

 Abschlussbericht	Leistungswandler für alternative Energiesysteme in zivilen Flugzeugkabinen FKZ: 20K1101M	Issue: 1
		Datum: 15.06.2016

**ZE:** Advanced Space Power Equipment GmbH    **Förderkennzeichen:** 20K1101M

**Vorhabensbezeichnung:**

**Leistungswandler für alternative Energiesysteme  
in zivilen Flugzeugkabinen**

**Laufzeit des Vorhabens:** 01.01.2012 bis 31.12.2015

**Berichtszeitraum:** 01.01.2012 bis 31.12.2015

**Datum:** 15.06.2016

**Abschlussbericht**



**Erstellt von:**

Siegfried Lorenz  
 Design & Development  
 ASP Advanced Space Power Equipment GmbH  
 E-Mail: [s.lorenz@asp-equipment.de](mailto:s.lorenz@asp-equipment.de)

Thomas Hintze  
 Head of Business Development  
 ASP Advanced Space Power Equipment GmbH  
 E-Mail: [t.hintze@asp-equipment.de](mailto:t.hintze@asp-equipment.de)

**Freigegeben von:**

---

Projektleiter: (Thomas Hintze)

---

Head of Projects and Development (Martin Blaser)

 Abschlussbericht	Leistungswandler für alternative Energiesysteme in zivilen Flugzeugkabinen FKZ: 20K1101M	Issue: 1
		Datum: 15.06.2016

## Inhaltsverzeichnis

I.	Einleitung und Kurzdarstellung .....	7
I.1	Aufgabenstellung.....	7
I.2	Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde .....	7
I.3	Planung und Ablauf des Vorhabens .....	7
I.4	Wissenschaftlich und technischer Stand, an dem angeknüpft wurde.....	8
I.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	9
II.	Eingehende Darstellung der Ergebnisse des Vorhabens.....	10
II.1	Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele.....	10
II.1.1	Projektmanagement (AP 1.1) .....	10
II.1.2	Trade-offs zur Konzeptoptimierung der Leistungswandler für alternative Energiesysteme in zivilen Flugzeugkabinen (AP1.2) .....	10
II.1.2.1	Vorgehensweise bei der Technischen Realisierung des Vorhabens	11
II.1.2.2	Durchführung Trade Offs zur Designoptimierung	11
II.1.2.3	Technische Umsetzung des alternativen Energiesystems in Flugzeugkabinen	12
II.1.2.3.1	DC/DC Konverter Modul.....	13
II.1.2.3.2	115V / 400 Hz Wechselrichter Modul.....	13
II.1.2.3.3	Testdurchführung .....	14
II.1.2.3.3.1	270V DC System .....	14
II.1.2.3.3.2	3 x 115V / 400Hz System.....	14
II.1.3	Entwicklung, Fertigung und Test des DC/DC Konverter Moduls .....	15
II.1.3.1	Entwicklung DC/DC Konverter Modul (AP 1.2)	15
II.1.3.1.1	Durchführung der Trade-offs .....	15
II.1.3.1.2	Elektrische und mechanische Entwicklung .....	15
II.1.3.1.3	Erstellung Schaltplan und Layout .....	20
II.1.3.1.4	Erstellung der mechanischen Zeichnungen .....	21
II.1.3.1.5	Durchführung der Beschaffung Bauteile, Mechnik und Leiterplatten.....	23
II.1.3.1.6	Erstellung der Fertigungsunterlagen.....	23
II.1.3.2	Fertigung und Inbetriebnahme des DC/DC Konverter Moduls (AP 1.3)	23
II.1.3.2.1	Herstellen der Wickelgüter.....	23
II.1.3.2.2	Bestücken der Leiterplatten mit SMD bzw. THT-Komponenten .....	23
II.1.3.2.3	Elektrische Inbetriebnahme auf Leiterplattenebene .....	23
II.1.3.2.4	Montage der Mechanik und Verdrahten des DC/DC-Leistungswandlers.....	23
II.1.3.2.5	Inbetriebnahme auf Geräteebene.....	24
II.1.3.3	Test / Reporterstellung für den DC/DC Wandler (AP 1.4)	25
II.1.3.3.1	Erstellen der Testprozeduren .....	25
II.1.3.3.2	Betrachtungen zu EMV.....	25

 Abschlussbericht	Leistungswandler für alternative Energiesysteme in zivilen Flugzeugkabinen FKZ: 20K1101M	Issue: 1
		Datum: 15.06.2016

II.1.3.3.3	Durchführung der Full Functional Tests .....	25
II.1.3.3.3.1	Dimensionen DC/DC Konverter Modul.....	26
II.1.3.3.3.2	Elektrische Tests .....	26
II.1.3.3.4	Durchführung der Thermal Tests .....	29
II.1.4	Entwicklung, Fertigung und Test des DC/AC Wechselrichter Moduls .....	31
II.1.4.1	Entwicklung des 3 x 5kW / 115V / 400Hz DC/AC Wechselrichter (AP 1.2)	31
II.1.4.1.1	Durchführen der Trade-offs zur Ermittlung der Architektur.....	31
II.1.4.1.2	Elektrische und mechanische Entwicklung .....	31
II.1.4.1.3	Erstellung Schaltplan und Layout .....	32
II.1.4.1.4	Erstellung der mechanischen Zeichnungen .....	33
II.1.4.1.5	Durchführung der Beschaffung Bauteile, Mechanik und Leiterplatten.....	36
II.1.4.1.6	Erstellung der Fertigungsunterlagen.....	36
II.1.4.2	Inbetriebnahme 3x5kW DC/AC Leistungswandler 115V 400Hz (AP 1.3)	36
II.1.4.2.1	Herstellen der Wickelgüter.....	36
II.1.4.2.2	Bestücken der Leiterplatten mit SMD bzw. THT-Komponenten .....	36
II.1.4.2.3	Elektrische Inbetriebnahme auf Leiterplattenebene .....	36
II.1.4.2.4	Montage der Mechanik und Verdrahten des DC/AC-Leistungswandlers.....	36
II.1.4.2.5	Inbetriebnahme auf Geräteebene.....	37
II.1.4.2.6	Testbetrieb der Leistungskette mit Lastsimulator.....	38
II.1.4.3	Test / Reporterstellung für die 3 x 5kW 115V DC/AC Leistungskette (AP 1.4)	40
II.1.4.3.1	Erstellen der Testprozeduren .....	40
II.1.4.3.2	Betrachtungen zu EMV.....	40
II.1.4.3.3	Durchführung des Full Functional Tests .....	40
II.1.4.3.3.1	Dimensionen DC/AC Wechselrichter im Gehäuse „Version V01“.....	41
II.1.4.3.3.2	Elektrische Tests .....	42
II.1.4.3.4	Full Functional Test bei reduzierter Last.....	70
II.1.4.3.4.1	Dimension DC/AC Wechselrichtergehäuse V02.....	70
II.1.4.3.4.2	Elektrische Tests .....	72
II.2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....	76
II.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....	77
II.4	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere bzgl. der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans.....	77
II.5	Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	78
II.6	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses.....	78
III.	Anlage I – Kurzgefasster Erfolgskontrollbericht .....	79
III.1	Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen.....	79
III.2	Wissenschaftlich-technische Ergebnisse des Vorhabens, erreichte Nebenergebnisse und wesentliche gesammelte Erfahrung .....	79
III.3	Fortschreibung des Verwertungsplans.....	82

 Abschlussbericht	Leistungswandler für alternative Energiesysteme in zivilen Flugzeugkabinen FKZ: 20K1101M	Issue: 1
		Datum: 15.06.2016

III.4	Arbeiten, die zu keiner Lösung führten .....	83
III.5	Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer .....	83
III.6	Einhaltung von Kosten- und Zeitplanung .....	83
IV.	Anlage II – Berichtsblatt und Document Control Sheet .....	84

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung I-1: Powermodul für Brennstoffzellennotversorgung.....	9
Abbildung II-1: Blockschaltbild alternatives Energiesystem AC Ausgang.....	10
Abbildung II-2: Blockschaltbild alternatives Energiesystems AC & DC Ausgang.....	12
Abbildung II-3: Blockschaltbild der modularen Leistungswandler mit DC & AC Ausgang.....	13
Abbildung II-4: Simulationsergebnisse Leistungsstufe LLC .....	16
Abbildung II-5: Simulationsergebnisse Buck Regeldynamik .....	17
Abbildung II-6: Beispiel Design LLC Leistungsübertrager .....	19
Abbildung II-7: Beispiel Fertigstellungszeichnung für LLC Leistungsübertrager.....	19
Abbildung II-8: Funktionszuordnung der Leiterplatten.....	20
Abbildung II-9: PCB1 Layout Leistungselektronik LLC & Buck-Regler.....	21
Abbildung II-10: PCB2 Layout Ansteuerelektronik LLC-Converter & Buck-Regler .....	21
Abbildung II-11: Interface Zeichnung 1206-ASP-IC-10000A00 .....	22
Abbildung II-12: DC/DC Leistungswandler mit abgenommenem Gerätedeckel .....	24
Abbildung II-13: Assemblierte PCB2 Ansteuerelektronik LLC-Converter und Buck.....	24
Abbildung II-14: : 7,5 kW DC/DC Leistungswandlermodul mit 270V-Abgriff.....	25
Abbildung II-15: Messkurve Gesamtwirkungsgrad DC/DC Leistungswandler .....	26
Abbildung II-16: Messkurve Stabilität Ausgangsspannung über Last.....	27
Abbildung II-17: Dynamisches Strom-/Spannungsverhalten am LLC Leistungsübertrager .....	28
Abbildung II-18: Dynamisches Strom-/Spannungsverhalten der Buck Leistungsstufe.....	28
Abbildung II-19: Messung Regeldynamik 270V Ausgangsspannung .....	29
Abbildung II-20: Thermaltest – gemessene Temperaturen LLC und Buck .....	30
Abbildung II-21: Funktionszuordnung der Leiterplatten.....	32
Abbildung II-22: Interface Zeichnung 1117-ASP-TA-10000A00 (Version V01).....	34
Abbildung II-23: Anordnung der 3 Phasen im Gehäuse .....	35
Abbildung II-24: Aufbau des 3-phasigen Wandlers .....	37
Abbildung II-25: Blockschaltbild Testaufbau .....	38
Abbildung II-26: Aufbau des 115V 400 Hz Lastsimulators .....	39
Abbildung II-27: 3 x 115VAC / 400Hz DC/AC Wechselrichtermodul .....	40
Abbildung II-28: Leistungskette mit Wechselrichter (linkes Gerät) und 4 DC/DC-Konvertern ....	41
Abbildung II-29: Leistungswandler im Testaufbau .....	42
Abbildung II-30: Gesamtwirkungsgrad der Leistungskette .....	43
Abbildung II-31: Wirkungsgrad des DC/AC Wechselrichters.....	44
Abbildung II-32: Start-up Timing (1).....	45

 Abschlussbericht	Leistungswandler für alternative Energiesysteme in zivilen Flugzeugkabinen FKZ: 20K1101M	Issue: 1
		Datum: 15.06.2016

Abbildung II-33: Start-up Timing (2).....	45
Abbildung II-34: Start-up Timing (3).....	46
Abbildung II-35: Start-up Timing (4).....	46
Abbildung II-36: Ausgangsspannung und Frequenz im Leerlauf.....	47
Abbildung II-37: Ausgangsspannung und Phasenlage im Leerlauf .....	47
Abbildung II-38: Modulation der Spannungsamplituden im Leerlauf (1).....	48
Abbildung II-39: Modulation der Spannungsamplituden im Leerlauf (2).....	49
Abbildung II-40: Modulation der Spannungsamplituden im Leerlauf (3).....	49
Abbildung II-41: Harmonische Oberschwingung Phase L1 bei Leerlauf (1) .....	50
Abbildung II-42: Harmonische Oberschwingung Phase L1 bei Leerlauf (2) .....	50
Abbildung II-43: Harmonische Oberschwingung Phase L1 bei Leerlauf (3) .....	51
Abbildung II-44: Ausgangsspannung und Frequenz bei Volllast .....	52
Abbildung II-45: Amplitude und Phase unter Volllast (1).....	53
Abbildung II-46: Amplitude und Phase unter Volllast (2).....	53
Abbildung II-47: Modulation der Spannungsamplituden bei Volllast (1) .....	54
Abbildung II-48: Modulation der Spannungsamplituden bei Volllast (2) .....	54
Abbildung II-49: Modulation der Spannungsamplituden bei Volllast(3) .....	55
Abbildung II-50: Harmonische Oberschwingung der Phase L1 bei Volllast (1).....	56
Abbildung II-51: Harmonische Oberschwingung der Phase L1 bei Volllast (2).....	56
Abbildung II-52: Harmonische Oberschwingung der Phase L1 bei Volllast (3).....	57
Abbildung II-53: Lastwechsel mit 3 Lastsegmenten je Phase (Abschalten 3 x 3,4kW).....	58
Abbildung II-54: Lastwechsel mit 5 Lastsegmenten je Phase (Einschalten 3 x 5,7kW) (1).....	58
Abbildung II-55: Lastwechsel mit 5 Lastsegmenten je Phase (Einschalten 3 x 5,7kW) (2).....	59
Abbildung II-56: Lastwechsel mit 5 Lastsegmenten je Phase (Einschalten 3 x 5,7kW) (3).....	59
Abbildung II-57: Lastwechsel mit 5 Lastsegmenten je Phase (Abschalten 3 x 5,7kW) (1).....	60
Abbildung II-58: Lastwechsel mit 5 Lastsegmenten je Phase (Abschalten 3 x 5,7kW) (2).....	60
Abbildung II-59: Crest Factor Messung .....	61
Abbildung II-60: Unbalance Anforderung (ABD0100.1.8).....	62
Abbildung II-61: Unbalance Messung (1).....	62
Abbildung II-62: Unbalance Messung (2).....	63
Abbildung II-63: Frequenzspektrum am Konverter DC-Eingang bei Load Unbalance .....	64
Abbildung II-64: Anforderung Power Factor (ABD0100.1.8).....	65
Abbildung II-65: Power Factor – Induktive Last (1) .....	66
Abbildung II-66: Power Factor – Induktive Last (2) .....	66
Abbildung II-67: Spektrum des Eingangsstroms der DC/DC-Konverter bei PF = 0,7 (1) .....	67
Abbildung II-68: Spektrum des Eingangsstroms der DC/DC-Konverter bei PF = 0,7 (2) .....	68
Abbildung II-69: Beispiel spektrale Darstellung der Wechselfspannung an Phase L1 .....	69
Abbildung II-70: Spektrale Darstellung des Konverter-Eingangsstromes .....	69
Abbildung II-71: Interface Zeichnung 1117-ASP-TA-20000A00 (Version V02).....	71

 Abschlussbericht	Leistungswandler für alternative Energiesysteme in zivilen Flugzeugkabinen FKZ: 20K1101M	Issue: 1
		Datum: 15.06.2016

Abbildung II-72: Gesamtwirkungsgrad der Leistungskette mit 2 DC/DC-Konverter.....	72
Abbildung II-73: Lastwechsel mit 3 Lastelementen je Phase .....	73
Abbildung II-74: Unbalance Messung bei Teillast (1) .....	74
Abbildung II-75: Unbalance Messung bei Teillast (2) .....	74
Abbildung III-1: Blockschaltbild alternatives Energiesystems AC & DC Ausgang.....	80

### Tabellenverzeichnis

Tabelle II-1: Mechanische Daten DC/DC Konverter Modul .....	26
Tabelle II-2: Thermal Test – Positionierung der Temperaturfühler .....	30
Tabelle II-3: Lastsimulation.....	38
Tabelle II-4: Mechanische Daten Wechselrichter.....	41
Tabelle II-5: Leistungsaufnahme im Leerlauf .....	43
Tabelle II-6: Gesamtwirkungsgrad der Leistungskette .....	43
Tabelle II-7: Berechneter Wirkungsgrad des DC/AC-Wechselrichters: .....	44
Tabelle II-8: Messdaten aus Spannung, Frequenz und Phase.....	48
Tabelle II-9 Bewertung der Messdaten aus Spannung, Frequenz und Phase.....	48
Tabelle II-10: Bewertung der Amplitudenmodulation im Leerlauf .....	49
Tabelle II-11: Bewertung Oberschwingungen bei Leerlauf.....	51
Tabelle II-12: Bewertung Ausgangsspannung und Frequenz bei Vollast .....	52
Tabelle II-13: Bewertung Amplituden und Phasenlage .....	53
Tabelle II-14: Bewertung der Amplitudenmodulation bei Vollast .....	55
Tabelle II-15: Bewertung Oberschwingungsmessung bei Vollast.....	57
Tabelle II-16: Bewertung der Lastwechsel.....	60
Tabelle II-17: Bewertung Crest Factor .....	61
Tabelle II-18: Bewertung der Messergebnisse bei Load Unbalance .....	63
Tabelle II-19: Auswirkung der Load Unbalance auf den-Konverter-Eingang .....	64
Tabelle II-20: Bewertung der Power Factor Messung .....	67
Tabelle II-21: Bewertung der Spektralanalyse des Konverter-Eingangsstroms.....	68
Tabelle II-22: Leistungsaufnahme im Leerlauf .....	72
Tabelle II-23: Gesamtwirkungsgrad .....	72
Tabelle II-24: Bewertung der Messergebnisse bei Load Unbalance unter Teillast .....	75
Tabelle II-25: Zahlenmäßiger Nachweis .....	76

 Abschlussbericht	Leistungswandler für alternative Energiesysteme in zivilen Flugzeugkabinen FKZ: 20K1101M	Issue: 1
		Datum: 15.06.2016

## I. Einleitung und Kurzdarstellung

### I.1 Aufgabenstellung

Das Ziel, dieses Vorhabens, war die Entwicklung eines 15kW Leistungswandlers im Rahmen der „Distributed Autonomous Cabin Power“ (DACAPO) für alternative Energiesysteme in zivilen Flugzeugkabinen. Im Schwerpunkt sollte eine Basistechnologie mit Ausrichtung auf das Ziel einer nachhaltigen Luftfahrt erforscht werden. Dabei entscheidend zu verbessernde Parameter waren

- Gewicht
- Baugröße
- Leistungsdichte
- Gesamtwirkungsgrad

unter Anwendung neuer auf dem Markt erhältlichen Siliciumcarbiddioden. Angestrebt wurde dabei die Optimierung eines solchen Leistungswandlers über bisherige technische Grenzen hinaus. Der Anteil der Firma ASP-Equipment GmbH besteht aus dem Leistungswandler, der im Rahmen der Energieautarken Galley erforderlich ist und zwar in der Form eines DC/DC und eines DC/AC Wandlers.

