 20.02.2024.....	37

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Isolationswiderstand [MΩ] an der Kupplungsstelle zwischen Wagen H570 und Z376,
direkt vor und nach Bewässerung.....13

Dokumentenübersicht

Nr.	Abkürzung	Dokumentenbezeichnung	Quelle
1	[PB01]	70992-01-DAK-Phase III+IV - Manteldokument	DB ST
2	[PB02]	70992-02-DAK-Phase III+IV - Messtechnik	DB ST
3	[PB03]	70992-03-DAK-Phase III+IV - Zugfahrten, Rangieren, sonstige Erprobung	DB ST
4	[PB04]	70992-04-DAK-Phase III+IV - E-Kuppelversuche	DB ST
5	[PB05]	70992-05-DAK-Phase III+IV - Elektrischer Teil	DB ST
6	[PB06]	70992-06-DAK-Phase III+IV - Datenkommunikation	DB ST
7	[PB07]	70992-07-DAK-Phase III+IV - Nachschiebeversuche	DB ST
8	[PB08]	70992-08-DAK-Phase III+IV - Prüfstandsversuche Strömungseigenschaften	DB ST
9	[PB09]	70992-09-DAK-Phase III+IV - Akustikversuche	DB ST

1 Angaben zum Auftrag

Die Angaben zum Auftrag sind im Manteldokument [1] der Berichte zu finden.

2 Angaben zum Bericht

Dieser Bericht thematisiert die Ergebnisse der im Rahmen des Projekts Digitale Automatische Kuppelung (DAC4EU) in Phase III und IV entwickelten, eingebauten und getesteten Lösung. Die Konzipierung und technische Klärung wurden von TT.TVE322 übernommen, während TT.TVP242 für die Messungen und Protokollierung der für den elektrischen Teil relevanten Werte verantwortlich war. Eine ausführliche Beschreibung der Messtechnik sowie die Behandlung der während der Erprobung und Messfahrten erhobenen Daten ist im Dokument ‚70992-02-DAK-Phase III+IV – Messtechnik‘ [1] zu finden. Allgemeine Projektmerkmale sind im Manteldokument [2] zu finden.

In Phase II (bis ca. Mai 2023) wurde die Zugweite elektrische Versorgung der Güterwagen mit einer 100V_{DC} Versorgung konzipiert und getestet. Die Ergebnisse dieser Projektphase zeigten, dass die letzten Wagen eine unzulässig niedrige Spannung erhielten. Da die Leistung, die jedem Verbraucher auf dem Güterwagen zur Verfügung gestellt werden muss, nicht reduziert werden kann, wurde im zuständigen Arbeitskreis beschlossen, die Spannung zu erhöhen. Nach der Betrachtung verschiedener Varianten fiel die Wahl auf ein einphasiges 400V_{AC} IT-Netz für die Phase III und IV des Projektes. Dabei wurde besonders Wert auf die Einhaltung der IEC-Normen zum Schutz gegen elektrischen Schlag gelegt und ein Isolationsüberwachungsgerät (IMD) wurde installiert. Bereits vorhandene Komponenten wie Leitungen, Wagen- und Anschlussboxen konnten nach Kompatibilitätscheck mit der neuen Spannung weiterverwendet werden.

Ein IT-Netz hat keinen definierten Bezug zum Erdpotenzial und kann somit auch nach einem Isolationsfehler weiter in Betrieb bleiben. Um den Personenschutz als höchste Priorität zu gewährleisten, hat das Projekt entschieden, die Stromversorgung bei einer Unterschreitung des Isolationsniveaus von 50 [Ω] pro Volt (wie in DIN VDE 105-100 angefordert, entsprechend 20 [k Ω]) automatisch zu unterbrechen, obwohl dies nach DIN VDE 0100-410 [3] nicht normativ erforderlich ist.

Im Folgenden werden verschiedene Messergebnisse präsentiert, die für die Bewertung der ausgewählten technischen Lösung nützlich sind.

3 Messung der Übergangswiderstände

Im gekuppelten Zustand der Güterwagen soll der Übergangswiderstand der PIN-Kontaktherstellung eines gekuppelten Paares möglichst gering sein. Je größer der Widerstand, desto größer wird der Spannungsabfall entlang des Zuges, wodurch die Spannung im letzten Wagen möglicherweise nicht mehr im zulässigen Bereich zur Verfügung gestellt werden kann.

Für die Überprüfung dieses Widerstandswertes wurden an den Anschlusskästen beider gekuppelter DAKen alle Strom- und Datenleitungen vom Rest des Wagens abgeklemmt, sodass nur die Leitung zwischen diesen zwei Anschlusskästen und der Kontakt selbst gemessen wurden. Details zur angewendeten Messtechnik für die Prüfung sowie zur Kontrolle der niederohmigen Kontakte nach Kuppelungsvorgängen sind im Bericht der Messtechnik [1] detailliert beschrieben.

Im Vergleich zur Phase II wurden keine relevanten Änderungen im Durchgangswiderstand des gekuppelten Paares festgestellt. Obwohl Unterschiede zwischen den Herstellern merkbar sind, bleiben die gemessenen Werte an Kupplungen der Firma Voith und Dellner in einem Bereich zwischen 5 [mΩ] und 8 [mΩ], was als typischer Wert angesehen werden kann. Daher kann dieser Wert nicht nur für neue oder kurz benutzte Kupplungen erwartet werden, sondern auch als stabiler Wert über den Lebenszyklus hinweg angenommen werden. Während der Erprobungsphase konnten nur zwei Kupplungspaare der Firma Knorr-Bremse untersucht werden, bei dieser Variante wurden etwas höhere Werte (Faktor 3x) protokolliert, jedoch kann statistisch keine belastbare Auswertung erfolgen.

Für die Betrachtung ist es von Belangen, dass unterschiedliche Querschnitte für die Zuleitungen zwischen Kupplungsstelle und Anschlussbox bei den DAK-Modellen verwendet wurden (Knorr-Bremse in Vergleich zu den Anderen). Der Grund dafür ist die Anpassung der Versorgungsspannung zwischen Erprobungen in Phase II und III. Es ist zu erwarten, dass, wenn eine endgültige Anforderung erreicht ist, der Unterschied zwischen den Herstellern entfällt.

Zusätzlich wurde der (rein ohmsche) Widerstand des gesamten Stromkreises gemessen, wobei in einer maximalen Zugbildung von 21 Wagen und 36 DAKen (von drei Herstellern) ein Gesamtwiderstand der Zu- und Rückleitung (Leiter L1 + L2 in Reihe) von 1.19 [Ω] gemessen wurde.

Die inhärente Kapazität des Systems und deren Auswirkung wird in Kapitel 4 behandelt.

3.1 Auffälligkeit und nicht vollständige Kontaktierung

Nach dem Kuppelvorgang konnte nicht immer eine saubere Kontaktherstellung (vorletztes Design der Fa. Voith, sowohl Strom- als auch Datenkontakte) erreicht werden. Gelegentlich war der Stromkreis nicht nur hochohmig, sondern der geschlossene Kontakt hat sich auch ohne zusätzliche Bewegung oder externe Einflüsse wieder geöffnet. Seitliches Anstoßen (forcierte Bewegung in Richtung Y-Achse) gegen die Kupplungsstelle konnte das Problem lösen, wobei eine Änderung des Durchgangswiderstands vor und nach jedem Stoß immer wieder gemessen werden konnte. Dies ist ein Indiz für unzureichenden Anpressdruck auf beiden Seiten des Kontaktes. Mehr dazu im Bericht E-Kuppelversuche [4].

4 Messung der Isolationswiderstände

In einem als IT-Netz konzipierten Stromversorgungsnetz müssen nach der Norm IEC 60364-4 [3] Schutzmaßnahmen gegen elektrischen Schlag vorgesehen werden, darunter auch die Anbringung eines Isolationsüberwachungsgeräts (IMD).

Es wurde ein Isolationsüberwachungsgerät der Fa. Bender (IMD isoRW425) eingebaut, um die gesamte Isolation zu kontrollieren und bei Unterschreitung des Grenzwertes abzuschalten (mehr dazu in Kapitel 6 Stromversorgung). Nach einer automatischen Abschaltung (niedriger Isolationswiderstand) muss der Isolationsfehler durch geeignetes Personal gesucht und behoben werden, bevor das elektrische System weiter betrieben werden darf. In der Praxis kann dies einen großen Zeitaufwand mit sich ziehen.

Wie in [5] (Kap 1.4.4) erwähnt, wurde das System erweitert, um eine automatisierte Lokalisierung des Isolationsfehlers zu ermöglichen. Dafür wurde ein Isolationsüberwachungsmessgerät mit LC-Display iso685W-D-P (Bender) direkt am Spannungsversorgungspunkt gebracht und bis zu 8 Messpunkte mit Isolationsfehlersuchgerät EDS440W-L-4 und zugehörigen Messstromwandler direkt in verschiedenen Wagen eingebaut. Damit konnte nicht nur eine Minderung des Gesamt-Isolationswiderstands der Zugbildung detektiert werden, sondern auch gezielt der mögliche Bereich, in dem sich der Isolationsfehler im Zug befand, bestimmt werden.

Es wurde bestätigt, wie bereits in vorheriger Phase I und II festgestellt, dass Feuchtigkeit einen relevanten negativen Einfluss auf den Isolationswiderstand hat. Sowohl nach dem Wetter am Tag der Messfahrt als auch nach gezielter Bewässerung der Kupplung wurde eine Reduzierung des Isolationswiderstandes gemessen. Dieser Effekt kann kritisch für die Zuverlässigkeit der Stromversorgung während des Betriebs sein, da das IT-Netz bei der Unterschreitung des Minimalwertes von 50 [Ω /Volt] abgeschaltet wird.



Abbildung 1: Gezielte Bewässerung einer Kupplungsstelle

Sowohl in Tabelle 1 als auch in Abbildung 2 ist der Effekt von Feuchtigkeit auf den Isolationswiderstand der beiden Strom- und Datenleitungen dargestellt. Alle Werte sind zwischen Phase und Erde ermittelt.

Tabelle 1: Isolationswiderstand [$M\Omega$] an der Kupplungsstelle zwischen Wagen H570 und Z376, direkt vor und nach Bewässerung

Leitung	L1.1	L1.2	L2.1	L2.2	Daten1	Daten2	Daten3	Daten4
Vor	3000	3000	11	990	3000	3000	3000	3000
Nach	3000	3000	1,4	890	3000	3000	1400	1600

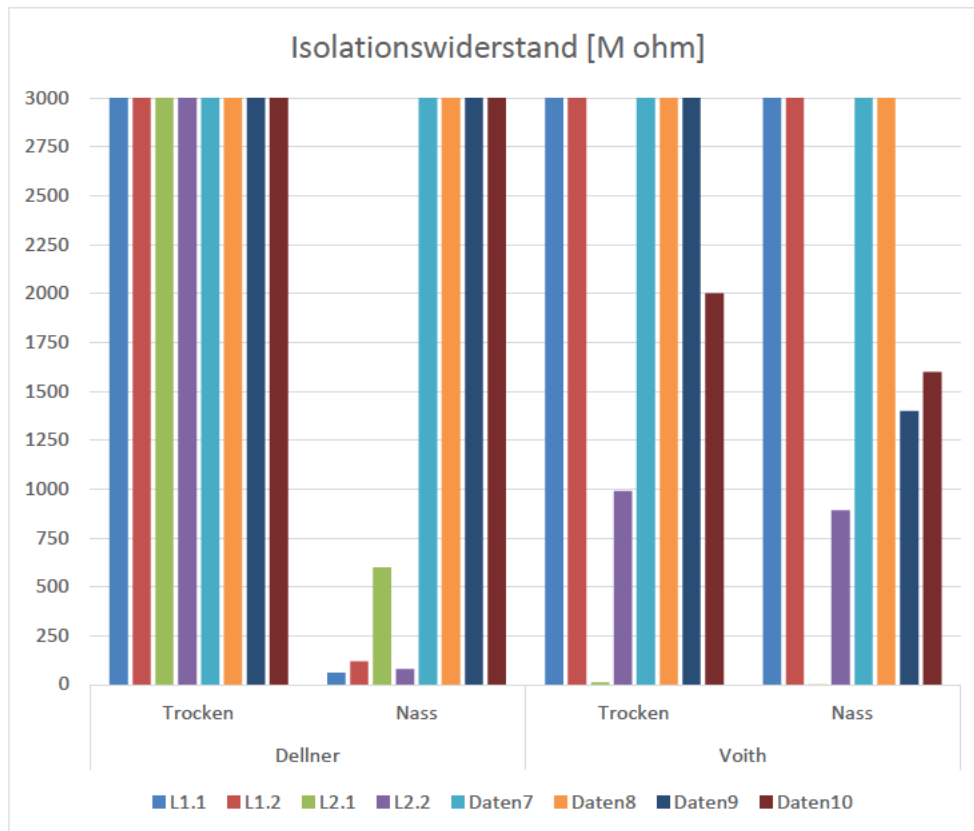


Abbildung 2: Unterschiedliche Isolationswiderstände für alle Leitungen direkt vor und nach Bewässerung

Bei der Interpretation des oben gezeigten Diagramms muss die schon intensive Erprobung der Kupplungen berücksichtigt werden, damit sind die Dichtungen nicht neuwertig, sondern wurden faktisch in einen betriebsnahen Zustand gebracht. Der im Laufe der Erprobung mechanische Abnutzungsgrad zwischen beiden Kupplungstypen ist nicht unbedingt gleich gewesen und es kann daher keine Auswertung im Sinne eines Vergleichs zwischen den Designs erfolgen. In beiden Fällen sind die Ergebnisse jedoch von Bedeutung und weisen auf den Vorteil einer entsprechenden technischen Verbesserung hin.