Als Ergebnis des Vorhabens sollte ein etwa TRL-Level 4 entsprechender Demonstrator des Leistungswandlers gebaut werden, der in „Fit, Form und Funktion“ der späteren Flugeinheit entspricht, jedoch noch keine Flugstandards erfüllt.

### I.2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Alle Phasen des Vorhabens wurden ausschließlich bei der ASP Equipment GmbH durchgeführt, ohne Einbindung weiterer Firmen oder Institute. Dabei wurden jedoch alle Interfaces und Funktionen mit dem Vorbundführer Diehl Aerospace sorgsam abgestimmt. Die Firma ASP besitzt sowohl die technischen Anlagen als auch das qualifizierte Personal, um solch ein Vorhaben zielführend abzuarbeiten.

### I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Arbeiten an diesem Vorhaben wurden in die folgenden 4 Arbeitspakete unterteilt.

#### Arbeitspaket 1.1 – Projektmanagement

- Durchführen aller Projektleitungsaktivitäten
- Organisation und Abstimmung mit dem Kunden
- Zeit- und Kostenplanung
- Management interner und externer Ressourcen

#### Arbeitspaket 1.2 – Entwicklung der Leistungswandlers

- Durchführen der Trade-offs zur Ermittlung der Architektur
- Elektrische Entwicklung
- Mechanische Entwicklung
- Erstellen der Layouts
- Erstellen der mechanischen Zeichnungen
- Durchführen der Beschaffung für Bauteile, Mechanik und Leiterplatten
- Erstellung der Fertigungsunterlagen

 Abschlussbericht	Leistungswandler für alternative Energiesysteme in zivilen Flugzeugkabinen FKZ: 20K1101M	Issue: 1
		Datum: 15.06.2016

#### Arbeitspaket 1.3 – Fertigung und Inbetriebnahme des Leistungswandlers

- Herstellen der Wickelgüter
- Bestücken der Leiterplatten mit SMD Komponenten
- Bestücken der Leiterplatten mit THT Komponenten
- Inbetriebnahme auf Leiterplattebene
- Montage der Mechanischen Komponenten
- Verdrahten des Leistungswandlers
- Inbetriebnahme auf Geräteebene

#### Arbeitspaket 1.4 – Test / Reporterstellung für den Leistungswandler

- Erstellen der Testprozeduren
- Erstellen der Betrachtungen zu EMV
- Durchführen des Full Functional Test
- Durchführen des Thermaltest
- Erstellen der Testreports
- Erstellen des Abschlußberichts
- Kompilieren der Reports und Versand des Leistungswandlers

### **I.4 Wissenschaftlich und technischer Stand, an dem angeknüpft wurde**

Zur Erzeugung einer geregelten 3-Phasen AC Spannung aus einer DC Quelle im Nennleistungsbereich werden analoge Schaltregler eingesetzt. Diese Regler werden mit sog. IGBT Transistoren und marktüblichen Siliziumdioden aufgebaut. Für die Funktion des Leistungswandlers ist es darüber hinaus notwendig, die Eingangsspannung mit einer möglichst hohen Schaltfrequenz zu zerlegen. Die Höhe der Schaltfrequenz wird durch die physikalischen Eigenschaften der Siliziumdioden limitiert und liegt derzeit typischerweise in der Größenordnung von 30kHz.

Baugröße und Gewicht hängen dabei unter anderem von der Schaltfrequenz des Reglers ab. Je größer die Frequenz, desto kleiner und leichter wird die Leistungsstufe. Für dieses Vorhaben werden neuartige Siliciumcarbid-Dioden (SiC) verwendet, die weitaus höhere Schaltfrequenzen erlauben und seit kurzem auch für hohe Leistungen in entsprechender Qualität auf dem Markt verfügbar sind. Die, die SiC-Dioden umgebende Schaltung muß jedoch für hohe Schaltfrequenzen entwickelt werden.

Durch den Einsatz dieser Technik kann die Schaltfrequenz auf ca. 120kHz erhöht werden. Dies führt zu einer sehr erheblichen Reduktion des Gewichts (ca. 30% bis 40%) und des Bauvolumens (ca. 30% bis 40%). Gleichzeitig werden dabei die Leistungsdichte und der Wirkungsgrad auf das technisch maximal erreichbare Niveau angehoben.

 Abschlussbericht	Leistungswandler für alternative Energiesysteme in zivilen Flugzeugkabinen FKZ: 20K1101M	Issue: 1
		Datum: 15.06.2016

ASP Equipment hat im Jahr 2010 ein Projekt für die Entwicklung und Erprobung eines Powermoduls (Abbildung 1) für Brennstoffzellennotversorgung bis 60kW in der zivilen Luftfahrt mit dem Kunden Liebherr erfolgreich durchgeführt. Die Leistungsparameter sind:

- Eingangsspannung: 40 bis 110VDC (au seiner Brennstoffzelle)
- Eingangsstrom: 600A
- Ausgangsspannung: 115V, 400Hz, Drehstrom, 3x 175A, 3x 20KW
- Wirkungsgrad: 92%
- Masse: 48Kg



Abbildung I-1: Powermodul für Brennstoffzellennotversorgung

## I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Keine

 Abschlussbericht	Leistungswandler für alternative Energiesysteme in zivilen Flugzeugkabinen FKZ: 20K1101M	Issue: 1
		Datum: 15.06.2016

## II. Eingehende Darstellung der Ergebnisse des Vorhabens

### II.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Im Folgenden werden die erreichten Ergebnisse entsprechend den Arbeitspaketen, beschrieben in Kapitel I.3, ausführlich dargestellt.

Planung und Ablauf wurden entsprechend der Arbeitspakete durchgeführt und in enger Anlehnung an diese beschrieben.

#### II.1.1 Projektmanagement (AP 1.1)

Alle Schnittstellenabsprachen, insbesondere Modularitätsüberlegungen und Trade-off Ergebnisse wurden vor der Realisierung zwischen ASP-Projektleitung und dem Verbundführer abgestimmt.

Der Zeitrahmen wurde in Abstimmung mit dem Vorhabensführer DIEHL und nach Genehmigung des Projektträgers kostenneutral verlängert.

Die Aufgabe konnte unter ausschließlicher Nutzung interner Erfahrungen und Expertisen und der in diesem Vorhaben gewonnenen Erkenntnisse erfolgreich abgeschlossen werden.

#### II.1.2 Trade-offs zur Konzeptoptimierung der Leistungswandler für alternative Energiesysteme in zivilen Flugzeugkabinen (AP1.2)

Das Teilvorhaben besteht aus einem Leistungswandler zum eingangsseitigen Anschluss an ein Li-Ion Akkusystem mit einer DC Spannung im Bereich von 137V bis 216V. Ausgangsseitig werden die für eine Bordspannung üblichen Parameter (3x115VAC, Drehstrom, 400Hz) eingestellt.

Das folgende Blockschaltbild Abbildung II-1 zeigt die gesamte Leistungskette des alternativen Energiesystems. Die Primärenergie der Brennstoffzelle (1) wird mit dem Boost Converter (2) in eine geregelte Batterie-Zwischenkreisspannung gewandelt. Die mittlere Leistung der Brennstoffzelle beträgt ca. 5kW. Die geladene Batterie (3) kann eine Spitzenleistung von 10kW liefern, was in Summe das typischen Spitzenlastprofil der Verbraucher mit 15kW am Leistungsausgang bereit stellt.

Ein nachgeschalteter LLC Konverter (Resonanzwandler) (4) wandelt die Batteriespannung in zwei galvanisch getrennte Gleichspannungen um, die dem 115V / 400Hz Wechselrichter (5) als Eingangsleistung zur Verfügung stehen.

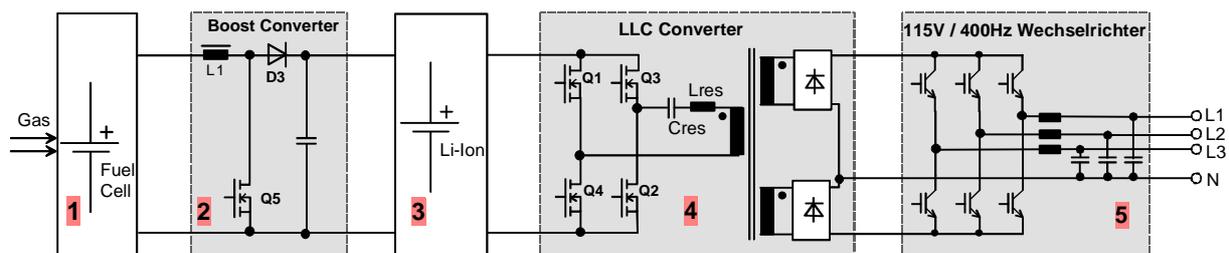


Abbildung II-1: Blockschaltbild alternatives Energiesystem AC Ausgang

 Abschlussbericht	Leistungswandler für alternative Energiesysteme in zivilen Flugzeugkabinen FKZ: 20K1101M	Issue: 1
		Datum: 15.06.2016

Die beiden Wandler LLC Converter (4) und der Wechselrichter (5) sind Umfang des hier beschriebenen Vorhabens.

#### II.1.2.1 Vorgehensweise bei der Technischen Realisierung des Vorhabens

Um mit zukünftigen Hochvolt-Bordnetzen kompatibel zu sein, wurde vorgeschlagen, dass gleichzeitig der alternative Abgriff einer +/-270V DC Spannung zur Verfügung gestellt wird. Dabei beträgt die mit dem Demonstrator geplante Leistungsumsetzung insgesamt 2 x 7,5kW Gleichspannung oder 3 x 5kVA = 15kVA Wechselspannung.

Hochvolt Bordnetze (+/- 270 VDC) für Luftfahrtanwendung sind zukunftsfähig und werden mittelfristig den 3 x 115VAC Drehstrom Standard zum großen Teil ersetzen. Der Vorteil liegt in der hohen Effizienz bedingt durch kleinere Ströme bei gleicher Leistung.

Die Entwicklung des Leistungswandlers berücksichtigt diese Tatsache, in dem Gewicht und Wirkungsgrad auf den +/-270 VDC Abgriff bestmöglich optimiert wurde.

Die Realisierung des Vorhabens wurde in folgenden Schritten durchgeführt:

- Durchführung Trade Offs zur Designoptimierung
- Entwicklung des Leistungswandlers mit Erstellung Schaltplan
- Materialbeschaffung
- Bestücken der Leiterplatten
- Elektrische Inbetriebnahme
- Test und Dokumentation

#### II.1.2.2 Durchführung Trade Offs zur Designoptimierung

Zu Beginn der Studie waren die Zielvorgaben wie folgt:

- LLC-Konverter
  - ✓ Der Leistungswandler wird als Modul aufgebaut.
  - ✓ Die Ausgänge des Leistungswandlers müssen kurzschlussfest sein.
  - ✓ Eingangsspannungsbereich 137V – 216V DC
  - ✓ Ausgang Potentialtrennung / 15 kW
  - ✓ Größe eines 15 kW Moduls geschätzt 470mm x 280mm x 150mm
  - ✓ Bauvolumen 19,7 dm<sup>3</sup>
  - ✓ Masse eines 15 kW Modules 16,9 kg
- 115V/400Hz - Wechselrichter
  - ✓ Der Leistungswandler wird als Modul aufgebaut.
  - ✓ Die Ausgänge des Leistungswandlers müssen kurzschlussfest sein.
  - ✓ Eingangsspannungsbereich Ausgang LLC
  - ✓ Ausgangsspannungsbereich Drehstrom 3 x 115 V / 400 Hz
  - ✓ Ausgangsleistung 3 x 5 kW
  - ✓ Größe eines 3 x 5kW DC-AC Moduls geschätzt 500mm x 450mm x 200mm
  - ✓ Bauvolumen 45 dm<sup>3</sup>
  - ✓ Masse eines 3 x 5kW Modules 29 kg

Bei den Trade-offs wurden die technischen Anforderungen für Ströme, Spannungen, und Leistung analysiert. Die Anforderungen an die Leistungsbauteile (Halbleiter und Passive Bauteile) ermittelt und die am besten passenden Komponenten ausgewählt. Hierbei wurde auch die Verfügbarkeit auf dem Markt analysiert.

Der Einsatz der Siliciumcarbid-Dioden (SiC) im LLC-Converter und Buck 270V bei hohen Taktfrequenzen sollte den Wirkungsgrad der Leistungselektronik im Vergleich zu den Hyper-Fast Recovery Dioden deutlich verbessern.

Ein weiterer Vorteil wird in der Einsparung von Volumen und Gewicht erwartet, da beim Einsatz der SiC-Technologie ebenfalls eine Reduzierung des Kühlaufwandes erreicht werden kann.

Im Zuge der Trade Offs wurden auch diverse Schaltungsteile in Orcad P-Spice modelliert und analog simuliert. Dies war notwendig um sicher zu stellen, dass vor der eigentlichen Schaltplan- / Layouterstellung die geplanten Topologien funktionieren und die geforderte Performance erreicht wird.

Gleichzeitig sollen Masse, Volumen und Wirkungsgrad des Leistungswandlers bestmöglich optimiert werden.

### II.1.2.3 Technische Umsetzung des alternativen Energiesystems in Flugzeugkabinen

Bei der Durchführung der Trade Offs stellte sich heraus, dass es Vorteile bringt, den einen LLC Wandler zur Erzeugung der beiden galvanisch getrennten DC Ausgangsspannungen (Abbildung II-1) in 2 Module (Abbildung II-2) zu teilen. Dadurch wird jeder der beiden Teilspannungen ein eigener LLC Wandler zugeordnet.

Der Grund für die Aufteilung in 2 x 7,5 kW LLC-Module liegt sowohl in der Stromfähigkeit der Leistungshalbleiter als auch in den verfügbaren Kernvolumen für Transformatoren und Drosseln.

Weiterhin ist im verfeinerten Blockschaltbild (Abbildung II-2) ersichtlich, wie ein nachfolgender universeller Wandler entwickelt werden kann, der sowohl 3 x 115VAC / 400Hz / 15kVA bereit stellt oder alternativ +/- 270 VDC / 15kW ausgeben kann.

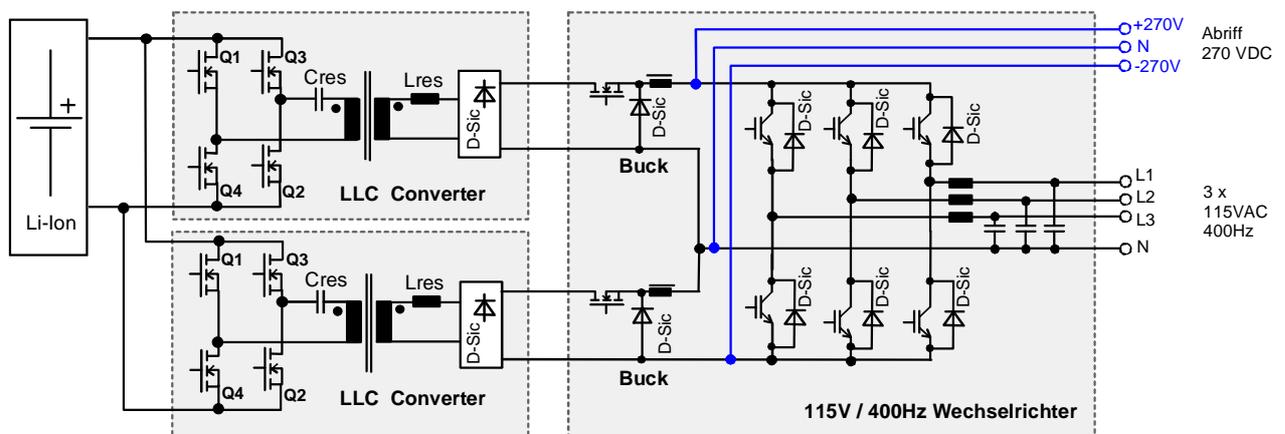


Abbildung II-2: Blockschaltbild alternatives Energiesystems AC & DC Ausgang

 Abschlussbericht	Leistungswandler für alternative Energiesysteme in zivilen Flugzeugkabinen FKZ: 20K1101M	Issue: 1
		Datum: 15.06.2016

### II.1.2.3.1 DC/DC Konverter Modul

Die Aufteilung in 2 DC/DC-Module führte zur Überlegung, die Funktion des Buck-Reglers und damit die Erzeugung der geregelten 270 VDC räumlich ebenfalls im bisherigen LLC-Konverter Modul zu integrieren.