4.1 Gesamtisolationswiderstand

Während der Fahrt kann der Isolationswiderstand einzelner Kuppelstellen nicht gemessen werden, daher wird der Wert des Gesamtisolationswiderstandes durch das eingebaute Isolationsmessgerät kontinuierlich gemessen und protokolliert. Durch diese Messung erfolgt auch die Abschaltung der Stromversorgung, falls der minimale Isolationswert von 20 [kΩ] unterschritten wird.

Die Messung des Gesamtisolationswiderstands hat gezeigt, wie empfindlich das System ist: Die Werte sind sehr abhängig von der Zugbildung (Zustand einzelner DAKen) und der Witterung. Einige Resultate sind hier dargestellt, alle mit einer Messfrequenz von einem Messpunkt pro Sekunde (zeitlicher Verlauf in Sekunden dargestellt) ab dem angegebenen Datum sowie Zeit des Messbeginns.

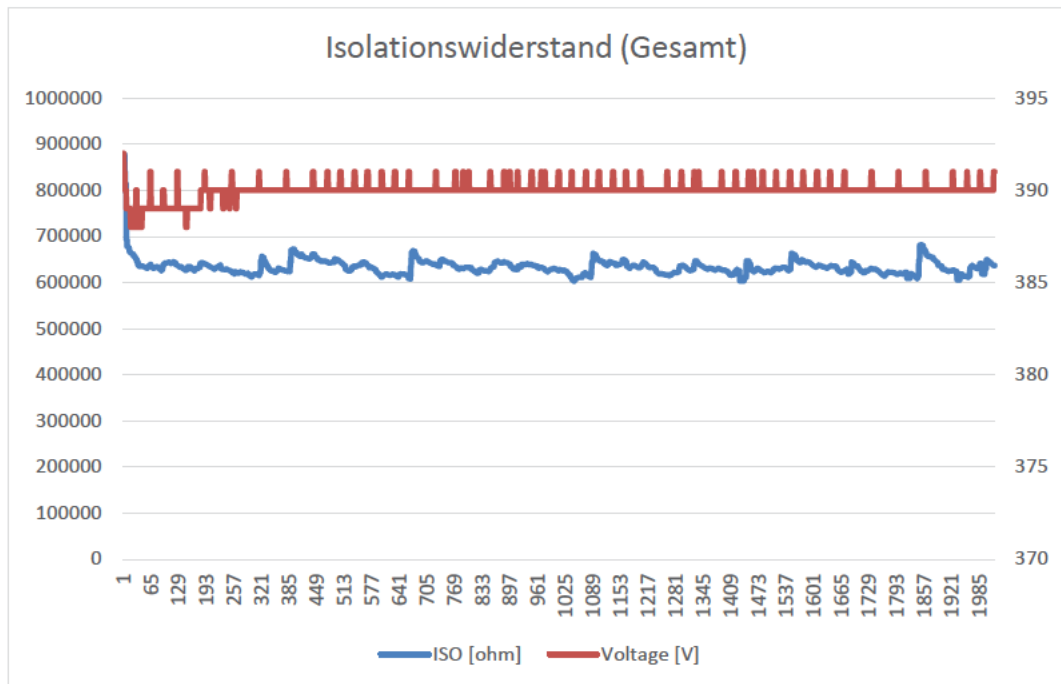


Abbildung 3: Gesamtisoliationswiderstand am 30.08.2023, ab 13:59:46 in Minden

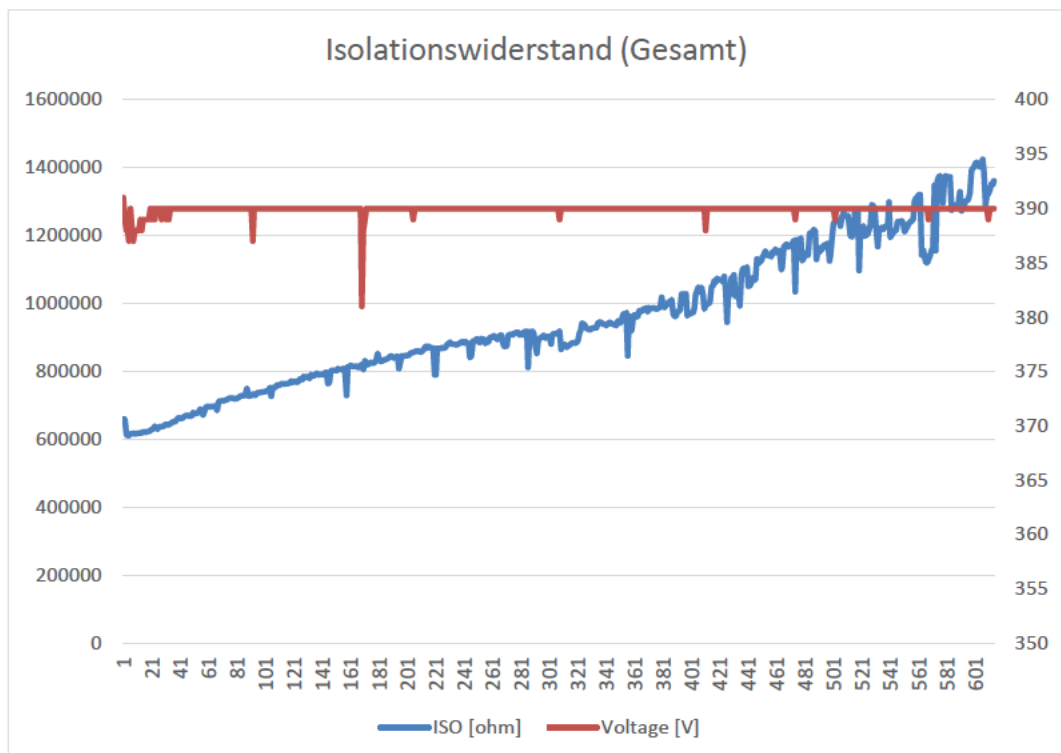


Abbildung 4: Gesamtisoliationswiderstand am 17.10.2023, ab 13:30:52 in Minden

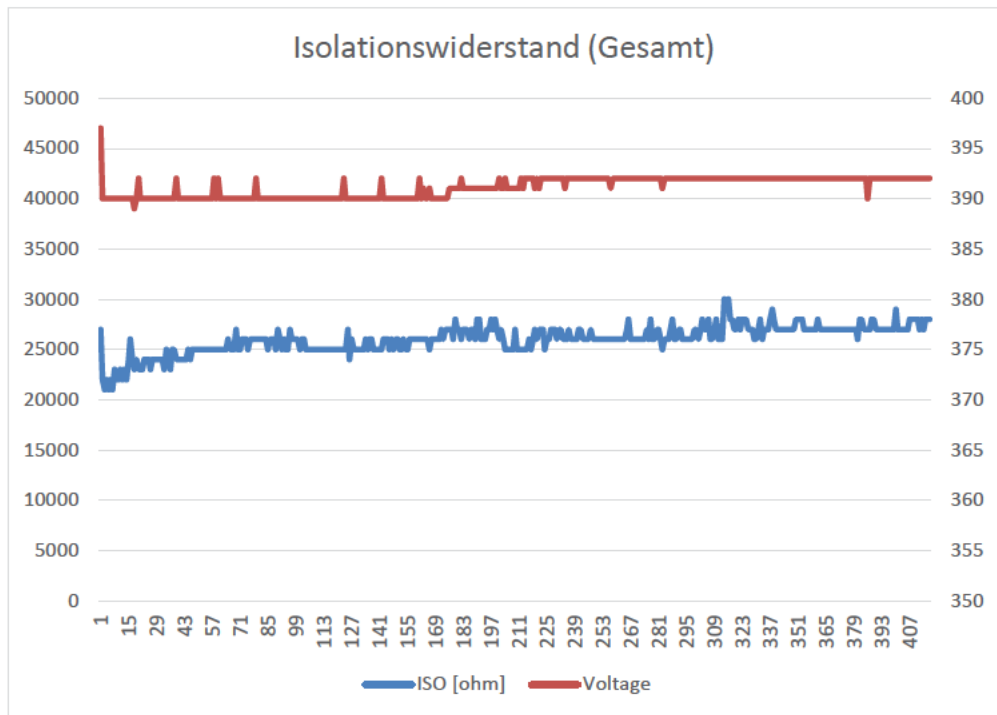


Abbildung 5: Gesamtisoliationswiderstand am 13.12.2023, ab 12:25:28 in Görlitz

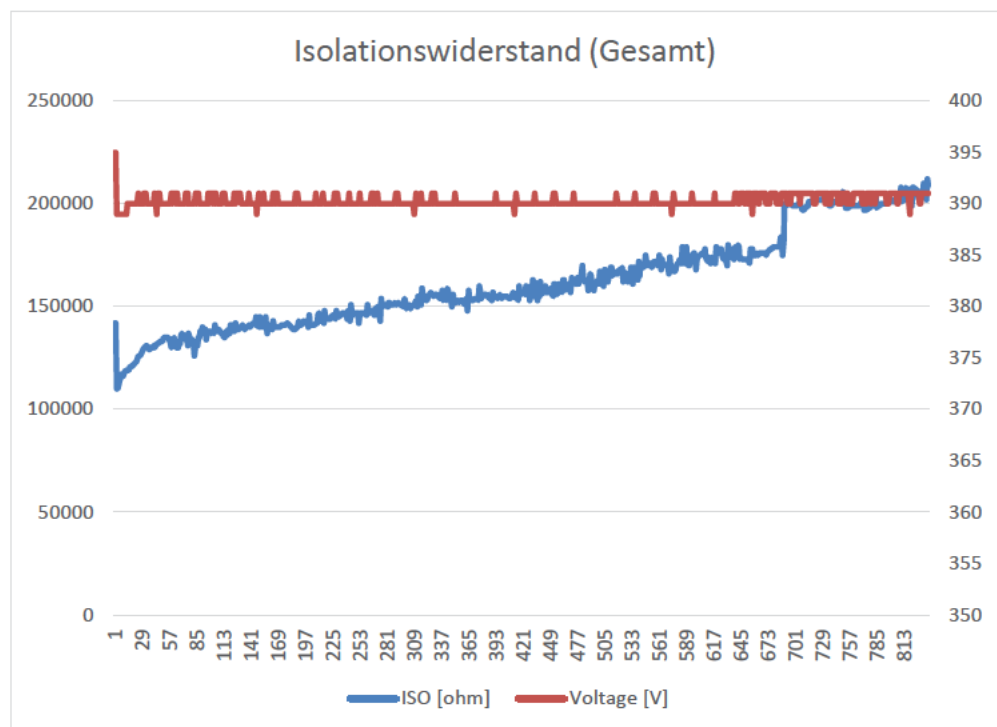


Abbildung 6: Gesamtisoliationswiderstand am 20.12.2023, ab 08:50:58 während der Fahrt zwischen Dresden und Minden

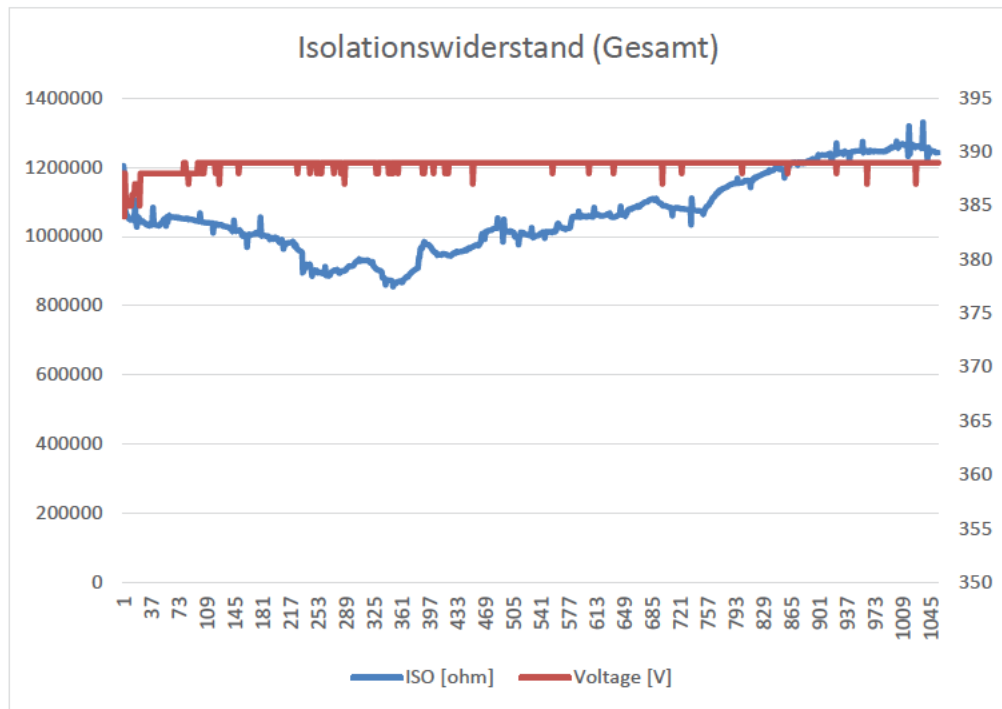


Abbildung 7: Gesamtisoliationswiderstand am 29.01.2024, ab 09:09:00 während Fahrt zwischen Minden und Rostock Seehafen