Dies führt zu weiteren modularen Vorzügen:

- Erzeugung der Hochvolt Bordnetzspannung in separaten 270V Modulen je 7,5kW
- Jede 7,5 kW Einheit ist in einem eigenen metallisch geschlossenen Gehäuse untergebracht was eine zusätzliche Elektromagnetische Verträglichkeit sicherstellt.
- Hohe flexible Modularität
- Zur Realisierung der geforderten +/- 270V / 15kW Einheit werden zwei dieser 7,5kW Module sekundärseitig einfach in Reihe geschaltet.
- Zur Leistungserhöhung können auf dem positiven und negativen Ausgang jeweils bis zu 10 Module parallel geschaltet werden.
- Reduzierung von Bauvolumen und Masse durch mögliche kleinere und leichtere Bauteile (in der Hauptsache Spulen und Kondensatoren).

Abbildung II-3 zeigt das Blockschaltbild der modularen Leistungswandler

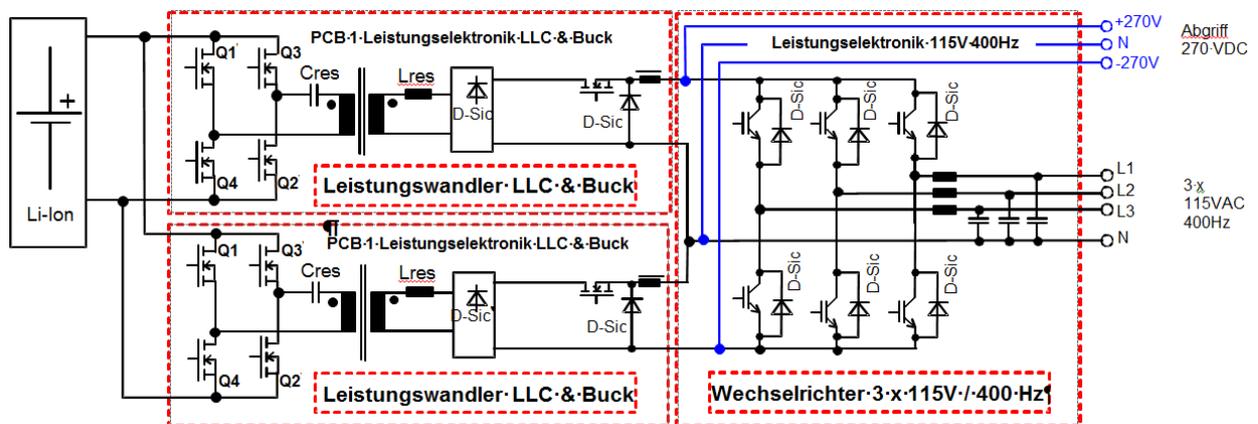


Abbildung II-3: Blockschaltbild der modularen Leistungswandler mit DC & AC Ausgang

### II.1.2.3.2 115V / 400 Hz Wechselrichter Modul

Der letzte Teil in der Leistungskette ist das Wechselrichter-Modul.

Dieses Wechselrichter-Modul wird eingangsseitig durch mindestens zwei 7,5kW-DC/DC-Leistungswandler versorgt. Die beiden Konverter sind ausgangsseitig in Reihe geschaltet und stellen damit zusammen eine Leistung von bis zu 15kW mit +/- 270VDC zur Verfügung (Abbildung II-3).

Die Ausgangsleistung des 3-phasigen Wechselrichters beträgt - abhängig von der maximal möglichen Ausgangsleistung der speisenden DC/DC-Leistungswandler – bis zu 5 kW je Phase bei 115V / 400Hz.

 Abschlussbericht	Leistungswandler für alternative Energiesysteme in zivilen Flugzeugkabinen FKZ: 20K1101M	Issue: 1
		Datum: 15.06.2016

### II.1.2.3.3 Testdurchführung

Im Rahmen der Studie wurde die Anforderung an mechanische und elektrische Performance für die gesamte Leistungskette (DC/DC Konverter bzw. Wechselrichter Modul) nicht spezifiziert.

Testdurchführung und Ergebnisbewertung für das 115V / 400Hz System erfolgten daher in Anlehnung an ABD0100.1.8 (AIRBUS Equipment – Chapter 8 – Power Quality Requirements) und beziehen sich im Wesentlichen auf die in den folgenden Kapiteln aufgeführten Grenzwerte der Ausgangsspannungen.

Die Bewertung der Ausgangsspannung des 270V DC Systems erfolgte in Anlehnung an MIL-STD-704F, da die ABDs den 270VDC Standard noch nicht beschreiben.

#### II.1.2.3.3.1 270V DC System

Steady State Characteristics	Grenzwerte 270V DC
Steady state normal voltage	250 V to 280 V
Normal voltage transients upper limit	330V/20ms to 280V/40ms = steady max. Volts
Normal voltage transients lower limit	200V/10ms to 250V/40ms = steady min. Volts

#### II.1.2.3.3.2 3 x 115V / 400Hz System

Steady State Characteristics	Grenzwerte 115V AC / 400Hz
Steady state voltage	108 V <sub>RMS</sub> to 122 V <sub>RMS</sub>
Voltage unbalance	6,0V <sub>RMS</sub> max.
Voltage modulation	3,5V <sub>RMS</sub> max
Voltage phase difference	116° to 124°
Individual Harmonic Distortion Factor	8%
Crest factor	1,31 to 1,51
DC component	-0,3 to +0,3 V <sub>DC</sub>
Steady state frequency	395 Hz to 405 Hz
Frequency modulation	4 Hz

 Abschlussbericht	Leistungswandler für alternative Energiesysteme in zivilen Flugzeugkabinen FKZ: 20K1101M	Issue: 1
		Datum: 15.06.2016

## II.1.3 Entwicklung, Fertigung und Test des DC/DC Konverter Moduls

### II.1.3.1 Entwicklung DC/DC Konverter Modul (AP 1.2)

#### II.1.3.1.1 Durchführung der Trade-offs

Im Vorgriff wurden bereits Trade-offs bezüglich Funktionalitäten und deren Realisierung im Kapitel II.1.2 durchgeführt.

#### II.1.3.1.2 Elektrische und mechanische Entwicklung

Nach Festlegung der Aufteilung des Leistungswandlers auf die oben definierten Module wurde parallel zur elektrischen Entwicklung auch die mechanische Entwicklung durchgeführt. Hauptaugenmerk wurde dabei auf die Platzierung der Leistungsbaugruppen (Halbleiterschalter, Übertrager und Spulen, Kondensatoren) gelegt. Dabei musste innerhalb des Moduls auf beste Wärmeableitung (Kühlkörper, Lüfter) und Elektromagnetische Verträglichkeit - geschuldet durch die hohen Taktfrequenzen und die magnetischen Leistungsübertrager - geachtet werden, bei gleichzeitiger Minimierung von Gewicht und Bauvolumen.

#### 1. Entwicklungsergebnisse Simulation

Der 7,5kW-DC/DC-Wandler besteht im Wesentlichen aus den zwei Hauptbaugruppen

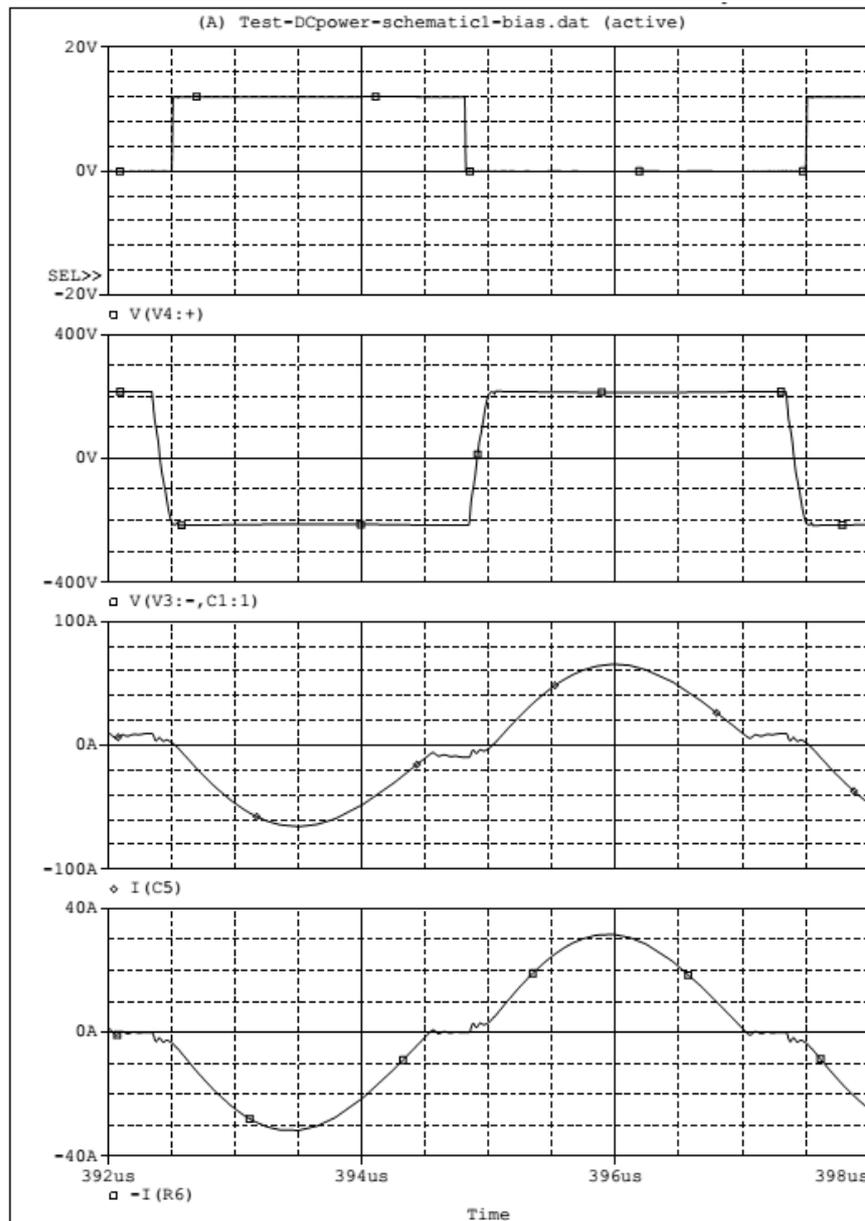
- LLC-Konverter und
- Buck-Regler.

Beide Funktionalitäten wurden getrennt in ORCAD P-Spice modelliert und die Funktionalitäten simuliert.

Die Modelle beinhalten alle Leistungshalbleiter sowie passive Bauteile welche für die Funktionen benötigt werden.

Abbildung II-4 zeigt das Simulationsergebnis LLC Schaltverhalten der MosFets bei 216V Input und 7,5 kW Output:

Abbildung II-5 zeigt das Simulationsergebnis Buck Regeldynamik bei den Bedingungen Input 216V / Buck Lastsprung: Output 75W →7500W → 75W



**Abbildung II-4:** Simulationsergebnisse Leistungsstufe LLC

Das Ergebnis zeigt das gewünschte Schaltverhalten mit einem sinusförmigen Stromverlauf in der Primär- und Sekundärwicklung des Leistungsübertragers.

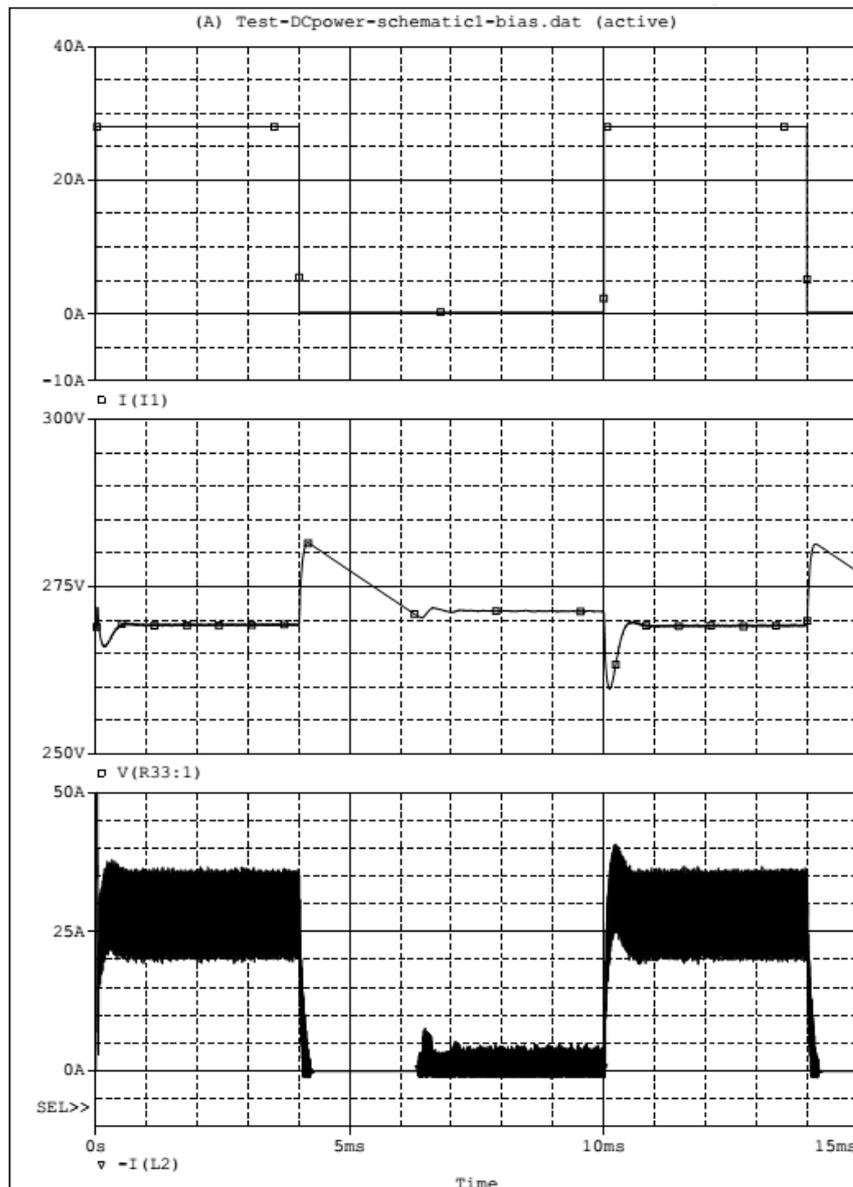
Kanal 1 (oben): Gate Treiber Spannung V4 / MosFet M4 links unten

Kanal 2 (Mitte): Primärspannung Leistungsübertrager

Kanal 3 (Mitte): Primärstrom Leistungsübertrager

Kanal 4 (unten): Sekundärstrom Leistungsübertrager

Durch optimale Auswahl und Kombination von MosFet und SiC Dioden und Anwendung der LLC-Technik (Resonanzwandler) entstehen nur minimale Schaltverluste da die Leistungshalbleiter im Strom-Nulldurchgang schalten.



**Abbildung II-5:** Simulationsergebnisse Buck Regeldynamik

Die Beschaltung des Spannungs- und Stromreglers ist im Modell gut optimiert. Das führt zu kurzen Ausregelzeiten und geringen dynamischen Spannungsabweichungen beim Zu- und Wegschalten der Stromlast.

1. Kanal 1 (oben): DC Ausgang Laststrom
2. Kanal 2 (Mitte): DC Ausgang Spannung
3. Kanal 3 (unten): Strom Buck Drossel

 Abschlussbericht	Leistungswandler für alternative Energiesysteme in zivilen Flugzeugkabinen FKZ: 20K1101M	Issue: 1
		Datum: 15.06.2016

## 1.2 Wirkungsgradberechnungen LLC und Buck-Regler

Nachdem eine vorläufige Dimensionierung der Leistungsbaugruppen erfolgt war, wurden Vorab Berechnungen der Wirkungsgrade und der Verlustleistungen durchgeführt. Diese wurden bei maximaler Leistung (7,5 kW) getrennt für die beiden Leistungsstufen

- LLC-Wandler und
- Buck Regler

durchgeführt.

Der zu erwartende Wirkungsgrad des LLC-Wandlers liegt bei rund 97,7% bei einer gesamten Verlustleistung von 177,6W.

Der zu erwartende Wirkungsgrad des Buck-Reglers liegt bei rund 99% bei einer gesamten Verlustleistung von 72,7W

## 1.3 Dimensionierung Magnetischer Komponenten für LLC

Vor dem Erstellen der Schaltpläne und des PCB Layouts wurden alle Magnetischen Komponenten berechnet, entsprechende Bauvorschriften erstellt und Muster angefertigt. Die Musterfertigung ist notwendig um die Machbarkeit und somit die endgültigen Baugrößen zu verifizieren.

In nachfolgenden Beispiel-Abbildungen (Abbildung II-6, Abbildung II-7 ) ist das Design des LLC Leistungsübertragers ersichtlich.

## 1.4 Dimensionierung Magnetischer Komponenten für Buck-Regler

Vor dem Erstellen der Schaltpläne und des PCB Layouts wurden alle Magnetischen Komponenten berechnet, entsprechende Bauvorschriften erstellt und Muster angefertigt.

### Schematic & Pin Assignment

Important:  
 All X marked pins  
 (8 total)  
 to be removed

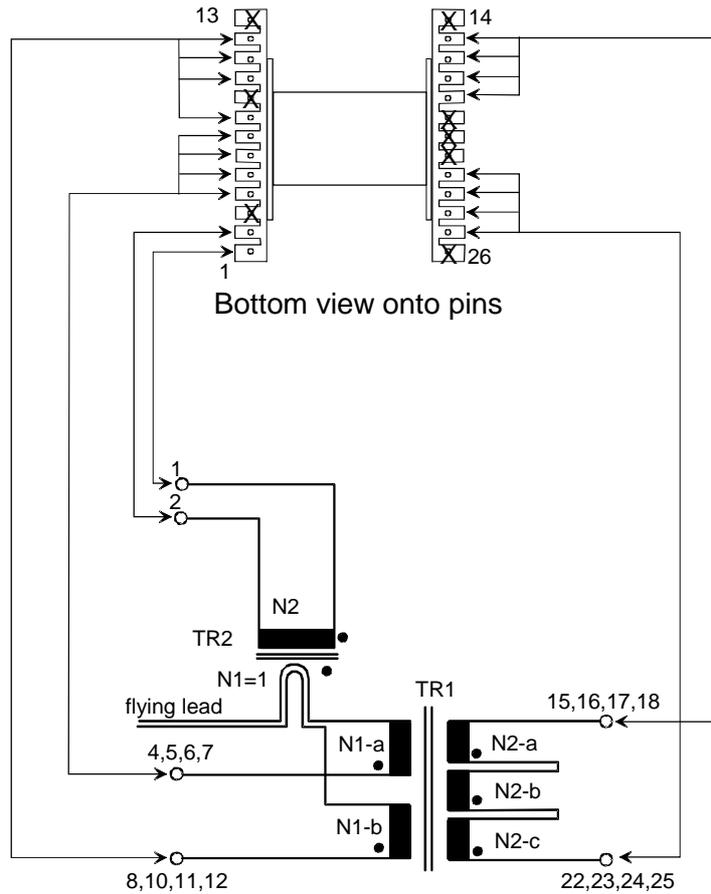
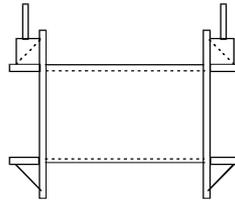


Abbildung II-6: Beispiel Design LLC Leistungsübertrager

### TR1, TR2 final assembly drawing

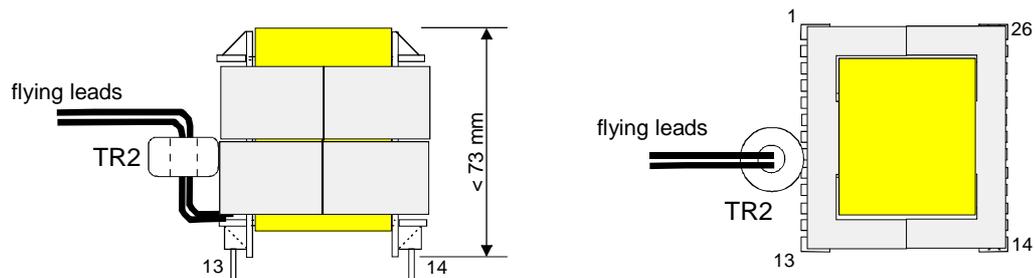


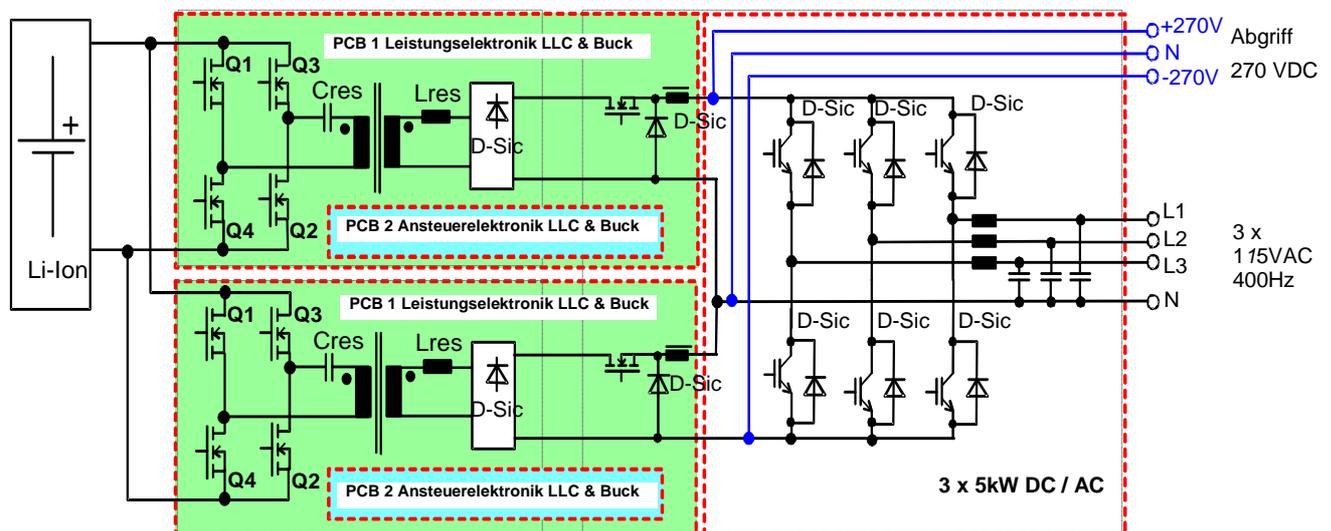
Abbildung II-7: Beispiel Fertigstellungszeichnung für LLC Leistungsübertrager

### II.1.3.1.3 Erstellung Schaltplan und Layout

Nachdem die relevanten Schaltungsteile simuliert waren, wurden die Topologien in technische Stromlaufpläne umgesetzt und die Platinen Layouts entwickelt. Hierbei wurde allzeit großes Augenmerk auf einen optimalen Thermalhaushalt bei minimalem Bauraum und gleichzeitig auch auf Elektromagnetische Verträglichkeit und Wirkungsgrad gelegt.

Für jeden der DC/DC-Wandlermodule werden zwei PCB Layouts mit zugehörigen Schaltplänen erstellt.

In Abbildung II-8 ist die funktionelle Zuordnung der Elektronikplatinen aufgezeigt.



**Abbildung II-8:** Funktionszuordnung der Leiterplatten

PCB1: Beinhaltet die Leistungselektronik für den LLC-Converter und Buck.

PCB2: Beinhaltet die Ansteuerelektronik für den LLC-Converter und Buck.

#### 1. Leistungselektronik LLC-Converter & Buck-Regler

Die Leistungselektronik ist auf einer horizontal angebrachten Platine in zwei Funktionsbereiche aufgeteilt:

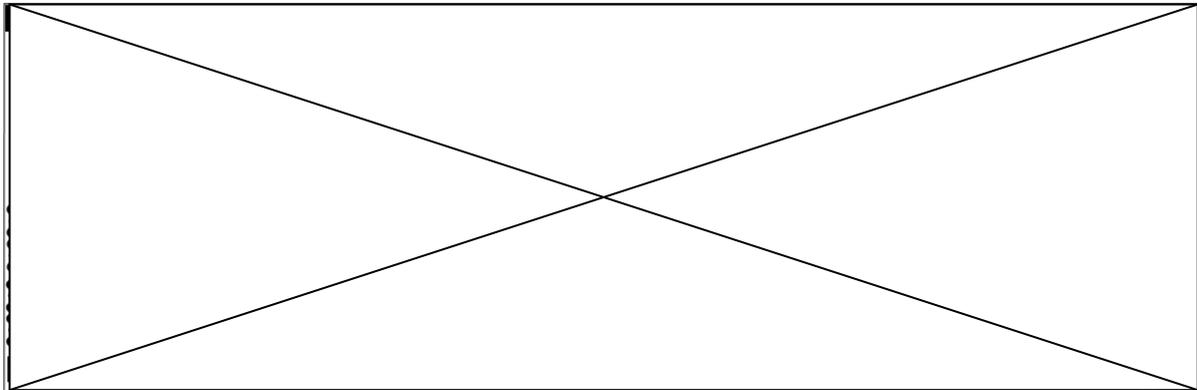
1. Leistungselektronik LLC-Converter und
2. 270V Buck-Regler

Die Bauteile wurden dabei so angeordnet, dass eine größtmögliche interne Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) erreicht wurde.

Die zu kühlenden Leistungsbauteile sind direkt auf isolierten Kühlkörpern montiert um eine optimale Wärmeableitung zu gewährleisten.

 Abschlussbericht	Leistungswandler für alternative Energiesysteme in zivilen Flugzeugkabinen FKZ: 20K1101M	Issue: 1
		Datum: 15.06.2016

In Abbildung II-9 ist das PCB-Layout für die Leistungselektronik für LLC- und Buck-Regler dargestellt.



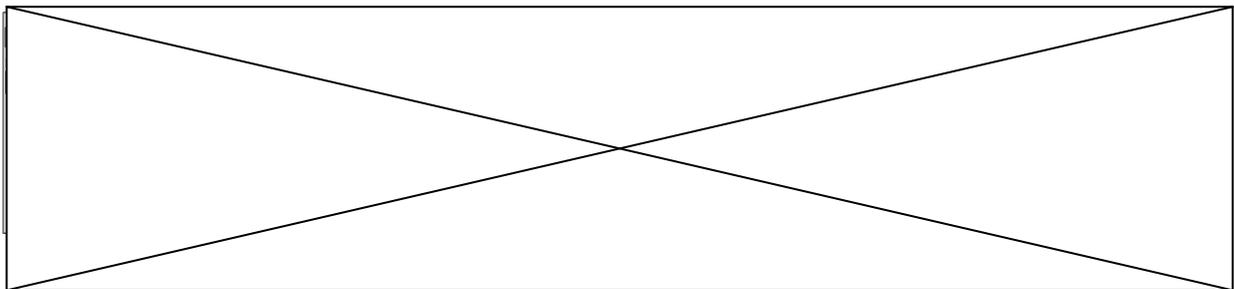
**Abbildung II-9:** PCB1 Layout Leistungselektronik LLC & Buck-Regler

## 2. Ansteuerelektronik LLC-Converter & Buck-Regler

Die Platine der Ansteuerelektronik ist 90° zur Leistungsplatine an einer Box-Seitenwand angebracht. Analog zur Funktionsaufteilung auf der Leistungsplatine wurden auch die Funktionszuordnungen auf der Ansteuerplatine realisiert.

Mit dieser Anordnung sind sowohl kurze Verbindungen zur Leistungselektronik als auch die interne Elektromagnetische Verträglichkeit optimiert.

Abbildung II-10 zeigt das PCB2 Layout für die Ansteuerelektronik von LLC-Converter & Buck-Regler.



**Abbildung II-10:** PCB2 Layout Ansteuerelektronik LLC-Converter & Buck-Regler

### II.1.3.1.4 Erstellung der mechanischen Zeichnungen

Auf Grund der mechanischen Entwicklungsüberlegungen wurde mit Konstruktion und der Festlegung aller Gruppenpositionen begonnen. Der mechanischen Zeichnungssatz wurde erstellt.

Abbildung II-11 zeigt die mechanische Interfacezeichnung des DC/DC-Konverters

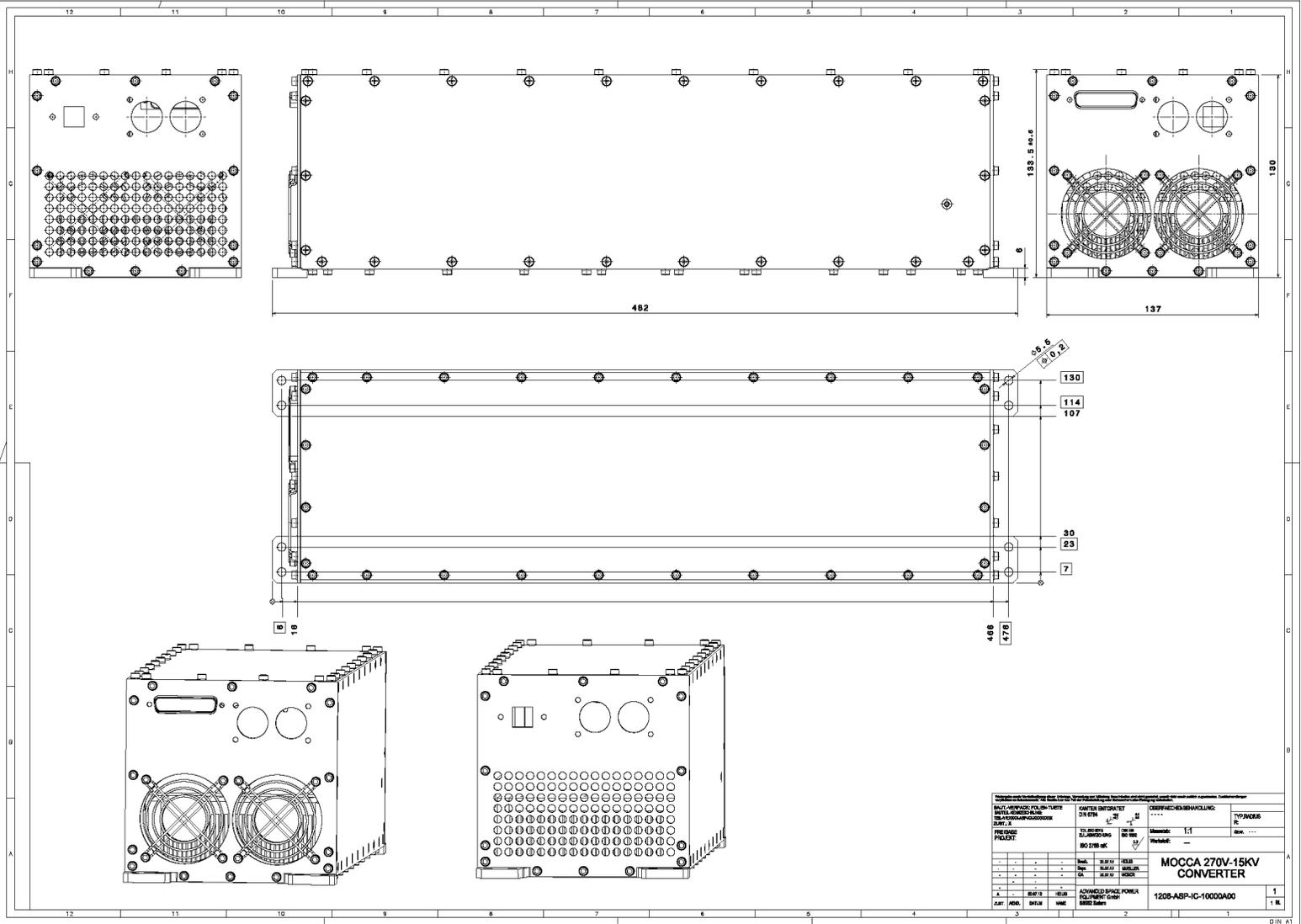


Abbildung II-11: Interface Zeichnung 1206-ASP-IC-10000A00

 Abschlussbericht	Leistungswandler für alternative Energiesysteme in zivilen Flugzeugkabinen FKZ: 20K1101M	Issue: 1
		Datum: 15.06.2016

#### II.1.3.1.5 Durchführung der Beschaffung Bauteile, Mechnik und Leiterplatten

Nach Fertigstellung der technischen Schaltpläne - elektrisch und mechanisch - wurden alle Bauteile, Materialien beschafft und für den Bau der Geräte bereitgestellt. Leiterplatten und mechanische Komponenten wurden bestellt.

#### II.1.3.1.6 Erstellung der Fertigungsunterlagen

Die Fertigungsunterlagen wie Stücklisten, Bestückungslisten für die Leiterplatten, Baugruppen- und Montagezeichnungen wurden gemäß ASP-Standard erstellt und nach dem 4-Augenprinzip kontrolliert und freigegeben.