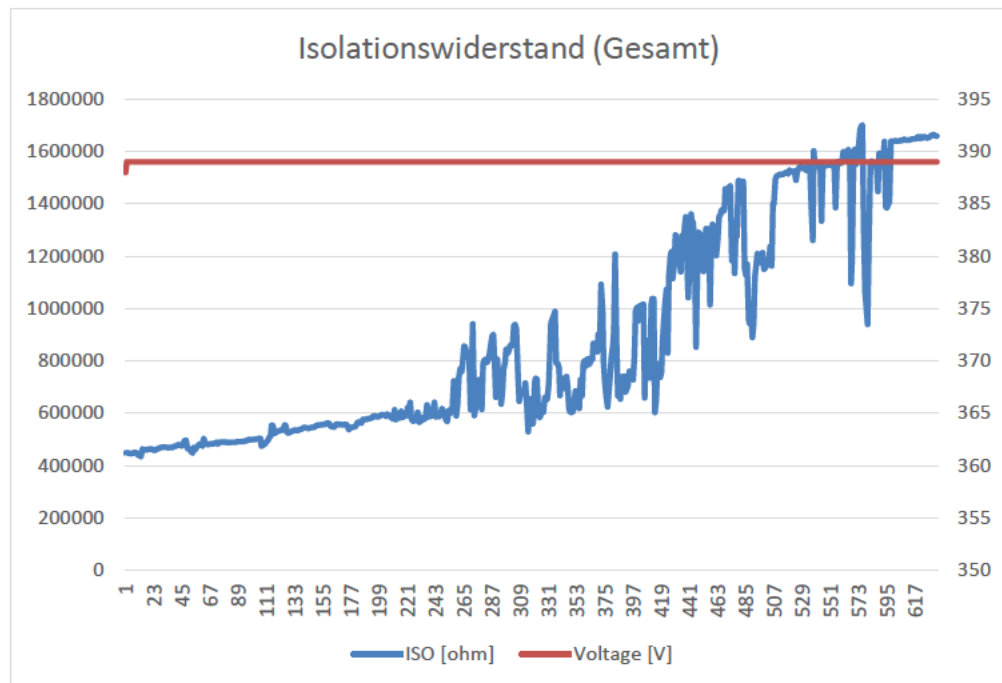


Abbildung 8: Gesamtisoliationswiderstand am 19.02.2024 ab 8:11:42 während Fahrt zwischen Kornwestheim und Nürnberg Langwasser

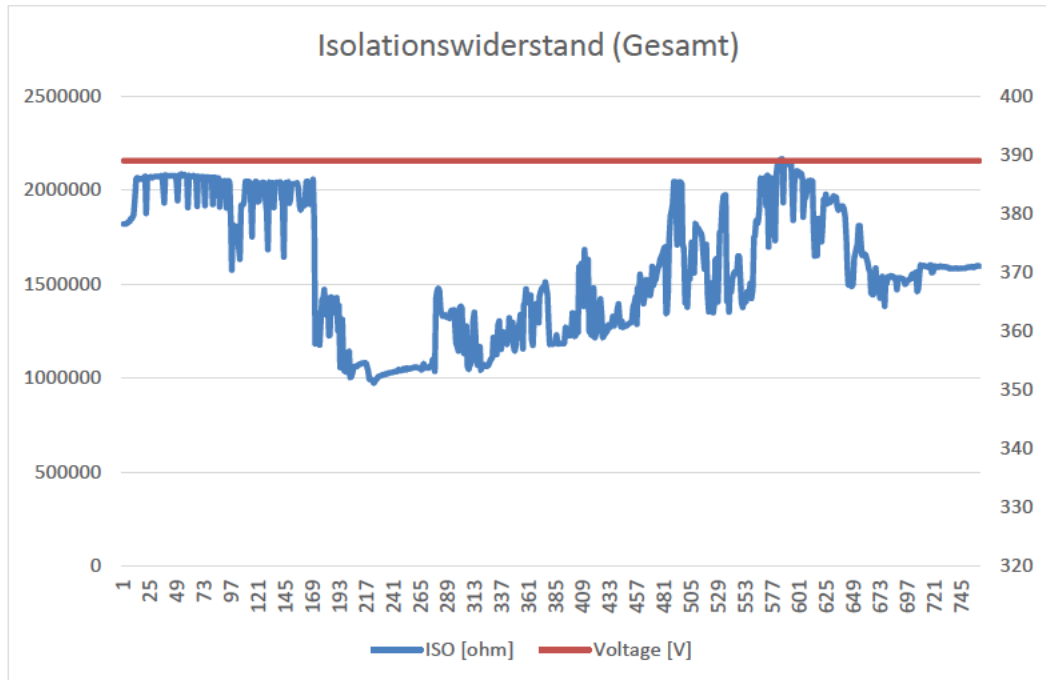


Abbildung 9: Gesamtisoliationswiderstand am 19.02.2024, ab 15:19:13 während Fahrt zwischen Kornwestheim und Nürnberg Langwasser

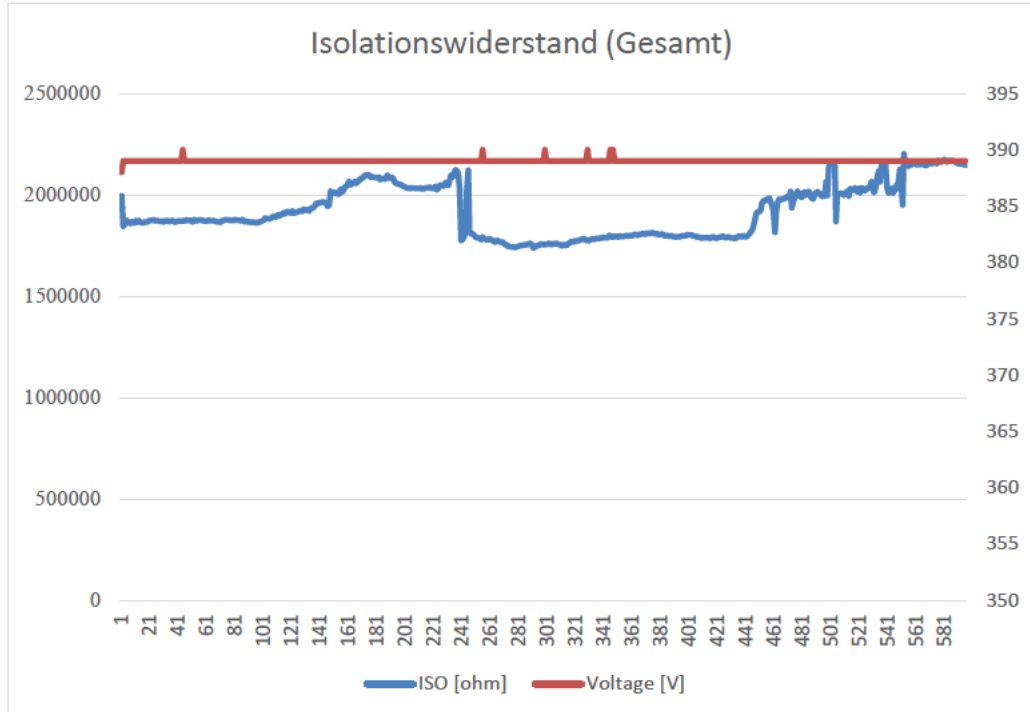


Abbildung 10: Gesamtisoliationswiderstand am 21.02.2024, ab 06:56:03 während Fahrt zwischen Bebra und Minden

Die meisten der Hauptkontakte haben sehr gute Werte gezeigt. Ein Minimum wurde mit 2 [M Ω] erreicht. In Phase I wurde im Anforderungsdokument für einen einzelnen Elektrokontakt in einer Elektrokupplung ein Mindestwert von 800 [M Ω] festgelegt, damit sind auch die Ergebnisse von 11 [M Ω] und 190 [M Ω] als unzureichend auszuwerten.

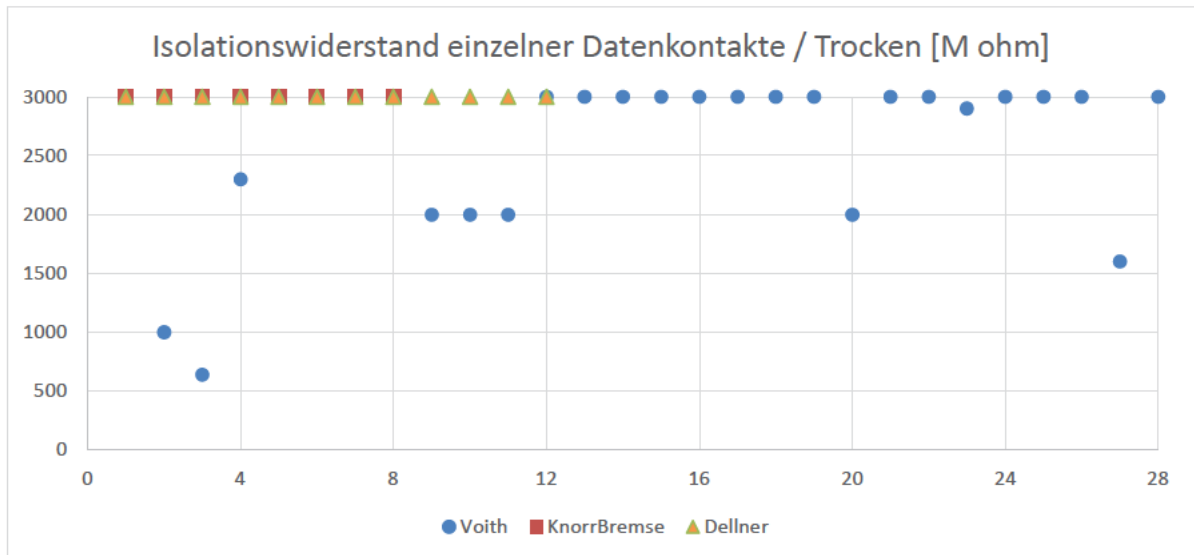


Abbildung 12: Isolationswiderstand Datenkontakte

Die Datenkontakte haben sich im Vergleich zu den Hauptkontakten auffälliger gezeigt, allerdings mit höheren Werten als in Abbildung 11.

In beiden Fällen ist ein direkter Vergleich zwischen den Herstellern, aufgrund der unterschiedlichen (und teils statistisch unzureichenden) Menge an Prüflingen, nicht möglich.

5 Fehlerschutz (Schutz vor indirekter Berührung)

Nach Auftreten eines ersten Fehlers (Abb. 13) wird im IT-System keine Abschaltung der elektrischen Anlage gefordert, da keine gefährliche Berührungsspannung auftreten kann, sofern die Bedingung $R_A \times I_d > 50V$ erfüllt ist. In diesem Beispiel entspricht der Fehlerstrom I_d dem Strom I_n (Fehlerstrom über die natürlichen Ableitkapazitäten C_n). In der Anmerkung 411.6.3.1 der Norm DIN VDE 0100-410 [3] wird empfohlen, den ersten Fehler so schnell wie möglich zu beseitigen. Diese Empfehlung dient, da der zweite Fehler zur Abschaltung führen muss, in erster Linie der Betriebssicherheit und nicht dem Schutz gegen elektrischen Schlag. Für die Abschaltung des o. g. IT-Systems gelten im Fall eines zweiten Fehlers die Bedingungen des TN-Systems. Der Schutzpotentialausgleich ist gem. DIN EN 50153 ausgeführt, d.h. alle elektrisch leitenden Körper in der Nähe spannungsführender Teile sind mittels Schutzverbindungen mit dem Fahrzeugkörper verbunden. Gemäß DIN VDE 0100-410 Abs. 415.2.1 müssen in einen zusätzliche Schutzpotentialausgleich alle gleichzeitig berührbaren Körper fest angebrachter Betriebsmittel und fremde leitfähige Teile einbezogen sein.

5.1 Betrachtung von kapazitiven Effekten des Stromversorgungssystems

Bei der Isolation des Systems, sind der ohmsche und der kapazitive Anteil zu berücksichtigen. Der kapazitive Anteil setzt sich aus der natürlichen Netzableitkapazität C_n , also dem Anteil der Gesamt-ableitkapazität, der sich durch den natürlichen (geometrischen) Aufbau der Leitungsanlage des IT-Systems gegen Erde ergibt, und dem Anteil der in elektrischen Betriebsmitteln enthaltenen Entstörkapazitäten. Um den Effekt Leitungsanlage zu bewerten, wurde sowohl die Kapazität von beiden Stromversorgungsleitungen L1 und L2 getrennt als auch die Gesamtkapazität der Leitungen parallel zu den Netzteilen (in Güterwagenbox), gegen Erdpotenzial gemessen. Dabei ergab sich zwischen den Ergebnissen für beide Leitungen kein erheblicher Unterschied, sodass ein Wert für beide angenommen werden kann. Eine Hochrechnung von den am Tag der Messung vorhandenen Wagen auf einen Zugverband mit 50 Wagen (Generalannahme DAC4EU-Projekt) führt zu einer Reaktanz von ca. 5 [k Ω] (Netzteile inklusive, 50[Hz]).

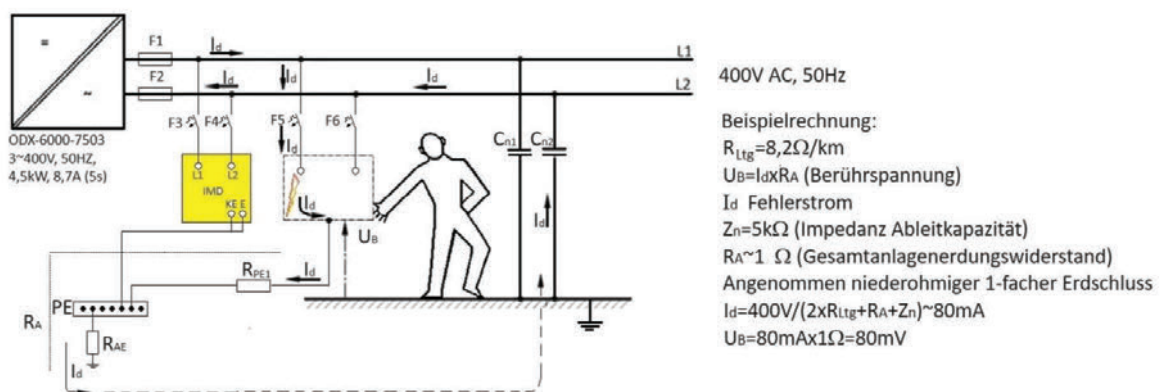


Abbildung 13: IT-Netz: indirekte Berührung bei Erdschlussfehler (nicht ausreichender Isolationswiderstand)

Am Beispiel des einfachen Erdschlusses aus Abbildung 13 ist der Fehlerstrom bei Auftreten nur eines Körper- bzw. Erdschlusses niedrig, da der kapazitive Anteil des Isolationssystems den Rückstrompfad darstellt. Bei indirekter Berührung (in Sinne der DIN EN 50153 [6], niedriger Isolationswiderstand) ist durch den gegebenen Potenzialausgleich nur eine sehr kleine Berührungsspannung möglich (R_A in Abbildung 13 äußerst klein), damit ist der Effekt der Kapazität vernachlässigbar.

Gemäß DIN VDE 0100-410 Abs. 411.6.1 müssen jedoch Vorkehrungen getroffen werden, um im Falle von zwei gleichzeitig auftretenden Fehlern das Risiko gefährlicher pathophysiologischer Einwirkungen auf eine Person, die in Verbindung mit gleichzeitig berührbaren Körpern steht, zu vermeiden.

6 Basisschutz (Schutz vor direkter Berührung)

Gem. DIN EN 50153:2014 Abs. 5.1 [6] gilt: Aktive Teile, die einen elektrischen Schlag verursachen können, sind gegen direktes Berühren zu schützen. Alle Arten von Betriebsmitteln müssen so betrieben werden können, dass der Schutz gegen direktes Berühren nicht verloren geht. Gem. DIN 3100 gilt hinsichtlich des Berührschutzes, dass ein Einfachfehler in den elektrischen Betriebsmitteln nicht zu einer Gefährdung führen darf.

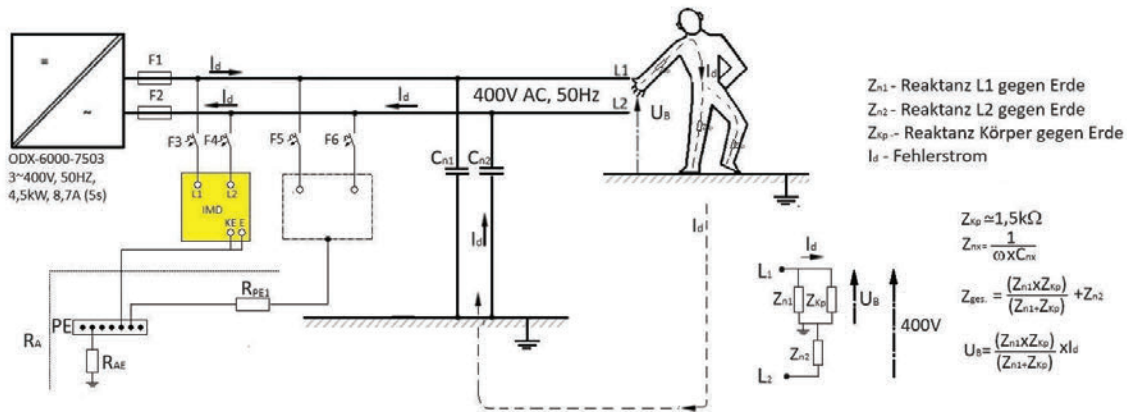


Abbildung 14: Direkte Berührung einer Phase ohne Erdschluss in Leitungsanlage

Ein Einfachfehler liegt vor, wenn beispielsweise wegen eines mechanischen Defekts im Verschlussmechanismus der Verschlussklappe über den E-Kontakten die Kontakte der DAK offen liegen.

Im Fall der direkten Berührung eines Spannung führenden DAK-PIN bei offen stehender Klappe (L1 oder L2 in Abbildung 14) bildet der Widerstand des menschlichen Körpers parallel zur Erdimpedanz der berührten Phase und in Serie zur Erdimpedanz der anderen Phase einen Stromkreis, die dabei resultierende Berührungsspannung ist abhängig von der Anzahl der in den Zug eingestellten Wagen. Die Annahme des Projekts für die Körperimpedanz ist 1 [k Ω], rein ohmsch, in der Literatur [5] sind etwas höhere Werte, um die 1,5 [k Ω], abhängig von der Berührungsspannung und trockenem/wassernassem/salzwassernassem Zustand für 50 % der Population erwähnt. Der dann resultierende Fehlerstrom kann nach folgender vereinfachter Formel dimensioniert werden:

$$I_F = \frac{U_B}{(X_{iso,L1} \parallel X_{Körper}) + X_{iso,L2}}$$

$$U_B = I_F * ((X_{iso,L1} \parallel X_{Körper}) + X_{iso,L2})$$

Formel 1: Fehlerstrom und resultierende Berührungsspannung unter Betrachtung von Isolationsimpedanz und Körperwiderstand

Im vorliegenden 2 Phasen 400V_{AC} IT-System ohne Neutralleiter beträgt die Spannung beider Leiter L1 und L2 gegenüber Erde bei erdschlussfreier Leitungsanlage $400/\sqrt{3}=230\text{V}_{AC}$. In Abhängigkeit vom Isolationszustand der Leitungsanlage, z.B. bei niederimpedanten einfachem Erdschluss kann die Spannung einer Phase gegenüber Erde bis 400V_{AC} betragen.

Aus dem im Rahmen der Messungen zum Kapazitätsbelag der Leitungsanlage und der Entstörkapazität ermitteltem Wert einer Reaktanz von $5k\Omega$ ($C_{nges}=630nF$) für einen 50 Wagenzug und einer Länge von 1000m ergibt sich ein entsprechender Wert für den Kapazitätsbelag von ca. $12,6nF$ je Wagen.

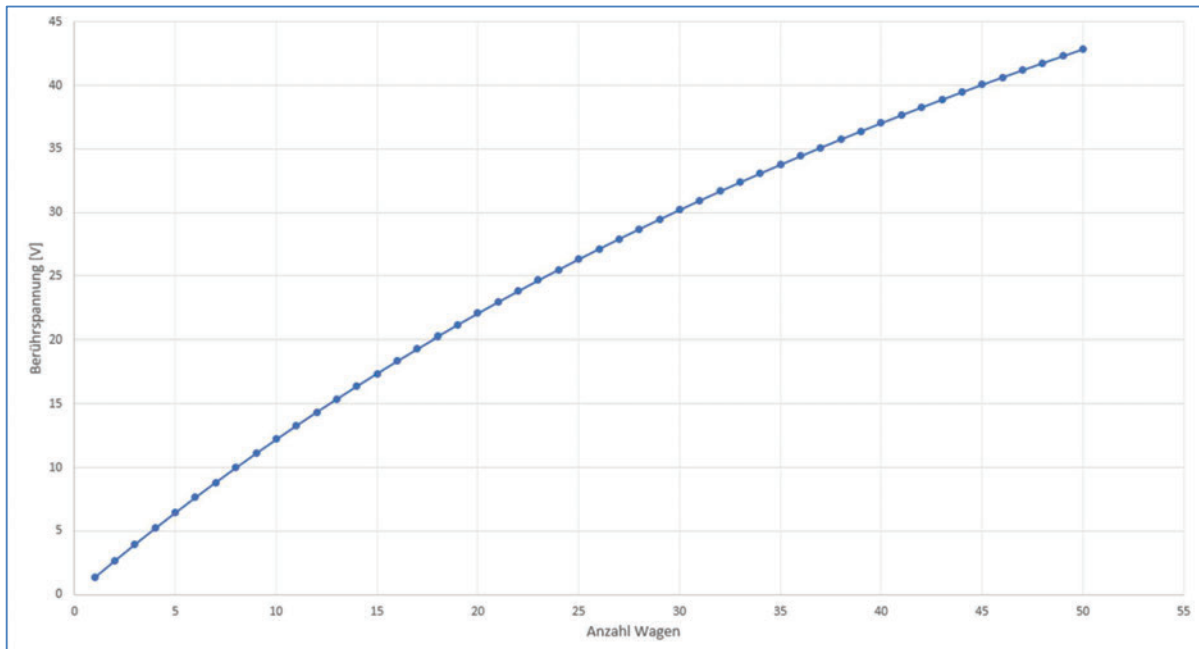


Abbildung 15: Verlauf der Berührungsspannung (Annahme Körperimpedanz = $1.5k\Omega$) an einer Phase am Ende des Zuges in Abh. der Wagenzahl ohne Erdschluss Leitungsanlage

Unter der Annahme des Grenzfalles der erdschlussfreien Leitungsanlage, ergibt sich die Situation gem. Abbildung 15, d.h. die Berührungsspannung an einem offen liegenden DAK-PIN am Ende des Wagenzuges von $<50V_{AC}$ aus den gemessenen und auf einen 50 Wagen Zug hochgerechneten Werten.

Unter der Annahme des Grenzfalles eines niederimpedanten Erdschluss einer Phase ergibt sich unabhängig von der Zuglänge eine Berührungsspannung von $400V_{AC}$. Dies stellt den Fehlerfall dar, dass zusätzlich zum Fehler der defekten Verschlussklappe noch ein niederimpedanter Erdschluss im Leitungsnetz einer Phase vorliegt.

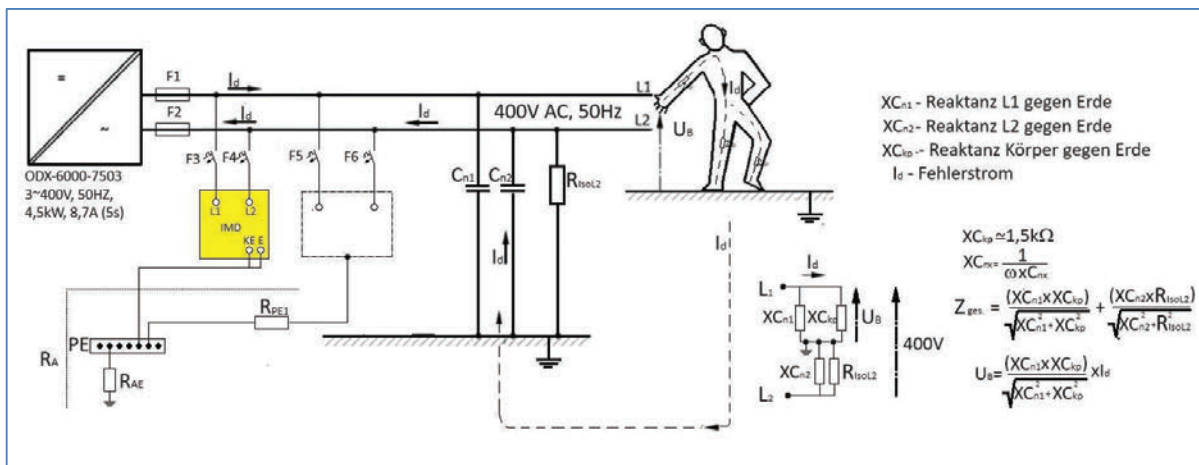


Abbildung 16: Direkte Berührung einer Phase mit Erdschluss an L2

Unter der Annahme, dass im Fehlerfall des offen liegenden DAK-Pins am Ende des Wagenzuges noch ein zweiter Fehler in Form eines Erdschlusses an Phase L2 gegenüber Erde auftritt, ergeben sich die Berührungsspannungen gem. Abbildung 16.

Somit ergibt sich in Abhängigkeit von der Länge des Wagenzuges und des Isolationswiderstandes der Phase L2 eine Berührungsspannung am DAK-Pin der erdschlussfreien Phase $< 50V_{AC}$ für alle Isolationswiderstandswerte $> 5k\Omega$ (s. Abbildung 17).