#### II.1.3.2 Fertigung und Inbetriebnahme des DC/DC Konverter Moduls (AP 1.3)

##### II.1.3.2.1 Herstellen der Wickelgüter

Sämtliche Wickelgüter wurden nach Fertigungsunterlagen im Hause hergestellt und geprüft.

##### II.1.3.2.2 Bestücken der Leiterplatten mit SMD bzw. THT-Komponenten

Die Geräte bestehen aus mehreren verschiedenen Leiterplatten, die in zwei Technologien unterteilt sind.

Die SMD Platinen (Surface Mount Devices) wurden bei ASP auf dem automatischen Bestückplatz montiert und im Reflow Automaten gelötet.

Die THT Platinen (Through Hole Technology) wurden bei ASP von Hand bestückt und auch von Hand gelötet.

##### II.1.3.2.3 Elektrische Inbetriebnahme auf Leiterplattenebene

Die einzelnen Baugruppen wurden von Entwicklungsingenieuren in Betrieb genommen und die Messergebnisse mit den Theoretischen Werten aus der P-Spice Simulation verglichen. Hierbei waren nur noch Anpassungen an der Hardware notwendig um die gewünschte Performance zu erreichen.

##### II.1.3.2.4 Montage der Mechanik und Verdrahten des DC/DC-Leistungswandlers

Nachdem alle Teil-Baugruppen in Betrieb genommen waren, erfolgte die Montage der Leistungsbaugruppen, der mechanischen Komponenten und der bestückten Platinen.

 Abschlussbericht	Leistungswandler für alternative Energiesysteme in zivilen Flugzeugkabinen FKZ: 20K1101M	Issue: 1
		Datum: 15.06.2016

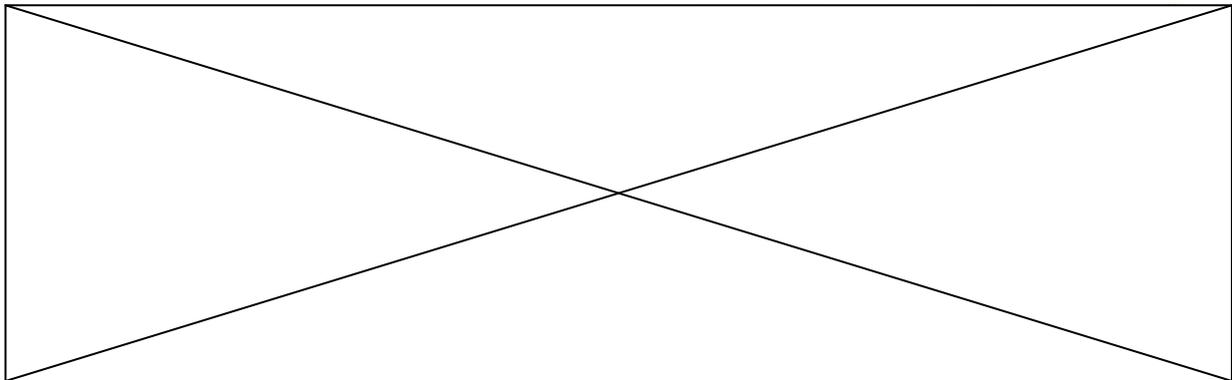
#### II.1.3.2.5 Inbetriebnahme auf Geräteebene

Nach erfolgter Integration wurden alle notwendigen Tests auf Systemebene durchgeführt und dokumentiert.

In den folgenden Bildern werden einige Integrationsdetails dargestellt.

Abbildung II-12: Elektronik DC/DC Leistungswandler

- a) Linke Seite DC-Eingang mit Eingangfilter und anschließender LLC Leistungsstufe
- b) Mitte LLC Leistungsübertrager (Potentialtrennung)
- c) Rechte Hälfte Buck-Regler mit Ausgangsfilter
- d) Innere Seitenwand oben mit PCB2 Ansteuerelektronik

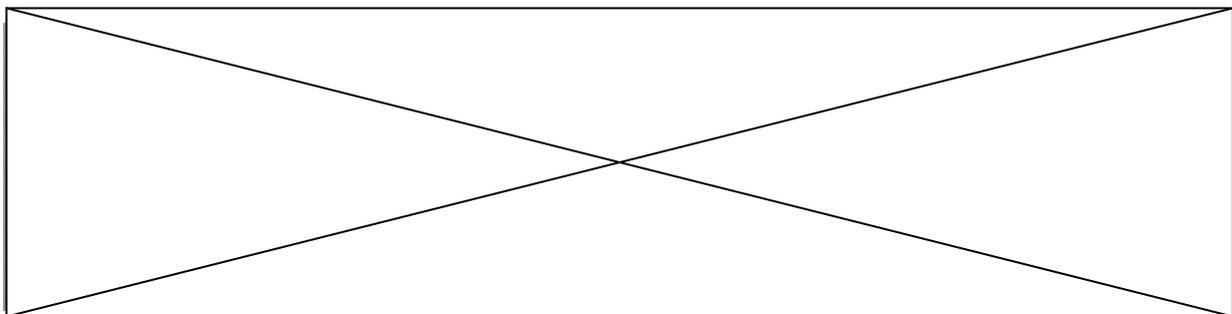


**Abbildung II-12::** DC/DC Leistungswandler mit abgenommenem Gerätedeckel

Die Leistungselektronik für LLC und Buck-Regler sind auf einer durchgehenden Platine untergebracht. Unter der Platine befinden sich getrennte Kühlelemente für die Leistungshalbleiter von LLC und Buck-Regler

Abbildung II-13: PCB2 - Ansteuerelektronik LLC-Converter und Buck-Regler

- Zentral ist der Hilfsübertrager für die interne Versorgung platziert.
- Auf der linken Bestückungshälfte ist Signalelektronik für den LLC-Converter untergebracht.
- Auf der rechten Bestückungshälfte ist Signalelektronik für den Buck 270V untergebracht.



**Abbildung II-13:** Assemblierte PCB2 Ansteuerelektronik LLC-Converter und Buck

Die Bestückung der Leiterplatte erfolgte überwiegend in SMD Technik

 Abschlussbericht	Leistungswandler für alternative Energiesysteme in zivilen Flugzeugkabinen FKZ: 20K1101M	Issue: 1
		Datum: 15.06.2016

### II.1.3.3 Test / Reporterstellung für den DC/DC Wandler (AP 1.4)

#### II.1.3.3.1 Erstellen der Testprozeduren

Die Testprozeduren wurden auf Grundlage ABD0100.1.8 (AIRBUS General Requirements – Power Quality) in EXCEL-Tabellen vorbereitet und durchgeführt.

#### II.1.3.3.2 Betrachtungen zu EMV

Durch den Einsatz der LLC-Technologie (Sinus-Resonanz-Wandler zur Potentialtrennung zwischen DC-Eingang und DC-Ausgang) wird Eingangsseitig nur ein sehr geringer Störsignalanteil erwartet.

Die Regelung der 270V Ausgangsspannung erfolgt mittels nachgeschaltetem Buck-Regler.

Zur weiteren Minimierung der Störpegel an den DC-Eingangsklemmen und den DC-Ausgangsanschlüssen wurden bereits im Design Eingangs- bzw. Ausgangsfilter vorgesehen.

#### II.1.3.3.3 Durchführung der Full Functional Tests

Alle nachfolgenden Tests sind mit einem der beiden 7,5 kW Leistungsmodule LLC & Buck durchgeführt worden.

Abbildung II-14 zeigt ein 7,5 kW DC/DC Konverter Modul



**Abbildung II-14:** : 7,5 kW DC/DC Leistungswandlermodul mit 270V-Abgriff

### II.1.3.3.3.1 Dimensionen DC/DC Konverter Modul

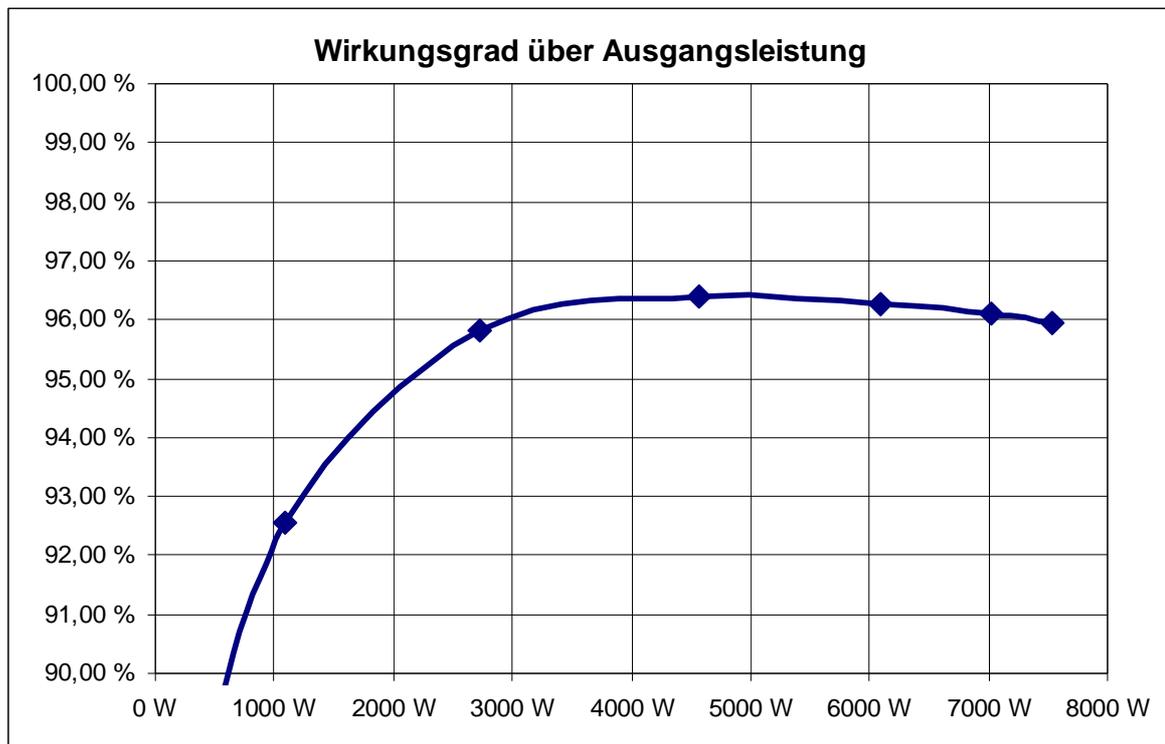
**Tabelle II-1: Mechanische Daten DC/DC Konverter Modul**

Bauvolumen	8,6 dm <sup>3</sup>	einschl. BefestigungsfüÙe
BaugröÙe L x W x H	480 x 137 x 130 (mm)	einschl. BefestigungsfüÙe
Masse	6,47 kg	

### II.1.3.3.3.2 Elektrische Tests

#### 1. Gesamtwirkungsgrad DC/DC Konverter (LLC & Buck)

Testbedingungen: Eingangsspannung 216V  
 Ausgangsspannung 270VDC  
 Leistung 0W bis 7,5kW



**Abbildung II-15:** Messkurve Gesamtwirkungsgrad DC/DC Leistungswandler

Der Einsatz der Siliciumcarbid-Dioden im LLC-Converter und Buck 270V hat den Wirkungsgrad der Leistungselektronik markant verbessert.

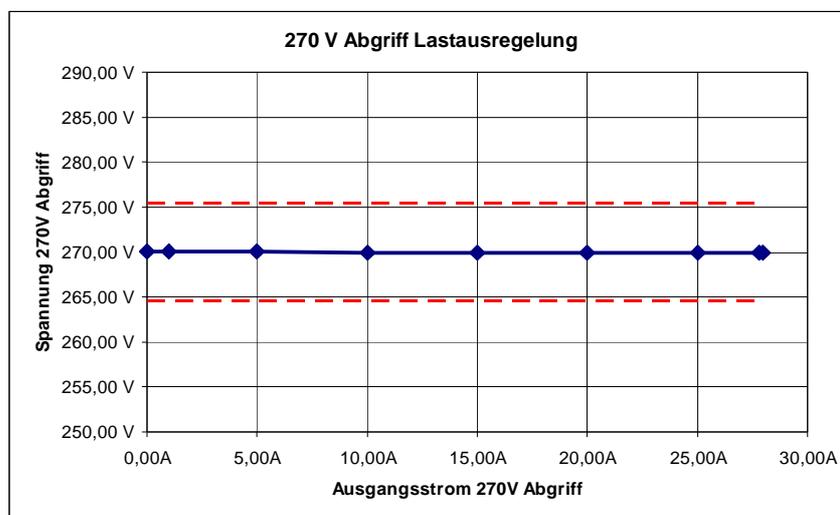
 Abschlussbericht	Leistungswandler für alternative Energiesysteme in zivilen Flugzeugkabinen FKZ: 20K1101M	Issue: 1
		Datum: 15.06.2016

Der gemessene Gesamtwirkungsgrad des zweistufigen Leistungszuges (LLC & Buck in Reihe) liegt in dem großen Lastbereich zwischen  $P = 3000\text{ W}$  und  $P = 7500\text{ W}$  bei  $\geq 96\%$  und deckt sich mit dem berechneten Wert.

Der Wirkungsgrad bei vergleichbaren Topologien mit Hyper-Fast-Recovery Dioden war in der Vergangenheit nur im Bereich von 94%.

Der Vorteil liegt nicht nur in der Ersparnis von Primärenergie, sondern auch im geringeren Kühlaufwand für die Leistungshalbleiter was Volumen und Masse der Geräte reduziert.

## 2. Stabilität der Ausgangsspannung über Last 0W bis 7,5 kW



**Abbildung II-16:** Messkurve Stabilität Ausgangsspannung über Last

Die beiden roten Linien zeigen die Testlimits (+/-2%). Die durchgehend blaue Linie zeigt die gemessene Ausgangsspannung in Abhängigkeit vom Laststrom. Die Messkurve wurde bei einer Eingangsspannung von 216V erstellt. Die Genauigkeit der Ausgangsspannung konnte für den gesamten Eingangsspannungsbereich von  $U_{min} = 137\text{ V}$  bis  $U_{max} = 216\text{ V}$  nachgewiesen werden.

## 3. Dynamische Messung am LLC

Die folgende Abbildung II-17 zeigt Strom und Spannung am Leistungs-Übertrager des LLC Wandlers.

Wie schon in der Simulation ermittelt, ist der Stromverlauf sinusförmig. Die Umschaltung der Leistungsschalter erfolgt im Strom-Nulldurchgang. Die Schaltverluste sind hiermit vernachlässigbar was sich im hohen Wirkungsgrad wieder spiegelt.

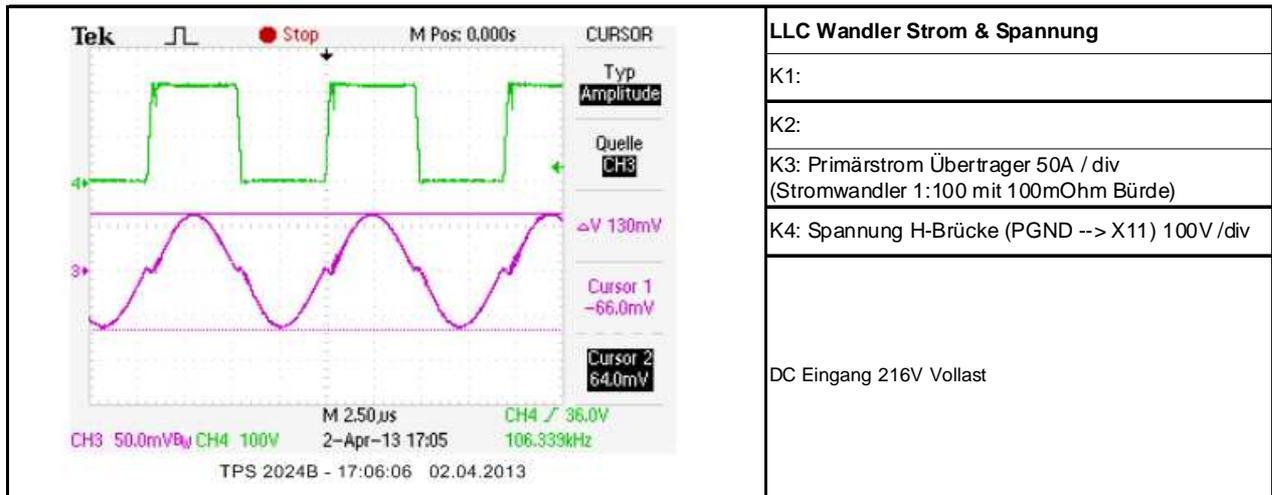


Abbildung II-17: Dynamisches Strom-/Spannungsverhalten am LLC Leistungsübertrager

#### 4. Dynamische Messungen am Buck Regler

Die Abbildung II-18 zeigt den gewünschten Verlauf von Drosselstrom und Spannung der Buck Leistungsstufe.