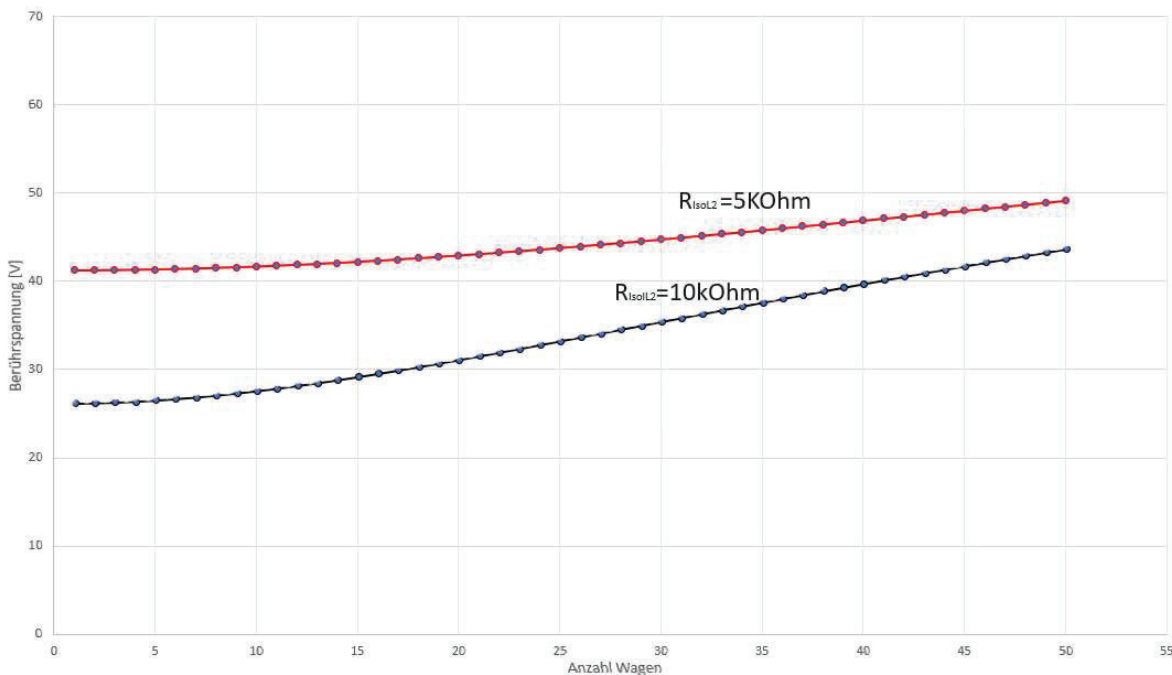


Abbildung 17: Berührungsspannung am offen liegenden DAK-PIN bei 1-fachem Erdschluss L2 (Annahme Körperimpedanz = $1.5k\Omega$)

Damit bestätigt sich die Wichtigkeit den Isolationswiderstand des IT-Netz-Systems kontinuierlich zu messen und dessen Niveau auf mindestens $5 [k\Omega]$ zu halten (bei beiden Leitungen), sowie den kapazitiven Anteil der Isolationsimpedanz in den folgenden Phasen des Projekts zu untersuchen, auch wenn die elektrische Sicherheit in Sinne der DIN EN 50153 [6] (inkl. Schutz gegen direktes Berühren) schon gewährleistet ist.

6 Stromversorgung

Die Stromversorgung wurde, wie in Punkt 2 „Angaben zum Bericht“ beschrieben, für Phase III und IV durch einen $24V_{DC}/400V_{AC}$ Wechselrichter realisiert. Hierzu wurde nach einer Untersuchung der auf dem Markt vorhandenen Varianten ein bahntauglicher Wechselrichter der Fa. Premium ausgewählt und dem Projekt zur Verfügung gestellt. Das Wechselrichter Modell ODX-6000-7503, das aus $24V_{DC}$ Batteriespannung einen isolierten Ausgang (kein Trenntransformator für die galvanische Trennung benötigt) mit 3-phasiger Wechselspannung generiert, kann auch ausreichende Leistung im 1-phasigen Betrieb erzeugen. Dieser ständige Betrieb im Schiefast-Modus wurde mit dem Hersteller geklärt und für die Anwendung freigegeben.

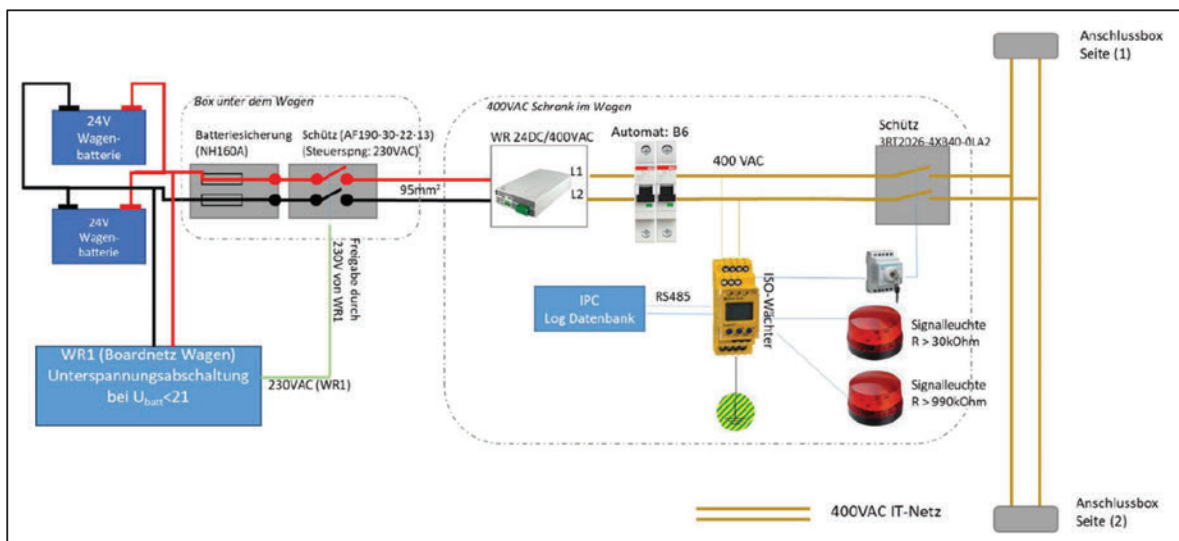


Abbildung 18 Schematische Darstellung der Stromversorgung

Zur sicheren Abschaltung der $400V_{AC}$ Einspeisung wurde das System wie in Abbildung 18 dargestelltem Diagramm eingebaut. Die Freigabe des Schütz benötigt die Meldung aus dem IMD-Gerät, dass der minimale Isolationswiderstand eingehalten ist und dass der in Reihe geschaltete Schliessschalter in der „ON“-Position ist (die Erlaubnis für die Betätigung des Schliessschalters wurde auf projekt-kundige EFKs und den Versuchsleiter eingeschränkt).

In jedem Güterwagen-Schaltschrank des Demonstratorzug wurde aus dem $400V_{AC}$ -System, mittels Netzteils der Fa. Meanwell (TDR-480-24), die $24V_{DC}$ -Einspeisung für die Datenkommunikation und Messhardware lokal zur Verfügung gestellt.

6.1 Eigenschaften erzeugter Spannung und Strom der Einspeisung

Wie bei der Anwendung von elektronischen Netzteilen zu erwarten ist, wurde bei der Spektralanalyse des Versorgungssystem ein signifikanter Oberschwingungsanteil des Stroms gemessen. Mit einem THD von ca. 50 % ist die Wirkung auf den Leistungsfaktor von signifikanter Bedeutung und muss für zukünftige Berechnungen der (Schein-) Leistung berücksichtigt werden.

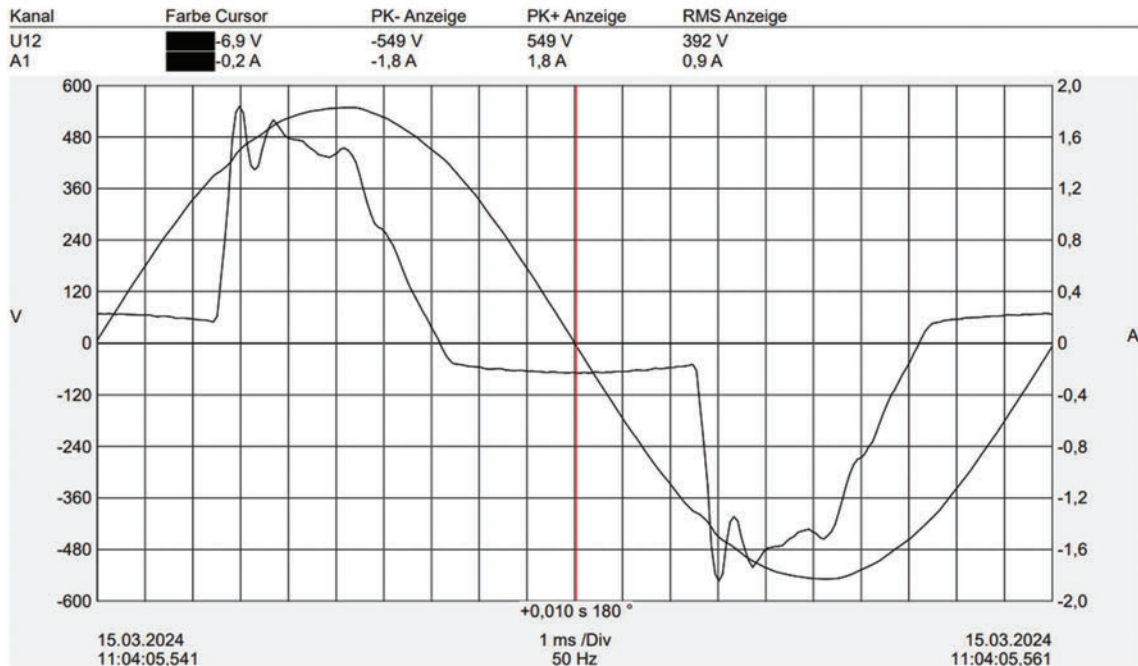


Abbildung 19: Spannung zwischen L1 / L2 und dazugehörigem Strom

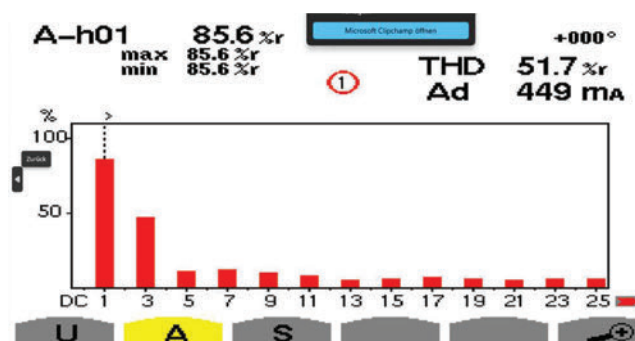


Abbildung 20: Spektralanalyse Strom

Das Verhältnis zwischen Wirk- und Blindleistung ist bei allen Fahrten im Grunde genommen unverändert geblieben, da die Last am einzelnen Wagen gleichgeblieben ist (und nur die Menge und Reihenfolge der Verbraucher geändert wurde), was zu erwarten war. Die angewandten Netzteile sind mit ca. 60W belastet, deutlich unter ihrer Nennleistung von 480W. Der Leistungsfaktor wurde stabil bei

ca. 0.725 gemessen, wobei der höhere Anteil der harmonischen Verzerrung des Stromes auch von Belangen ist (und nicht nur die Verschiebung zwischen Strom und Spannung).

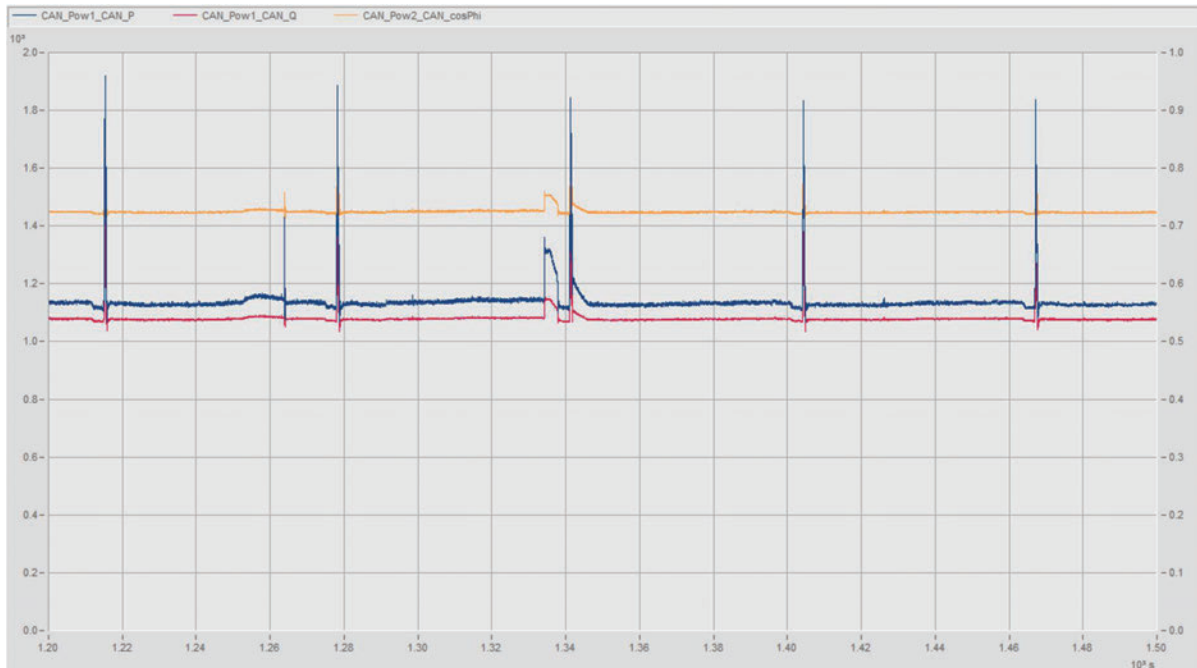


Abbildung 21: Leistung am Wechselrichter, exemplarische Messung während Messfahrt

In Abbildung 21 ist eine Wirkleistung $P=1.13$ [kW] und eine Scheinleistung $Q=1.08$ [kVA] zu sehen, womit gemäß Formel 2 ein Leistungsfaktor von 0.723 berechnet wurde.