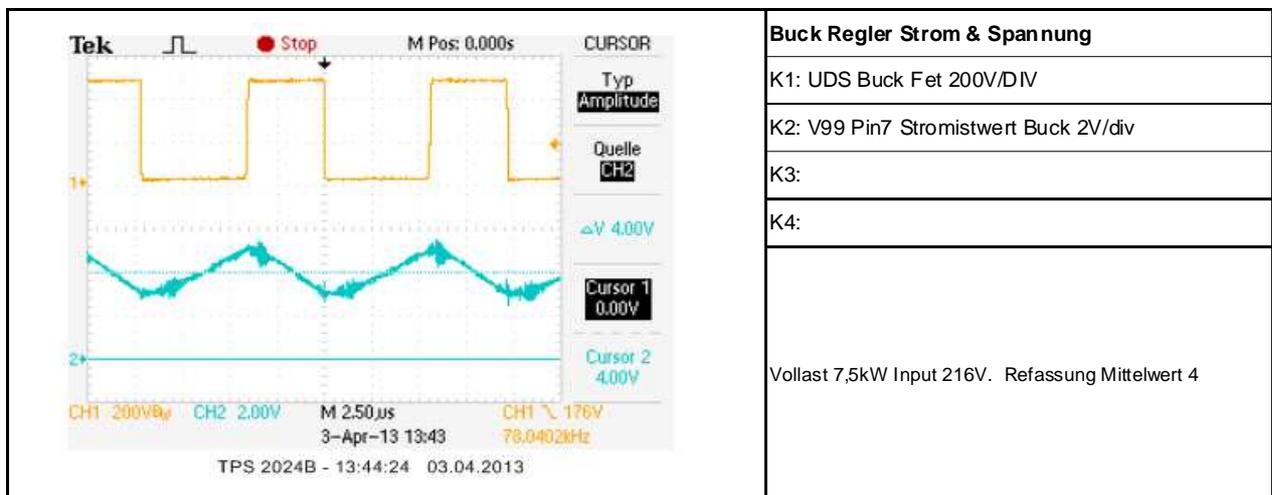
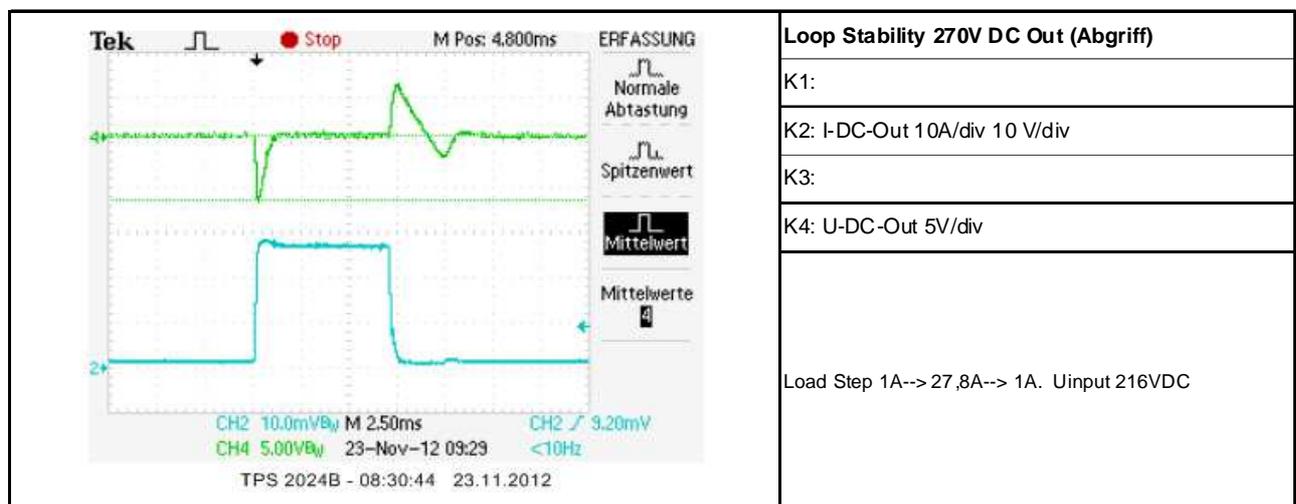


Abbildung II-18: Dynamisches Strom-/Spannungsverhalten der Buck Leistungsstufe

## 5. Regeldynamik DC Ausgangsspannung

Zum Nachweis des dynamischen Verhaltens der Ausgangsspannung wurde eine Last von 270W nach 7,5KW geschaltet. Die 270V Ausgangsspannung zeigt dabei eine dynamische Unterschwingungsspitze von < 3% (7V) die nach einer Reaktionszeit von  $t < 1$  ms bereits ausgeregelt ist.

Abbildung II-19 zeigt die Reaktion der 270VDC Ausgangsspannung auf eine Lastaufschaltung von 270W nach 7,5kW und umgekehrt bei einer Eingangsspannung von  $U_{INmax} = 216V$ .



**Abbildung II-19:** Messung Regeldynamik 270V Ausgangsspannung

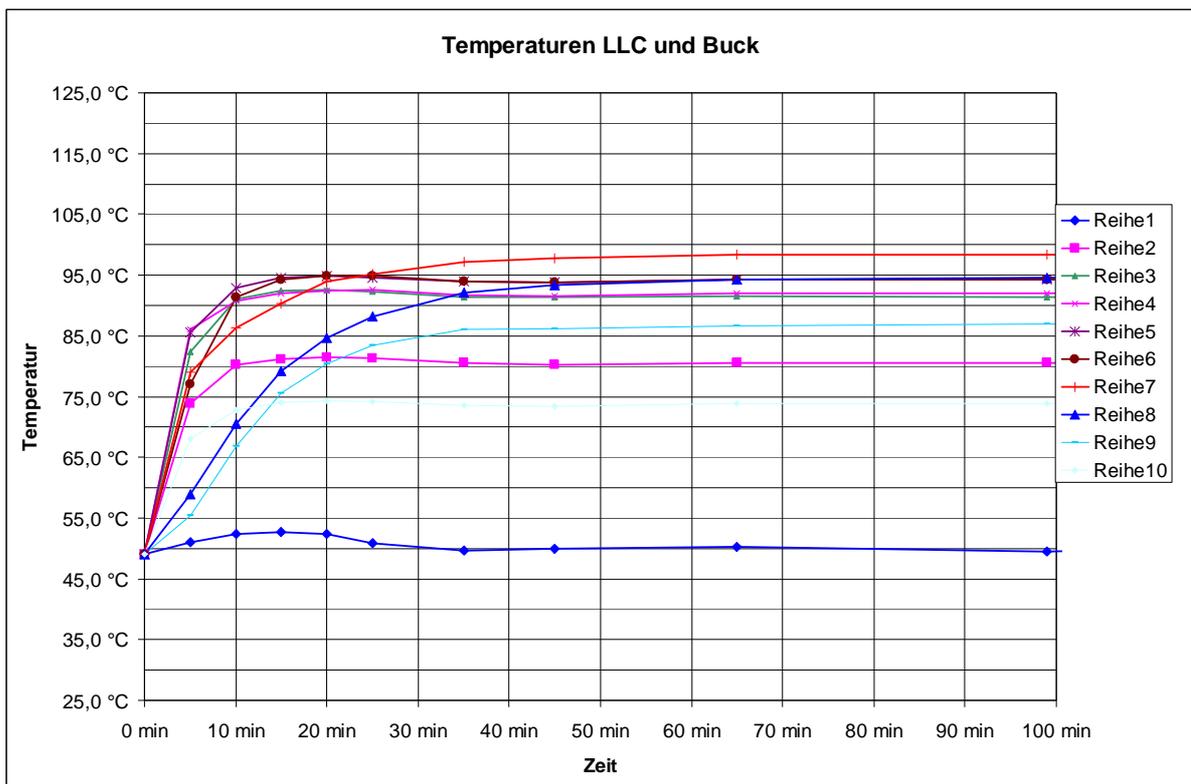
### II.1.3.3.4 Durchführung der Thermal Tests

Um die thermische Stabilität der Leistungselektronik zu verifizieren, wurden bei abgenommenem Moduldeckel diverse Bauteile mit Temperaturfühlern bestückt (Tabelle II-2) und die thermische Zeitkonstante sowie die Endtemperaturen gemessen.

Das folgende Diagramm (Abbildung II-20) zeigt die Temperaturverläufe bei Vollast und 180V Eingangsspannung. Bei einer Umgebungstemperatur von 50°C liegen die gemessenen Bauteiletemperaturen im eingeschwungenen Zustand weit unterhalb der zulässigen Bauteiletemperaturen (Buck Fet max. zulässig Temp.=150°C, Transformator Kupferlackdraht max. zulässig Temp. =210°C).

**Tabelle II-2: Thermal Test – Positionierung der Temperaturfühler**

Fühler Reihe	Bauteil / Komponente
1	Umgebung Luft
2	LLC Fet High Side
3	LLC Fet Low Side
4	LLC Diode
5	Buck Fet
6	Buck Diode
7	Transformator Kupfer
8	Transformator Kern
9	Buck Drossel Kern
10	Power Platine



**Abbildung II-20: Thermaltest – gemessene Temperaturen LLC und Buck**

 Abschlussbericht	Leistungswandler für alternative Energiesysteme in zivilen Flugzeugkabinen FKZ: 20K1101M	Issue: 1
		Datum: 15.06.2016

## II.1.4 Entwicklung, Fertigung und Test des DC/AC Wechselrichter Moduls

### II.1.4.1 Entwicklung des 3 x 5kW / 115V / 400Hz DC/AC Wechselrichter (AP 1.2)

#### II.1.4.1.1 Durchführen der Trade-offs zur Ermittlung der Architektur

Im Vorgriff zur folgenden Entwicklung wurden diverse Trade-offs bezüglich der Funktionalitäten und deren Realisierung im alternativen Energiesystem in zivilen Flugzeugkabinen durchgeführt. Die Design-Vorgaben und wesentlichen Ergebnisse der Trade-offs sind in den Kapiteln II.1.2.1, II.1.2.2 und II.1.2.3 beschrieben.

#### II.1.4.1.2 Elektrische und mechanische Entwicklung

Nach Festlegung der Modulaufteilung der Leistungswandler wurde parallel zur elektrischen Entwicklung auch die mechanische Entwicklung durchgeführt. Hauptaugenmerk wurde dabei auf die Platzierung der Leistungsbaugruppen (Halbleiterschalter, Spulen, Kondensatoren) gelegt. Dabei musste innerhalb des Moduls auf beste Wärmeableitung (Kühlkörper, Lüfter) und Elektromagnetische Verträglichkeit geachtet werden, bei gleichzeitiger Minimierung von Bauvolumen und Gewicht.

Die Entwicklungsergebnisse für den DC/AC Wandler werden im Folgenden dargestellt.

#### 1. Dimensionierung 115V / 400 Hz Wandler 5kW Leistungsstufe /P-Spice Simulation

Der DC/AC Leistungswandler soll eingangsseitig am 270V-DC-Versorgungsnetz betrieben werden. Dabei ist der maximale Grenzwert der DC-Versorgung nach MIL-STD-704F von 350V bei „abnormal operation“ zu beachten.

Der DC/AC Wandler mit einer Ausgangsleistung von mindestens 5 kW pro Phase wurde in Orcad P-Spice modelliert und die Funktionalität simuliert.

Das Modell beinhaltet alle Leistungshalbleiter sowie passive Bauteile welche für die Funktion benötigt werden.

#### 2. Wirkungsgradberechnung

Vor dem Erstellen der Schaltpläne und des PCB Layouts wurde eine Berechnung des Wirkungsgrades und der Verlustleistungen durchgeführt. Der zu erwartende Wirkungsgrad des Wechselrichters liegt bei rund 95% bei einer Dauer-Ausgangsleistung von 15kW.

#### 3. Dimensionierung Magnetischer Komponenten

Die magnetischen Komponenten wurden berechnet, entsprechende Bauvorschriften erstellt und Muster angefertigt um die Machbarkeit und somit die endgültigen Baugrößen festzulegen.

### II.1.4.1.3 Erstellung Schaltplan und Layout

Nach dem die relevanten Schaltungsteile simuliert waren, wurden die Topologien in technische Stromlaufpläne umgesetzt und die Platinen Layouts entwickelt. Hierbei wurde ebenfalls großes Augenmerk auf den Thermalhaushalt, Wirkungsgrad, Bauvolumen und interne Elektromagnetische Verträglichkeit gelegt.

Bezüglich des Montagekonzepts der Leistungshalbleiter wurde speziell darauf geachtet, Maßnahmen zur Minimierung der Baugröße zu realisieren.

Designtreiber war die Erzielung eines maximalen Wirkungsgrades.

Bei Dimensionierung und Festlegung der Leistungshalbleiter und Layout-Erstellung musste festgestellt werden, dass die zum Entwicklungszeitpunkt propagierten hocheffizienten Bauelemente für eine „worst case“ Eingangsspannung von 700V<sub>P</sub> (Def. nach MIL-STD-704F: U<sub>w.c.</sub> = +/- 350V) nicht zur Verfügung standen.

Mit den am Markt befindlichen Bauteilen konnte zwar eine maximale mögliche Dauerbelastung von bis zu 5kW je Phase ermittelt werden. Die maximale geregelte Eingangsspannung jedoch durfte wegen der zur Verfügung stehenden Halbleiter +/- 215V (→ 430V<sub>P</sub>) nicht überschreiten.

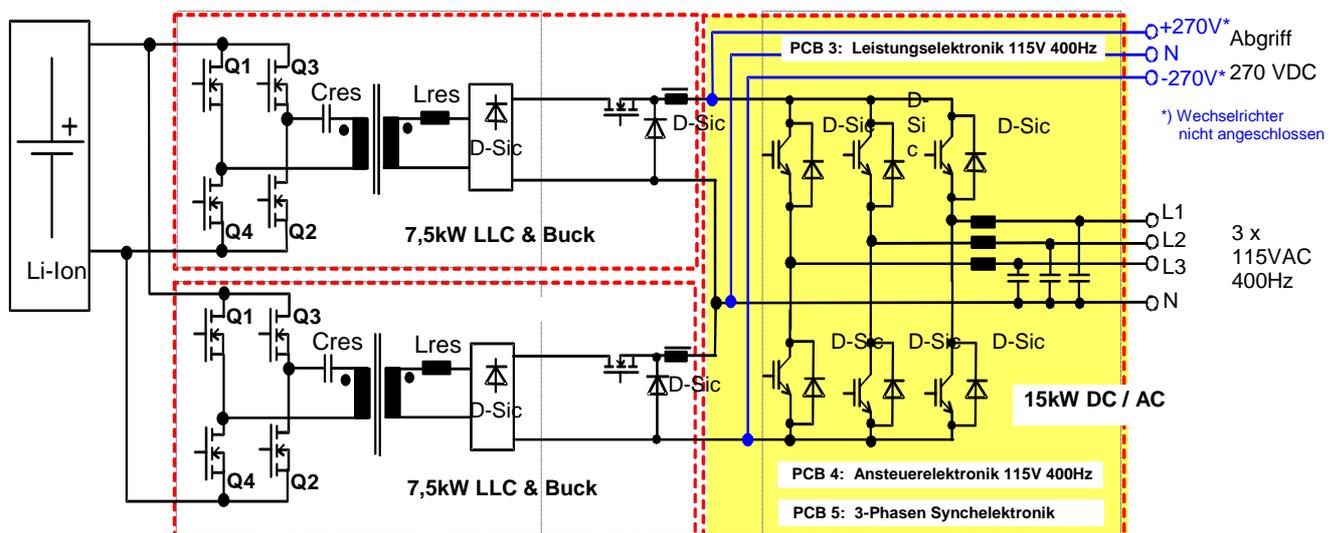
Um flexibel auf die Anforderungen reagieren zu können, wurde die Ausgangsspannung der DC/DC-Konverter umschaltbar zwischen 215V bzw. 270 V realisiert:

- +/- 215V / 2x6kW zur Versorgung des DC/AC-Wechselrichters
- +/- 270V / 2x7,5kW zur Simulation eines High Voltage DC-Bordnetzes

Schaltungsmaßnahmen und Layout der Leistungsplatine wurden daher auf die zur Verfügung stehenden Leistungshalbleiter angepasst.

Für das 3 x 115VAC/400 Hz DC/AC-Wandlermodul wurden drei PCB Layouts erstellt.

In Abbildung II-21 sind die Leiterplattenfunktionen beschrieben.



**Abbildung II-21:** Funktionszuordnung der Leiterplatten

PCB 3: Beinhaltet die Leistungselektronik pro Phase 115VAC 400Hz Sinus.

PCB 4: Beinhaltet die Ansteuerelektronik pro Phase 115VAC 400Hz Sinus.

PCB 5: Synchronisiert die Ansteuerelektronik für alle drei Phasen (3 x PCB 4)

	Leistungswandler für alternative Energiesysteme in zivilen Flugzeugkabinen FKZ: 20K1101M	Issue: 1
Abschlussbericht		Datum: 15.06.2016

#### II.1.4.1.4 Erstellung der mechanischen Zeichnungen

Auf Grund der mechanischen Entwicklungsüberlegungen wurde mit der Konstruktion und der Festlegung aller Gruppenpositionen begonnen und basierend darauf der mechanische Zeichnungssatz erstellt.

Abbildung II-22 zeigt die Interface Zeichnung 1117-ASP-TA-10000A00.

In Abbildung II-23 ist die grundsätzliche elektromechanische Aufteilung der drei Phasen im Gesamtgehäuse dargestellt.





 Abschlussbericht	Leistungswandler für alternative Energiesysteme in zivilen Flugzeugkabinen FKZ: 20K1101M	Issue: 1
		Datum: 15.06.2016

#### II.1.4.1.5 Durchführung der Beschaffung Bauteile, Mechanik und Leiterplatten

Nach Fertigstellung der technischen Schaltpläne - elektrisch und mechanisch - wurden alle Bauteile, Materialien beschafft und für den Bau der Geräte bereitgestellt. Leiterplatten und mechanische Komponenten wurden bestellt.

#### II.1.4.1.6 Erstellung der Fertigungsunterlagen

Die Fertigungsunterlagen wie Stücklisten, Bestückungslisten für die Leiterplatten, Baugruppen- und Montagezeichnungen wurden gemäß ASP-Standard erstellt und im 4-Augenprinzip kontrolliert und zur Fertigung freigegeben.

#### II.1.4.2 Inbetriebnahme 3x5kW DC/AC Leistungswandler 115V 400Hz (AP 1.3)

##### II.1.4.2.1 Herstellen der Wickelgüter

Sämtliche Wickelgüter wurden nach Fertigungsunterlagen im Hause hergestellt und geprüft.

##### II.1.4.2.2 Bestücken der Leiterplatten mit SMD bzw. THT-Komponenten

Die Geräte bestehen aus mehreren verschiedenen Leiterplatten, die in zwei Technologien unterteilt sind.

Die SMD Platinen (Surface Mount Devices) wurden bei ASP auf dem automatischen Bestückplatz montiert und im Reflow Automaten gelötet.

Die THT Platinen (Through Hole Technology) wurden bei ASP von Hand bestückt und auch von Hand gelötet.

##### II.1.4.2.3 Elektrische Inbetriebnahme auf Leiterplattenebene

Die einzelnen Baugruppen wurden von Entwicklungsingenieuren in Betrieb genommen und die Messergebnisse mit den theoretischen errechneten Werten verglichen. Hierbei waren nur noch Anpassungen an der Hardware und Abgleichmaßnahmen notwendig um die gewünschte Performance zu erreichen.

##### II.1.4.2.4 Montage der Mechanik und Verdrahten des DC/AC-Leistungswandlers

Nachdem alle Teil-Baugruppen in Betrieb genommen waren, erfolgte die Montage der Leistungsbaugruppen, der mechanischen Komponenten und der bestückten Platinen sowie Festlegung der Leitungsführung und die Verdrahtung der Baugruppen..

 Abschlussbericht	Leistungswandler für alternative Energiesysteme in zivilen Flugzeugkabinen FKZ: 20K1101M	Issue: 1
		Datum: 15.06.2016

#### II.1.4.2.5 Inbetriebnahme auf Geräteebene

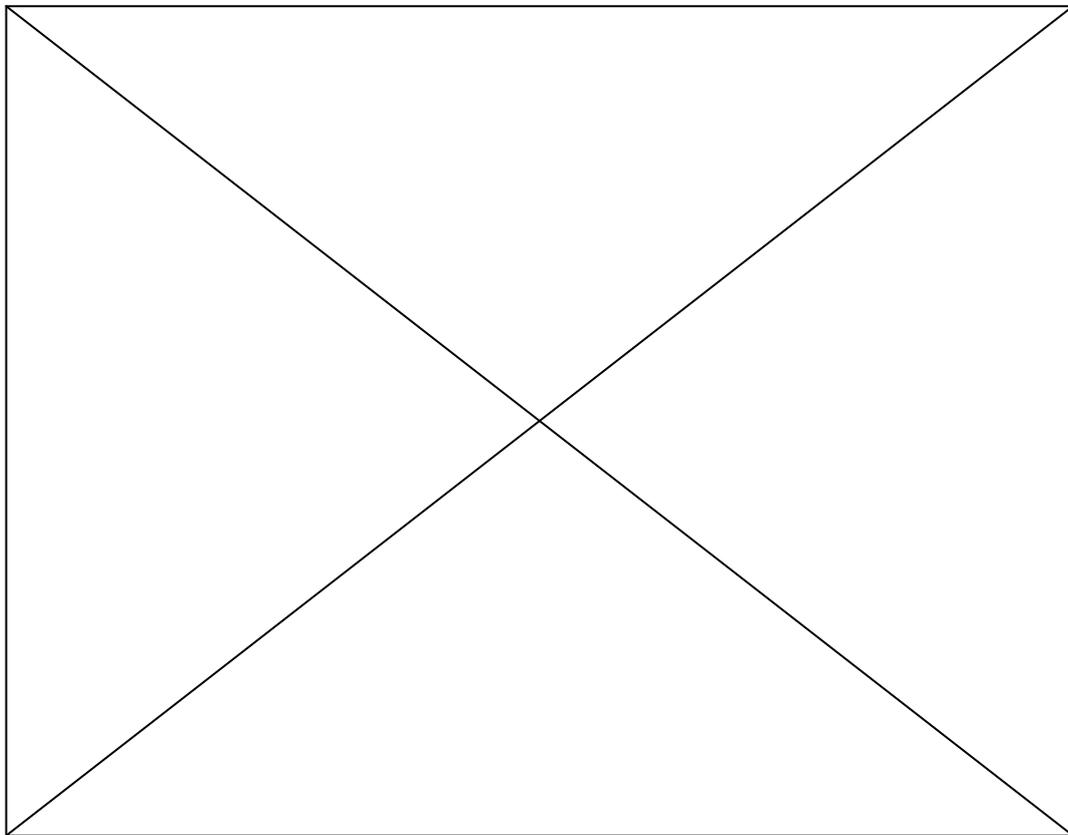
Nach erfolgter Integration wurden alle notwendigen Tests auf Systemebene durchgeführt und dokumentiert.

Die modular aufgebauten einzelnen Phasenstränge (L1, L2, L3 je 115V 400Hz) wurden einzeln in Betrieb genommen und abgeglichen.

Abbildung II-24 zeigt die integrierte Leistungselektronik für die drei Phasen.

Die Spannungsversorgung des Wechselrichtermoduls mit der reduzierten Eingangsspannung von +/- 215V zur ersten Inbetriebnahme erfolgte über Labornetzgeräte.

Nach dem Zusammenschalten der 3 Phasen L1, L2 und L3 erfolgte die Überprüfung der um 120° gegeneinander verschobenen Phasen.



**Abbildung II-24:** Aufbau des 3-phasigen Wandlers

Für die weiteren Funktions- und Systemtests wurde die Spannungsversorgung durch 2 DC/DC-Konverter Module übernommen, deren flexibel einstellbare Ausgangsspannungen vorab auf 215V umgeschaltet worden waren (II.1.4.1.3).

Um die maximale Leistung des dreiphasigen Wechselrichtermoduls von  $P \geq 15\text{kW}$  abrufen zu können, wurden zwei weitere Konverter Module eingangsseitig parallelgeschaltet.

Abbildung II-25 zeigt das Blockschaltbild der gesamten Leistungskette bestehend aus:

- Serienschaltung 2 DC/C Module zur Erzeugung der +/- 215VDC:
- Parallelschaltung 2 weitere DC/DC-Module zur Leistungserhöhung
- 3-Phasiges Wechselrichter-Modul
- Lastsimulation für 115V /400Hz / 3-Phasen

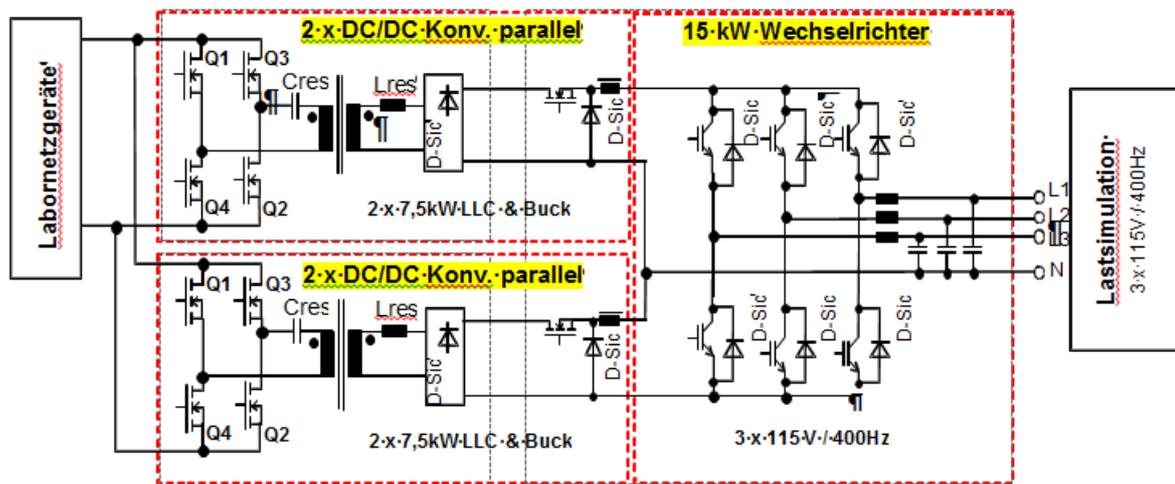


Abbildung II-25: Blockschaltbild Testaufbau

#### II.1.4.2.6 Testbetrieb der Leistungskette mit Lastsimulator

Als Lastsimulation dienen modifizierte und einzeln zu- bzw. abschaltbare Heizlüfter (Lastsegmente).

Abbildung II-26 zeigt die zuschaltbaren Wechsellastsegmente (Simulatorwand) bestehend aus den modifizierten Heizlüftern.

Die Widerstände der einzelnen zuschaltbaren Lastsegmente (Heizlüfterwendel) wurden zuvor im warmen Zustand gemessen und kalibriert. Der Segmentwiderstand wurde hierbei mit 11,46 Ohm gemittelt.

Der Kaltwiderstand wurde mit 10,88 Ohm gemessen.

Durch Parallelschaltung der ohmschen Lastsegmente lässt sich die Belastung für jede Phase in Stufen einstellen (Tabelle II-3):

	Anzahl der Lastsegmente (Load Elements)					
	0	1	2	3	4	5
R [Ohm]	$\infty$	11,46	5,73	3,82	2,86	2,29
$P_{OUT-115V}$ [kW]	0	1,15	2,31	3,46	4,62	5,78
$3 \times P_{OUT}$ [kW]	0	3,45	6,93	10,38	13,86	17,34

Tabelle II-3: Lastsimulation



**Abbildung II-26:** Aufbau des 115V 400 Hz Lastsimulators

 Abschlussbericht	Leistungswandler für alternative Energiesysteme in zivilen Flugzeugkabinen FKZ: 20K1101M	Issue: 1
		Datum: 15.06.2016

### II.1.4.3 Test / Reporterstellung für die 3 x 5kW 115V DC/AC Leistungskette (AP 1.4)

#### II.1.4.3.1 Erstellen der Testprozeduren

Die Testprozeduren wurden auf Grundlage von EXCEL-Tabellen vorbereitet

#### II.1.4.3.2 Betrachtungen zu EMV

Durch die Speisung des DC/AC-Wandlers über DC/DC-Konverter (Sinus-Resonanz-Wandler zur Potentialtrennung zwischen DC-Eingang und DC-Ausgang) wird am Eingang des DC/DC-Konverters bei symmetrischer Belastung des Drehstromausgangs nur ein sehr geringer 400 Hz Störsignalanteil erwartet.

Die Regelung der 115V 400Hz Sinusausgangsspannung erfolgt mittels nachgeschaltetem Pulsweiten-Regler bei einer Schaltfrequenz von 30kHz.

Zur Minimierung der Störpegel an den DC-Eingangsklemmen und den AC-Ausgangsanschlüssen wurden bereits im Design Eingangs- bzw. 400Hz Ausgangsfilter vorgesehen.

Qualitative EMV-Messungen sind im Rahmen dieser Studie noch nicht vorgesehen.

#### II.1.4.3.3 Durchführung des Full Functional Tests

Alle nachfolgenden Tests sind an dem 3x5 kW Wechselrichtermodul durchgeführt worden.

Abbildung II-27 zeigt das 3 x 115VAC / 400Hz DC/AC Wechselrichtermodul



**Abbildung II-27:** 3 x 115VAC / 400Hz DC/AC Wechselrichtermodul

 Abschlussbericht	Leistungswandler für alternative Energiesysteme in zivilen Flugzeugkabinen FKZ: 20K1101M	Issue: 1
		Datum: 15.06.2016

Zur Durchführung der Funktionstests wurde die gesamte Leistungskette entsprechend einem alternativen Energiesystem in zivilen Flugzeugkabinen aufgebaut.

Abbildung II-28 zeigt die Leistungswandler Module bestehend aus DC/AC-Wechselrichter und 4 speisende DC/DC Konverter.



**Abbildung II-28:** Leistungskette mit Wechselrichter (linkes Gerät) und 4 DC/DC-Konvertern

#### II.1.4.3.3.1 Dimensionen DC/AC Wechselrichter im Gehäuse „Version V01“

**Tabelle II-4: Mechanische Daten Wechselrichter**

Bauvolumen	38,9 dm <sup>3</sup>	Einschl. Befestigungsfüße
Baugröße L x W x H	496 x 424 x 185 (mm)	Einschl. Befestigungsfüße
Masse	24,9 kg	

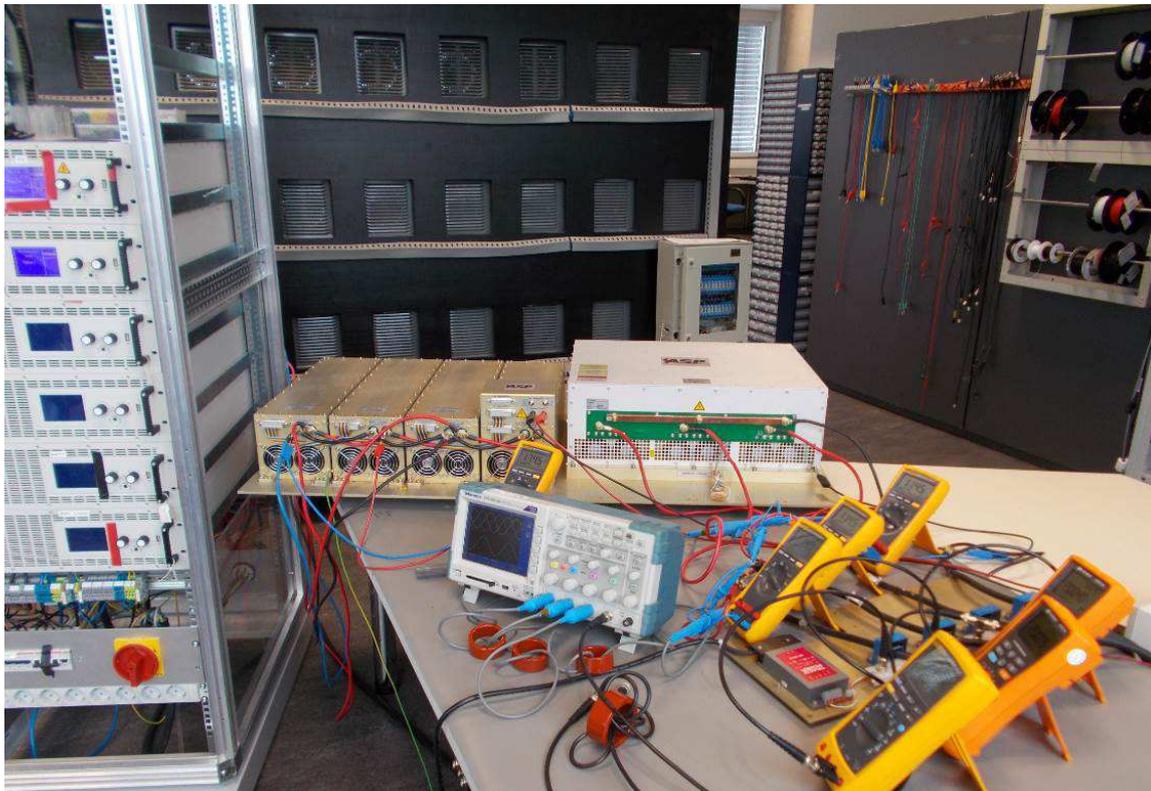
Die o.g. Abmessungen entsprechen der Interface Zeichnung 1117-ASP-TA-10000A00 (Abbildung II-22).

 Abschlussbericht	Leistungswandler für alternative Energiesysteme in zivilen Flugzeugkabinen FKZ: 20K1101M	Issue: 1
		Datum: 15.06.2016

#### II.1.4.3.3.2 Elektrische Tests

Die Spannungsversorgung der Leistungskette erfolgte über zwei parallelgeschaltete DC-Labornetzgeräte. Die Eingangsleistung der DC/DC-Wandler wird aus der abgelesenen Spannung und dem Strom ermittelt und kann direkt an den Labornetzgeräten abgelesen werden.