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = 0,7229$$

Formel 2: Leistungsfaktor

Die absoluten Werte von P und Q (Wirk- und Scheinleistung), während einer Messfahrt mit mehr oder weniger Wagen ändern sich, aber der Leistungsfaktor bleibt im gleichen Bereich, da jeder Wagen die gleiche Last darstellt. Mit verschiedenen Lasten innerhalb der Wagen würde dieser Faktor schwanken, sowohl die kapazitive bzw. induktive Verschiebung des Stromes als auch dessen harmonischer Verzerrungsgrad.

Die in Abbildung 21 zu sehenden Peaks mit ca. 60 Sekunden Periodizität sind den zyklischen Ein- und Ausschaltprofilen der in den Güterwagen eingebaute USVs zuzuordnen.

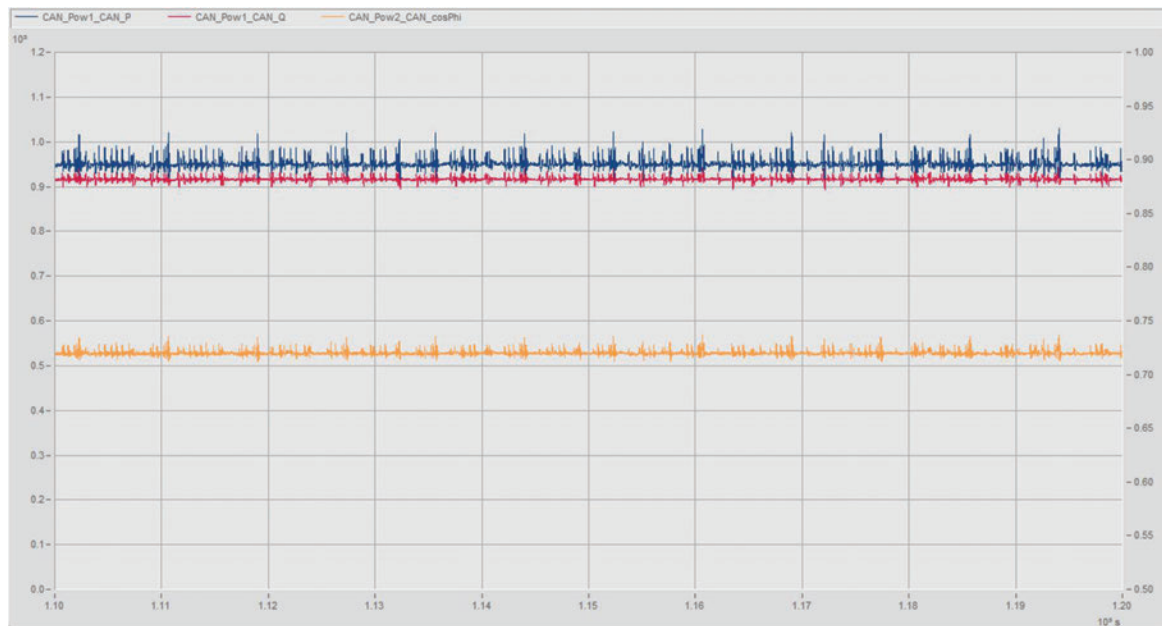


Abbildung 22: Leistung am Wechselrichter, Exemplare Messung ohne USVs

Im Vergleich zu Abbildung 21 ist wie erwartet in Abbildung 22 bei niedrigem Leistungsniveau der gleiche Leistungsfaktor zu sehen. Die USV wurden bei dieser Messfahrt von den Wagenbatterien getrennt, um die davon verursachten dominanten Peaks (z.B. in Abbildung 21) außerhalb der Betrachtung zu lassen.

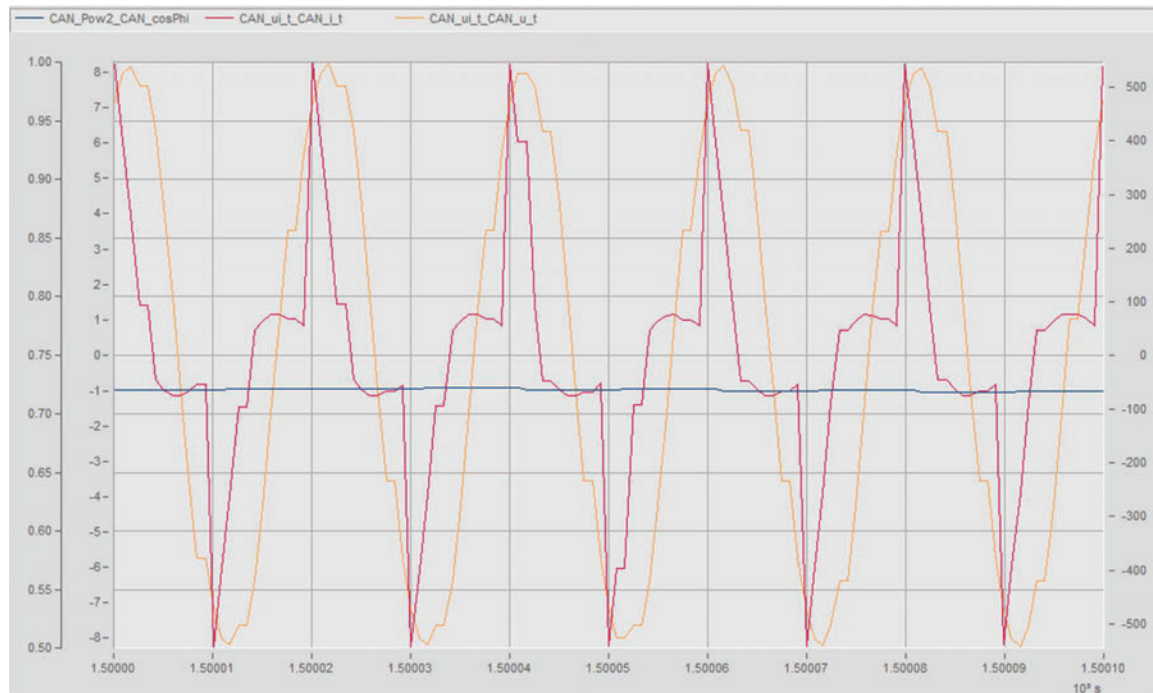


Abbildung 23: Spannung, Strom und Leistungsfaktor am Wechselrichter, 1.2[kHz] Messfrequenz

In Abbildung 23 sind die Spannung und der Strom des Systems während der Fahrt zu sehen. Diese Ergebnisse sind mit der Messung in Abbildung 19, im stationären Betrieb mittels Multitester und unter Betrachtung der Taktfrequenz der Messung, vergleichbar.

Die Verschiebung von Strom und Spannung, die starke harmonische Verzerrung des Stroms, und der damit resultierende Leistungsfaktor sind in der Abbildung zu sehen.

6.2 Verhalten der Spannungsversorgung während Messfahrten

Für die Evaluierung des Verhaltens der Spannungsversorgung während des Zugbetriebs wurden zwei Messfahrten mit unterschiedlichen Wagenreihungen/Konfigurationen ausgewertet. Beide Messfahrten wurden tagsüber mit einer Entfernung von 150 - 300 km pro Tag durchgeführt. Ziel war es, nicht nur den Betrieb kontinuierlich zu überwachen, sondern auch Anomalien wie Kontaktunterbrechungen oder Überschläge zu detektieren.

Direkt am Wechselrichter wurden Frequenz, Wirk- und Blindleistung, Leistungsfaktor, sowie die Momentan- und Effektivwerte von Strom und Spannung der Versorgung gemessen und gespeichert. In mehreren Wagen wurde (u.a.) der Momentanwert von Strom und Spannung gemessen. Die Analyse der Daten erlaubt, das Verhalten des Systems auszuwerten.

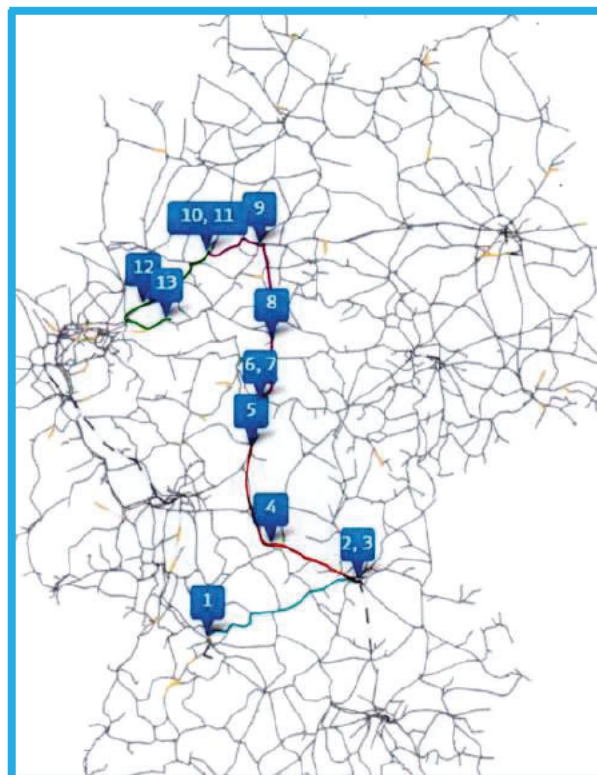


Abbildung 24: Beispiel Messfahrt Deutschland (Februar 2024), in Teilstrecken

Das Verhalten des Systems wurde ständig überwacht und es sind keine großen Unterschiede (außer denen, die von der elektrischen Last abhängen) zwischen den Messfahrten festgestellt worden. Es wurde keine problematische Situation identifiziert. Ergänzend sind exemplarische Betriebsituationen, die zum besseren Verständnis des Systems beitragen, dargestellt und kommentiert.

Eine ausführliche Beschreibung der Wagenreihung sowie zugehöriger Messpunkt-Konfiguration für jede Messfahrt ist in [4] als auch in [5] zu finden.

Die Reihenfolge der Abbildungen basiert auf dem Datum der Messung.

Die x-Achse ist in allen Fällen in [ms] dargestellt und ist als Zähler zu verstehen.

Für die Fahrt von Minden nach Rostock, am 01.02.2024 wurde keine Unterbrechung der Spannung oder des Stroms detektiert:

- Sektion von 08:57 bis 09:57

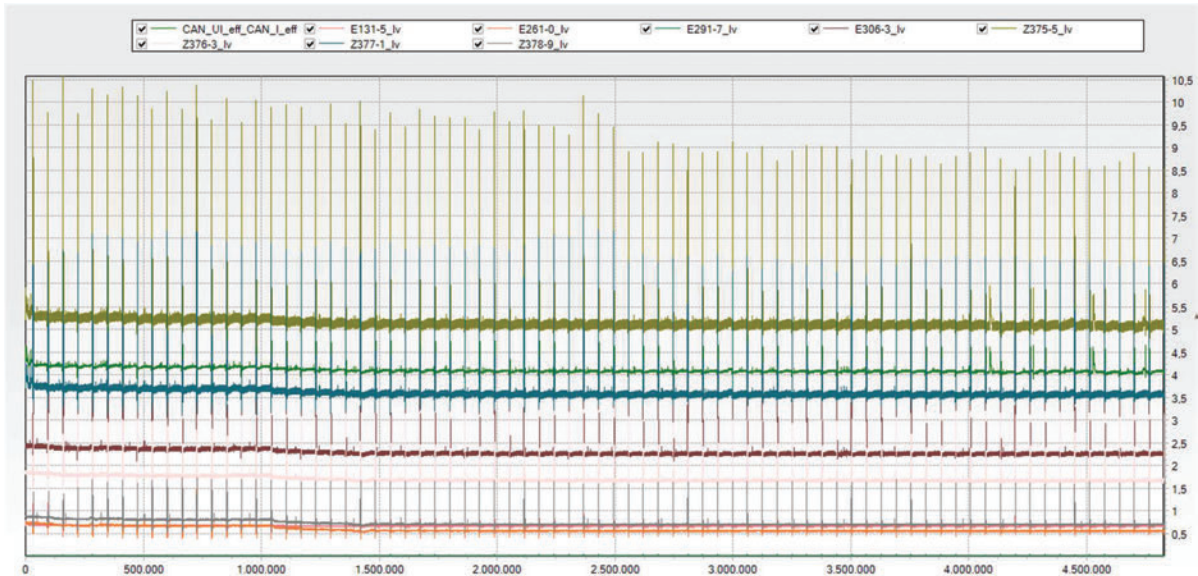


Abbildung 25: Strom bei Messfahrt 01.02.2024

Die in jedem Wagen eingebaute USV schaltet periodisch um und verursacht jeweils nach ca. 60 Sekunden einen Peak im Strom. Das ist inhärent zum Betrieb der USV und kann für die Betrachtung des Systems als „Rauschen“ angesehen werden.

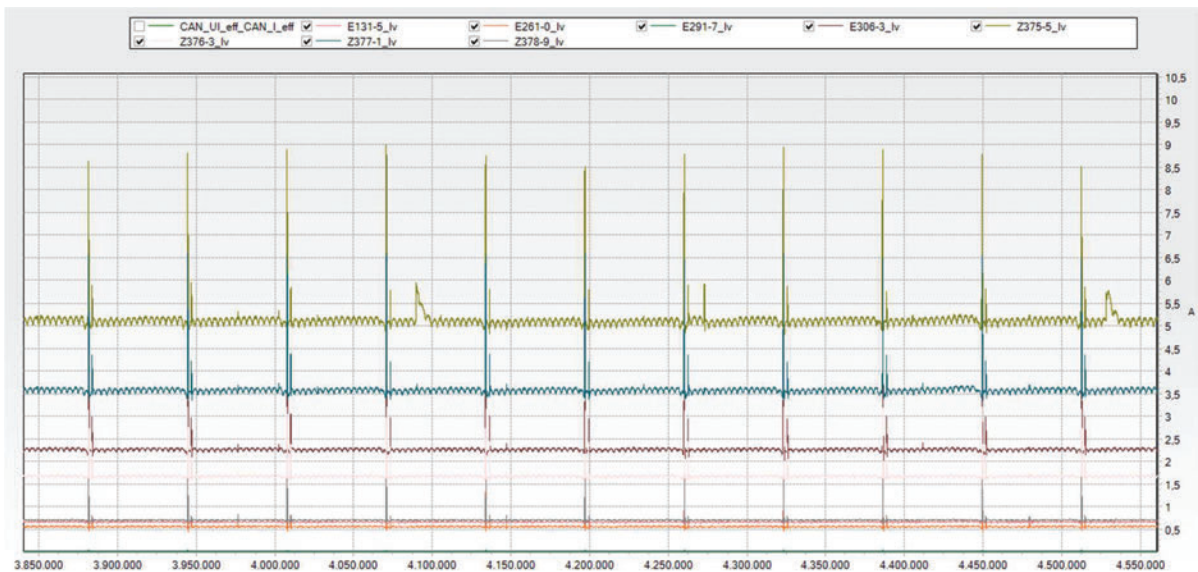


Abbildung 26: Strom bei Messfahrt 01.02.2024, 50 Sek/Div

In der folgenden Darstellung ist klar zu erkennen, wie in jedem Wagen der Strom sukzessive kleiner wird. Die von der USV verursachten Peaks addieren sich und werden in Richtung Messwagen immer bedeutender (Z375-Wagen ganz vorne, E261-Wagen als letzter). Nach Angaben des Herstellers der Wechselrichter ist ein Ausgangsripple von bis zu 2.5 % zu erwarten. Wir sehen eine Welligkeit im Effektivwert des Stroms mit einer Periode von ca. 3,4 Sekunden.

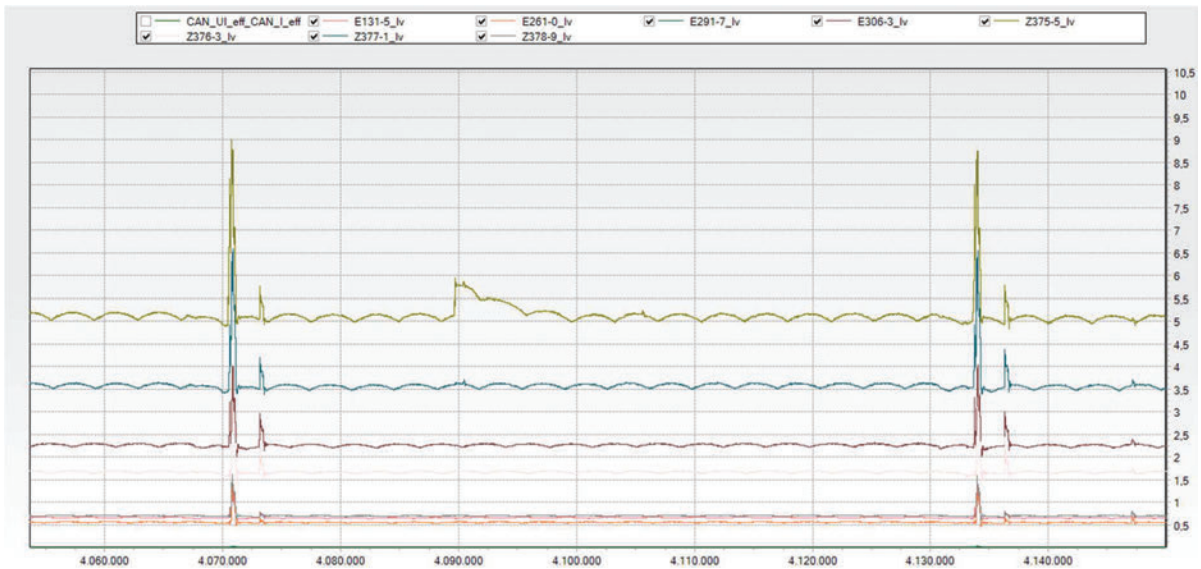


Abbildung 27: Ströme bei Messfahrt 01.02.2024, 10 Sek/Div

In Abbildung 28 sind ausgewählte Spannungen sowie die zwei der größten Ströme zu sehen. Bemerkenswert ist der geringe Unterschied in der Spannung zwischen den Messpunkten mit kürzester (Z375-5) und längster (E261-0) Entfernung zu der Spannungsversorgung. Das entspricht einem Spannungsverlust von ca. 1 %.

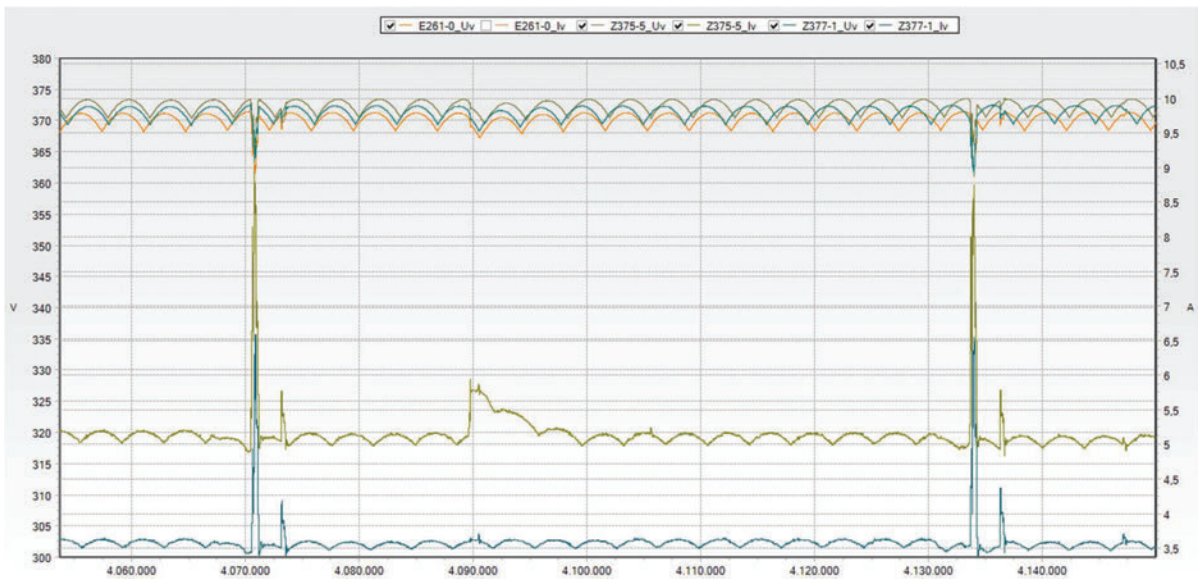


Abbildung 28: Ausgewählte Spannung und Strom bei Messfahrt 01.02.2024, 10 Sek/Div

- Sektion von 10:27 bis 11:57:

Der Vergleich der Stromkurven erlaubt die grobe Lokalisierung von Stromerhöhungen. Hier ist nach ca. 1808 Sekunden (rot markiert) eine Stromerhöhung hinter dem 4. Messpunkt (von Lok/Messwagen gesehen) zu erkennen, und nach ca. 1862 Sekunden (Lila markiert) deutlich näher, hinter dem ersten Messpunkt (bei dieser Fahrt der E375-Wagen).

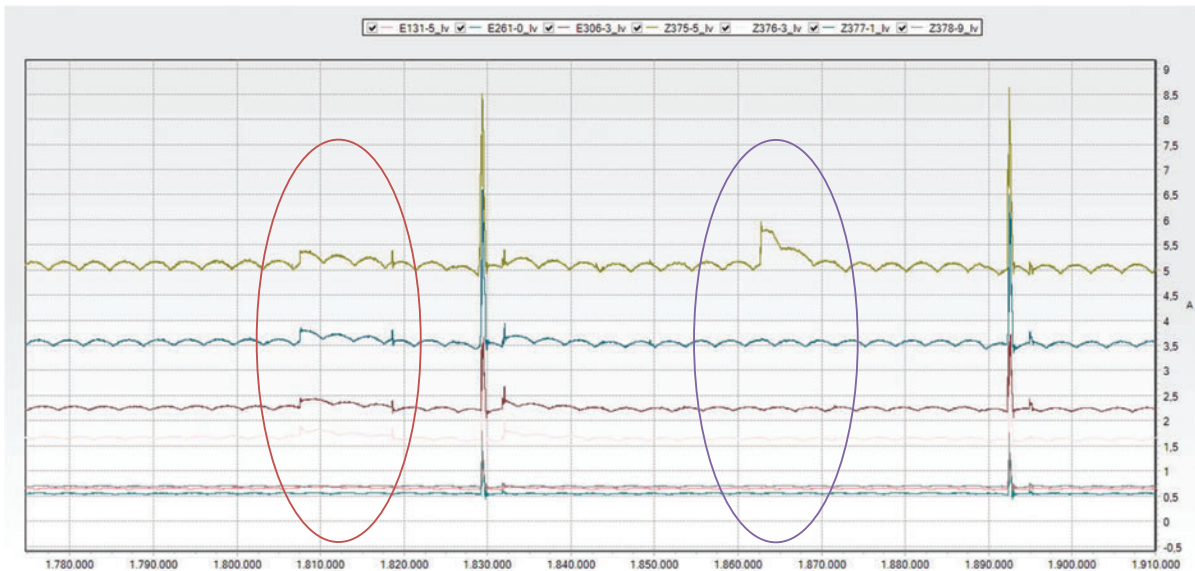


Abbildung 29: Unterschiedliche Lokalisierung von Stromereignissen entlang der Zugbildung

Auch das Spannungsprofil in Abbildung 30 zeigt sich erneut sehr stabil, mit ca. 1 % Spannungsabfall entlang der Zugbildung. Die Stromerhöhung nach ca. 1862 Sekunden (blau markiert) beeinflusst nur den Strom des Messpunktes näher zur Quelle, aber die Spannung der gesamten Zugbildung ist dadurch betroffen.

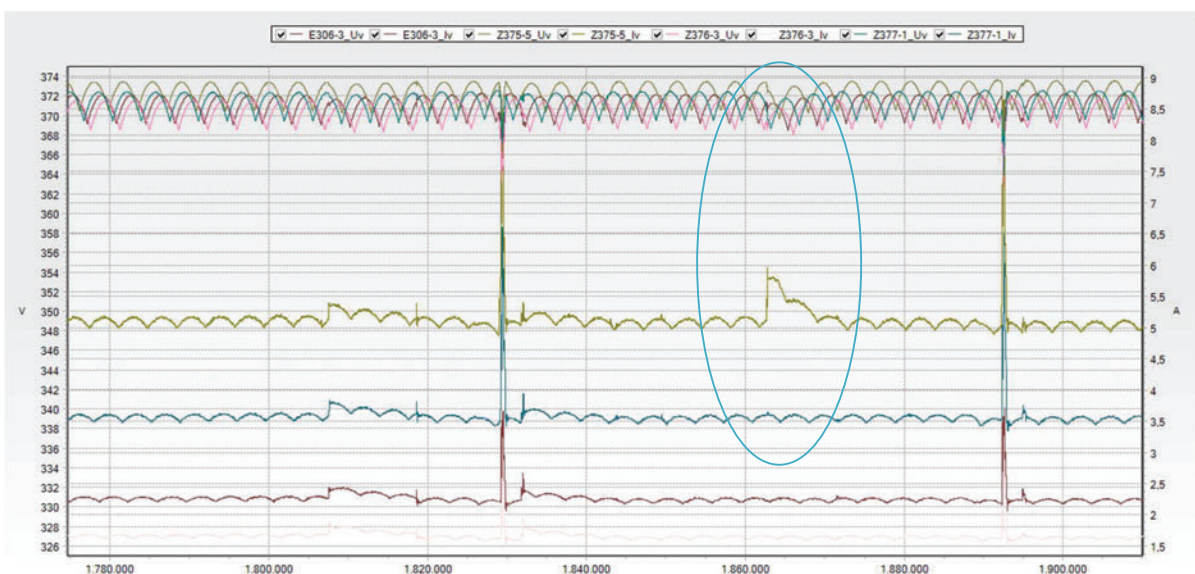


Abbildung 30: Strompeaks und deren Einfluss auf die Spannung

- Sektion von 12:27 bis 13:57

Auch unter Lastspitzen wurde das System normal weiterbetrieben und die Spannung blieb stabil. In Abbildung 31 sind oben die höchsten und niedrigsten gemessenen Spannungskurven zu sehen. Der letzte Messpunkt in dieser Zugbildung ist Wagen E261-0 gewesen, der am Tag der Messung von einem Wackelkontakt zum Spannungswandler betroffen war, weswegen nur die Strommessung zur Verfügung steht.

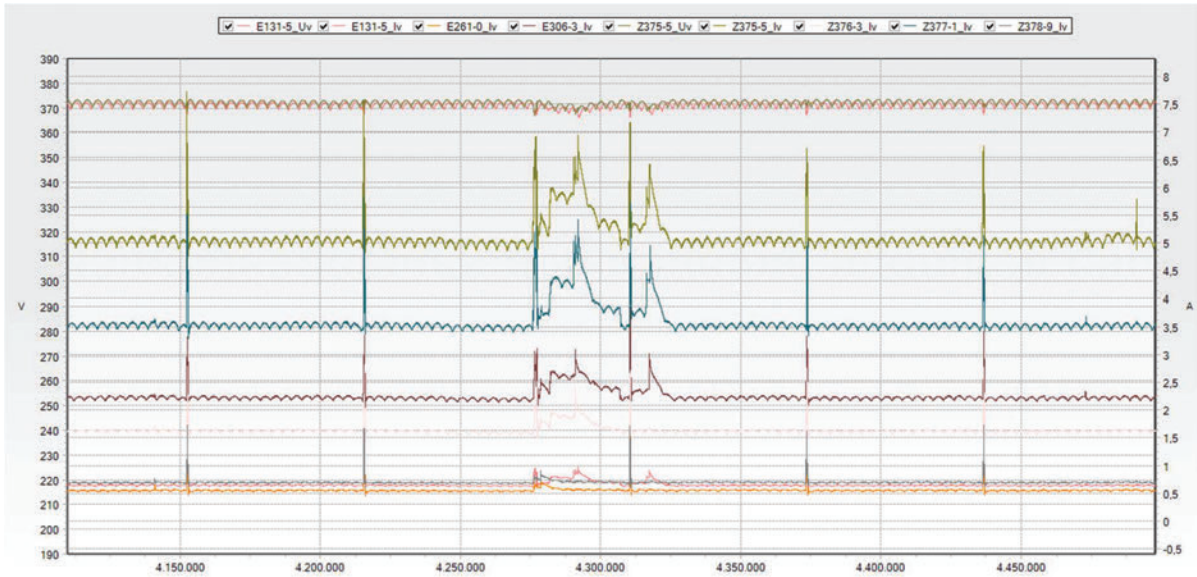


Abbildung 31: Zeitbegrenzte Erhöhung des Stroms und deren Effekt auf Spannung

Während der Kalenderwoche 8 (2024) wurden mehrere Messfahrten durchgeführt, alle ohne identifizierte Unterbrechung des Stroms oder der Spannung.

Einige Beispiele sind:

- 19.02.2024 von Kornwestheim nach Lippstadt, Sektion 12:22 bis 14:11

Bei dieser Fahrt wurde die USV am Güterwagen getrennt, um den Effekt der Umschaltung auszublen- den. Dabei wurde eine erhöhte Verzerrung des Effektivwerts des Stroms beobachtet.

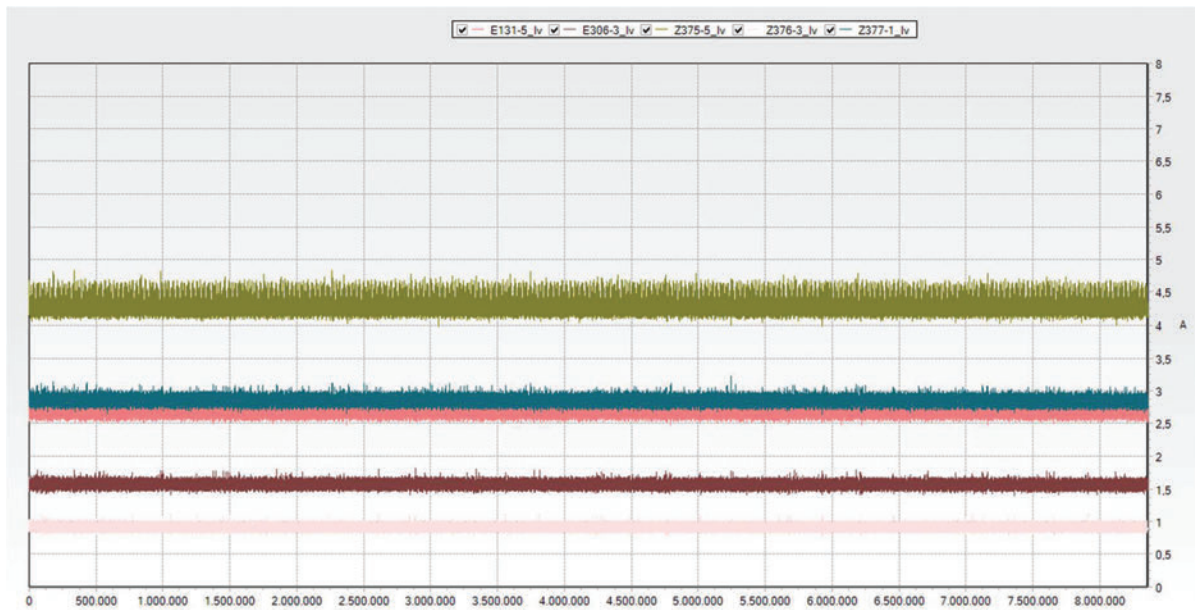


Abbildung 32: Ströme bei Messfahrt am 19.02.2024

- 20.02.2024, andere Reihenfolge der Güterwagen, Sektion von 9:12 - 11:47

In Abbildung 33 sind die Ströme einer neuen Konfiguration der Zugbildung (Detaillierte Auflistung jeder Zugkonfiguration in [1] zu finden) sowie die Spannungen vom ersten und letzten Messpunkt dargestellt. Der Spannungsabfall ist sehr niedrig.

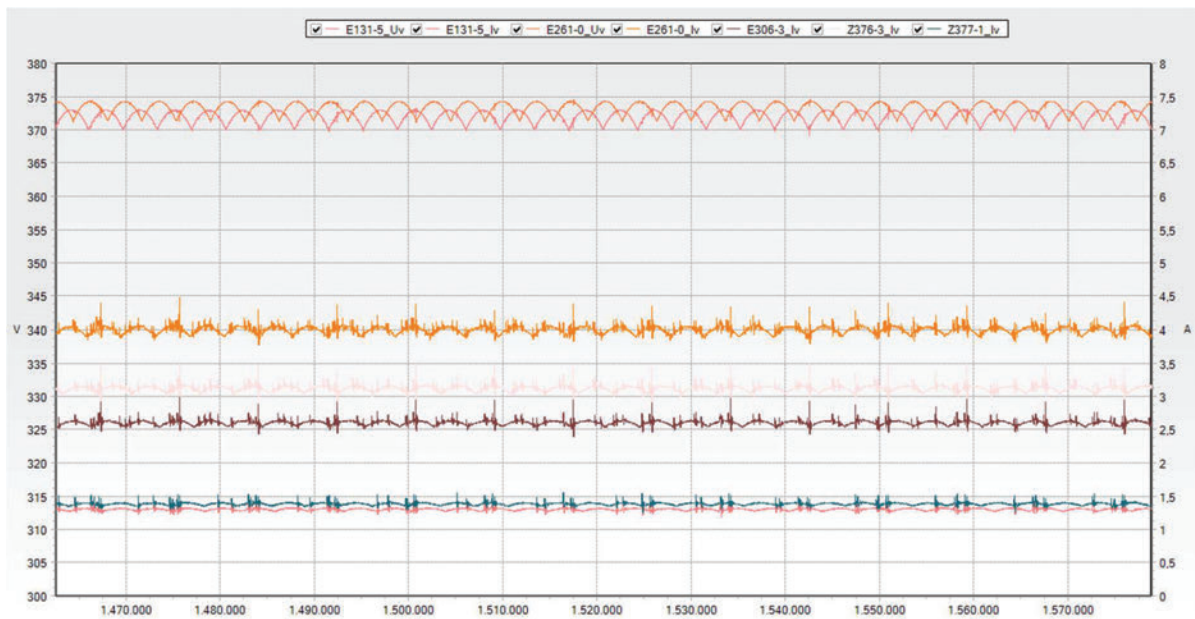


Abbildung 33: Spannungen und Ströme bei Messfahrt am 20.02.2024

7 Fazit

Die Spannungsversorgung wurde erfolgreich erprobt, die ausgewählte $400V_{AC}$ Lösung hat das Ziel der Prüfung erreicht und erhebliche Vorteile gegenüber $110V_{DC}$ im Hinblick auf die Spannungsversorgung entlang einer langen Zugbildung gezeigt. Der Spannungsabfall wurde im Rahmen von 1 % gehalten. Allerdings sind auch Nachteile der Wechselspannung merklich geworden.

Der Kontaktwiderstand der Kupplungen ist im Vergleich zu den vorherigen Phasen stabil geblieben. Die Kontakte haben diesmal keine mit den vorhandenen Messgeräten detektierbare Spannungsunterbrechungen während der Messfahrten verursacht. Es besteht jedoch immer noch die Möglichkeit, dass kurze Unterbrechungen in der Nähe von Spannungsnulldurchgängen tatsächlich zustande gekommen sind, die aber nicht als solche identifiziert werden konnten. Statistisch gesehen ist es unwahrscheinlich, dass Kontaktunterbrechungen systematisch nur in der Nähe der Nulldurchgänge der Spannungen auftreten.

Die elektrische Isolation der Kontaktpins und der dazugehörigen Leitungen bleibt empfindlich gegenüber externen Einflüssen und könnte den Betrieb der Spannungsversorgung unterbrechen.

Die kapazitiven Effekte, die durch das Vorhandensein einer Wechselspannung entlang einer langen Leitung entstehen, und deren Auswirkung auf den Personenschutz bei einem IT-Netz-System sollten tiefer untersucht werden, auch wenn das Stromversorgungssystem die Anforderungen gemäß DIN EN 50153 [5] bezüglich Schutzes vor direktem und indirektem Berühren erfüllt. Das eingebaute Isolationsüberwachungssystem betrachtet nur den ohmschen Anteil davon. Normativ, das System muss als IT-Netz die Einhaltung einer minimalen Isolation von $50 [\Omega]$ pro Volt gewährleisten.

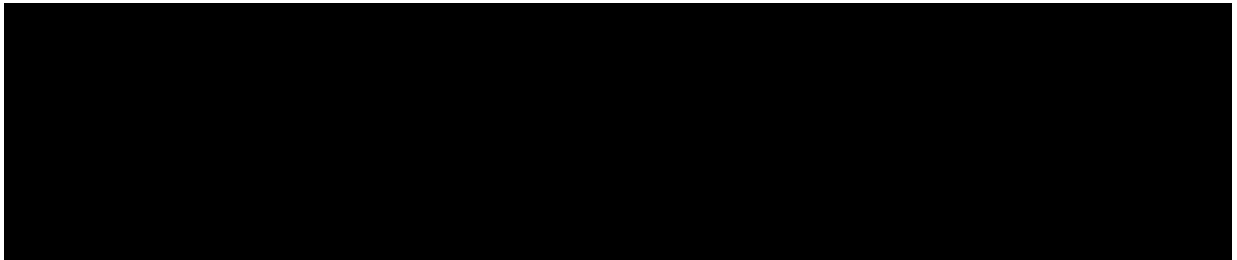
Der angewendete Wechselrichter (und Netzteil) sollte auch nach Scheinleistung und Oberwellen des Stroms ausgewählt werden, was in Zusammensetzung mit der Last erfolgen muss.

Alternativ wurde kurz vor Ende von Phase IV die Stromversorgung der Zugbildung aus einem bestehenden Hilfsbetriebsumrichter einer Elektrolok über einen neu installierten Trenntransformator erprobt. Im Fall einer Weiterführung des Projekts sollte diese Variante weiter untersucht werden.

8 Unterschriften

Geprüft und freigegeben:

Erstellt:



Leiter/in Abteilung
TT.TVE 322

Elektrische Antriebstechnik, Bordnetze
TT.TVE 322

- Bericht Ende -