Abbildung II-29 zeigt die Kette der Leistungswandler im Testaufbau



**Abbildung II-29:** Leistungswandler im Testaufbau

Die nachfolgenden Messtabellen zeigen alle Eingangs- und Ausgangs-Leistungsdaten.

- Spannung & Eingangsleistung DC Eingang
- Spannung & Strom L1, L2, L3 AC Ausgänge

Die Auswertung in den Tabellen zeigt die aufgenommene- und abgegebene Leistung und den Wirkungsgrad.

### 1. Leerlauf Leistungsaufnahme

In der folgenden Tabelle ist die Verlustleistung über die gesamte Leistungskette (4 x DC/DC-Konverter und 3-phas. DC/AC-Wechselrichter) ohne AC-Last dargestellt.

**Tabelle II-5: Leistungsaufnahme im Leerlauf**

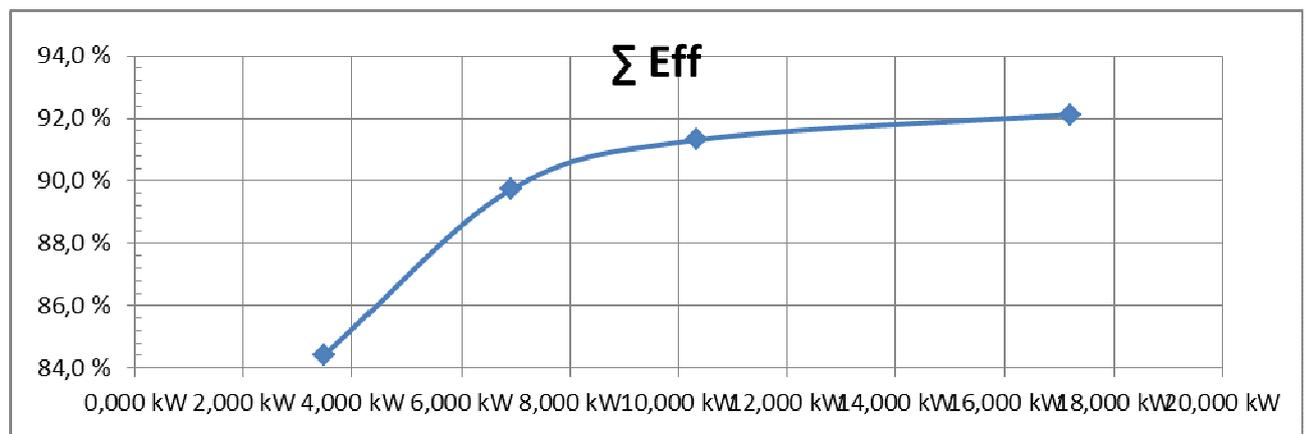
Zero Load	DC Input	L1-Output	L2-Output	L3-Output
U	210,00 V	115,70 V	115,50 V	115,40 V
I	-	0,00 A	0,00 A	0,00 A
P (4 x DC/DC-Module)	0,540 kW	0,000 kW	0,000 kW	0,000 kW
P-Input	0,540 kW			

### 2. Ermittlung des Wirkungsgrades

Der Gesamtwirkungsgrad ( $\text{Eff } \Sigma$ ) wurde über die gesamte Leistungskette (4 x DC/DC-Konverter und DC/AC-Wechselrichter) ermittelt.

**Tabelle II-6: Gesamtwirkungsgrad der Leistungskette**

UFC	IFC	$P_{\text{DC/DC-IN}}$	$P_{\text{AC-OUT}}$	P-dissip.	$\text{Eff } \Sigma$
210,00 V	-	4,140 kW	3,496 kW	0,644 kW	84,4 %
210,00 V	-	7,710 kW	6,918 kW	0,792 kW	89,7 %
210,00 V	-	11,330 kW	10,345 kW	0,985 kW	91,3 %
210,00 V	-	18,680 kW	17,208 kW	1,472 kW	92,1 %



**Abbildung II-30: Gesamtwirkungsgrad der Leistungskette**

### Berechnen des Wirkungsgrades DC/AC Wechselrichter:

Der Wirkungsgrad des DC/AC-Wechselrichters wurde aus den ermittelten Wirkungsgradkurven für den DC/DC-Konverter (Abbildung II-15: Messkurve Gesamtwirkungsgrad DC/DC Leistungswandler) und dem Gesamtwirkungsgrad der o.g. Leistungskette Tabelle II-6 errechnet.

$$\sum P_{IN} = 4 \times P_{V-DC/DC} + P_{V-DC/AC} + P_{OUT}$$

Der Wirkungsgrad des MOCCA-Konverters ( $\eta_{MOCCA}$ ) wurde näherungsweise im Arbeitspunkt bei  $P_{OUT}/4$  aus der MOCCA-Wirkungsgradkurve ermittelt:

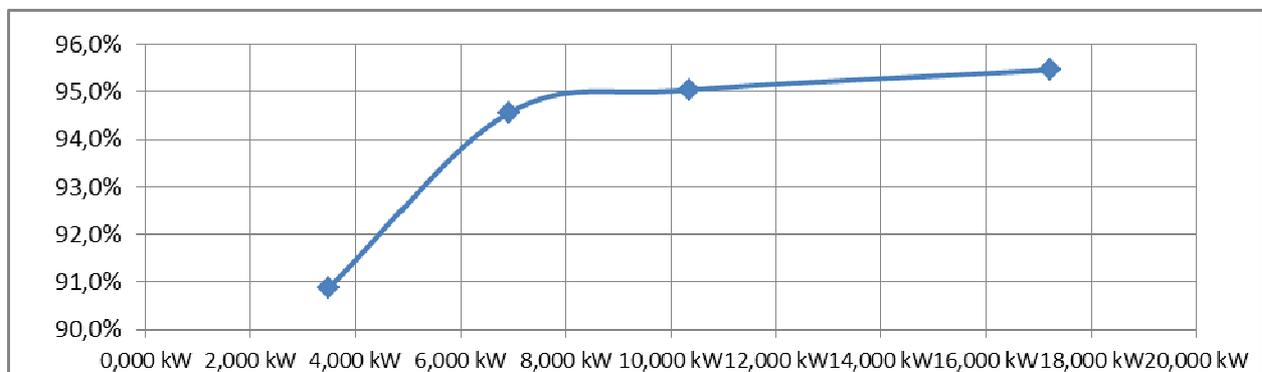
$$\sum P_{IN} = 4 \times P_{OUT/4} (1 - \eta_{DC/DC}) + P_{V-DC/AC} + P_{OUT}$$

$$\sum P_{IN} = P_{OUT} (1 - \eta_{DC/DC}) + P_{V-DC/AC} + P_{OUT}$$

$$\eta_{DC/AC} \approx P_{OUT} / \sum P_{IN} - P_{OUT} (1 - \eta_{DC/DC})$$

**Tabelle II-7: Berechneter Wirkungsgrad des DC/AC-Wechselrichters:**

P-in	P-out	P-out/4	Eff <sub>DC/DC</sub>	P-dissip. <sub>DC/DC</sub>	Eff <sub>DC/AC</sub>
4,140 kW	3,496 kW	0,874 kW	91,6 %	0,073	90,9%
7,710 kW	6,918 kW	1,729 kW	94,3 %	0,099	94,6%
11,330 kW	10,345 kW	2,586 kW	95,7 %	0,111	95,0%
18,680 kW	17,208 kW	4,302 kW	96,2 %	0,163	95,5%



**Abbildung II-31: Wirkungsgrad des DC/AC Wechselrichters**

Der Wirkungsgrad des Wechselrichters liegt bei einer Ausgangsleistung von 15 kW wie erwartet bei etwa 95%.

### 3. Start-Up Timing

Die folgenden Messungen sind mit den Labornetzgeräten als speisende Quelle durchgeführt.

Die Eingangsspannung für die DC/DC-Konverter beträgt 175V

Der Wechselrichter mit den drei Ausgangsspannungen L1, L2, L3 werden durch Einschalten der DC-Ausgangsspannungen durch das „Power-ON“ Kommando an die DC/DC-Konverter gestartet.

Die drei 115V-Wechselrichter Ausgänge sind bereits mit jeweils 5 Lastelementen als maximale Anlaufast ( $P = 17,3\text{kW}$ ) verbunden:

Die Zeitverzögerung zwischen dem Kommando-H-Pegel und dem Start der Ausgangsspannungen  $U_{L1}$ ,  $U_{L2}$ ,  $U_{L3}$  beträgt hierbei 1,3s. Diese Zeit wird durch interne Zeitabläufe der Leistungselektronik in den DC/DC-Konvertern und dem Wechselrichter für Softstart und kontrolliertes Aufschalten der Last benötigt:

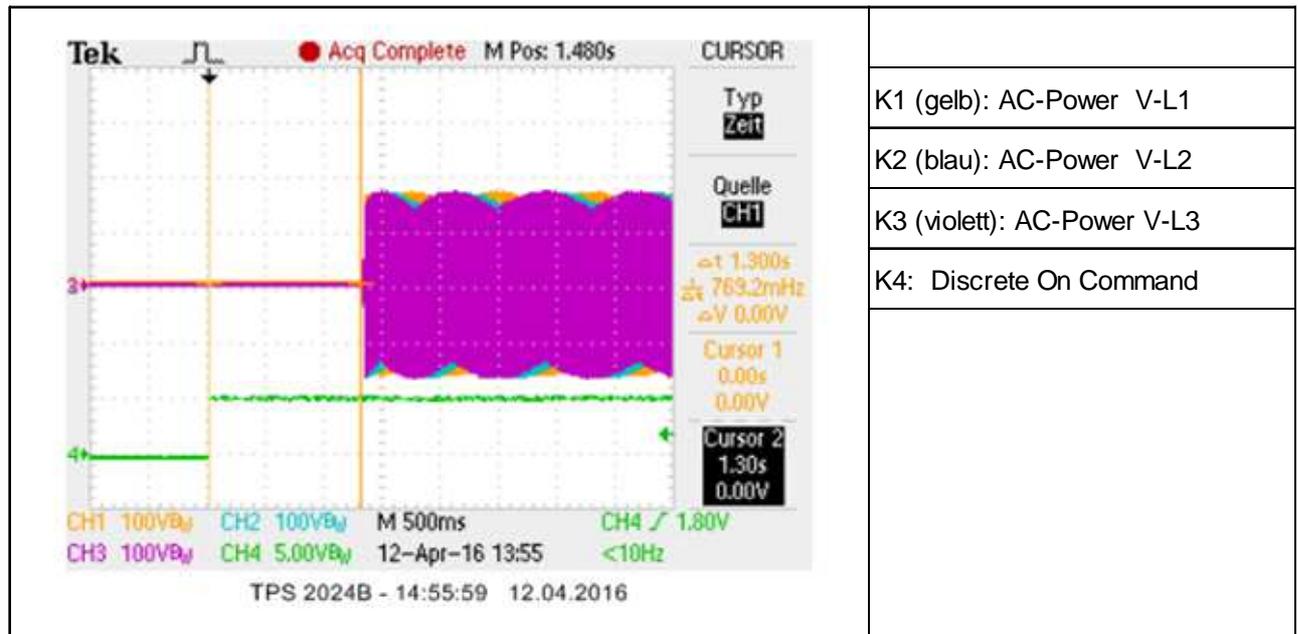


Abbildung II-32: Start-up Timing (1)

Nach automatischer Freigabe der Wechselrichter-Endstufen wird die Ausgangs-Wechselspannung unter Last in ca. 15ms aufgebaut:

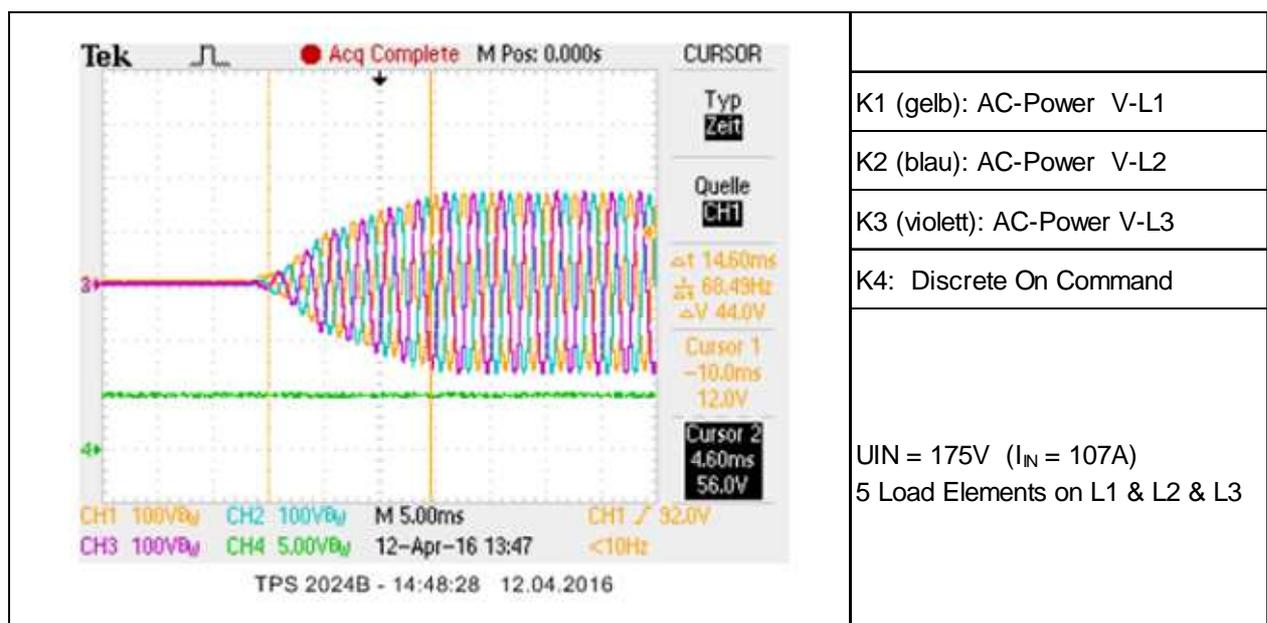


Abbildung II-33: Start-up Timing (2)

Die folgenden Abbildung II-34 und Abbildung II-35 zeigen im Detail Spannung und Wechselstrom der Phase L1 sowie die Ströme aller drei Phasen und den Stromverlauf am Eingang der DC/DC-Konverter während des Einschaltvorganges.

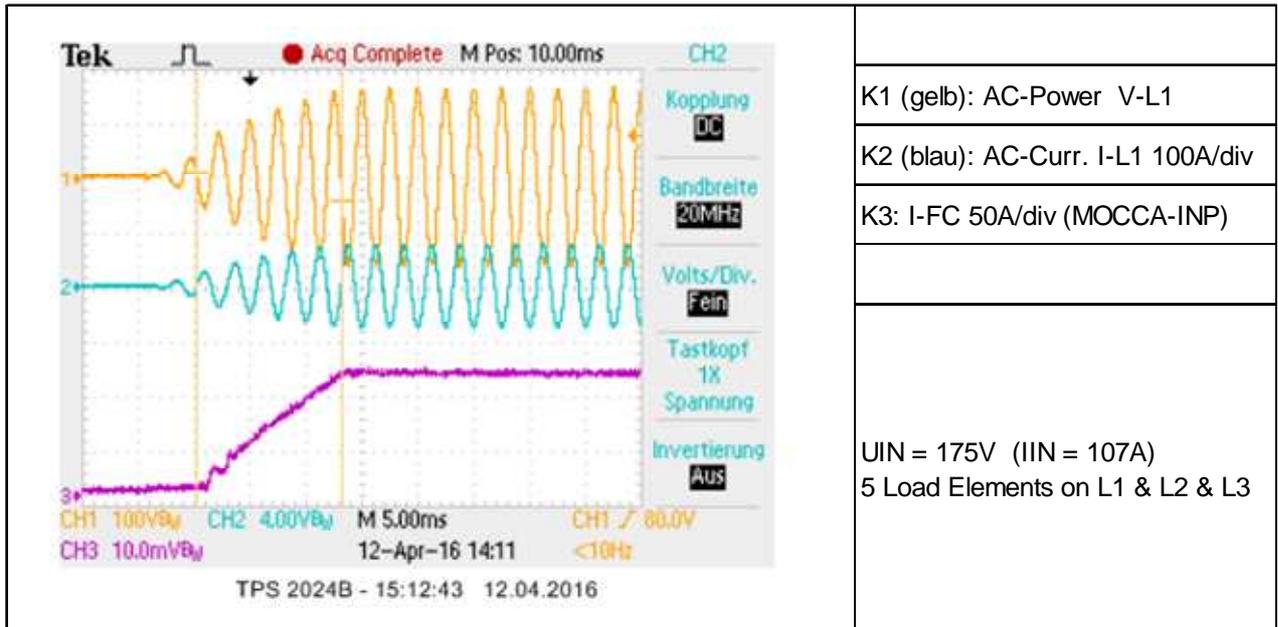


Abbildung II-34: Start-up Timing (3)

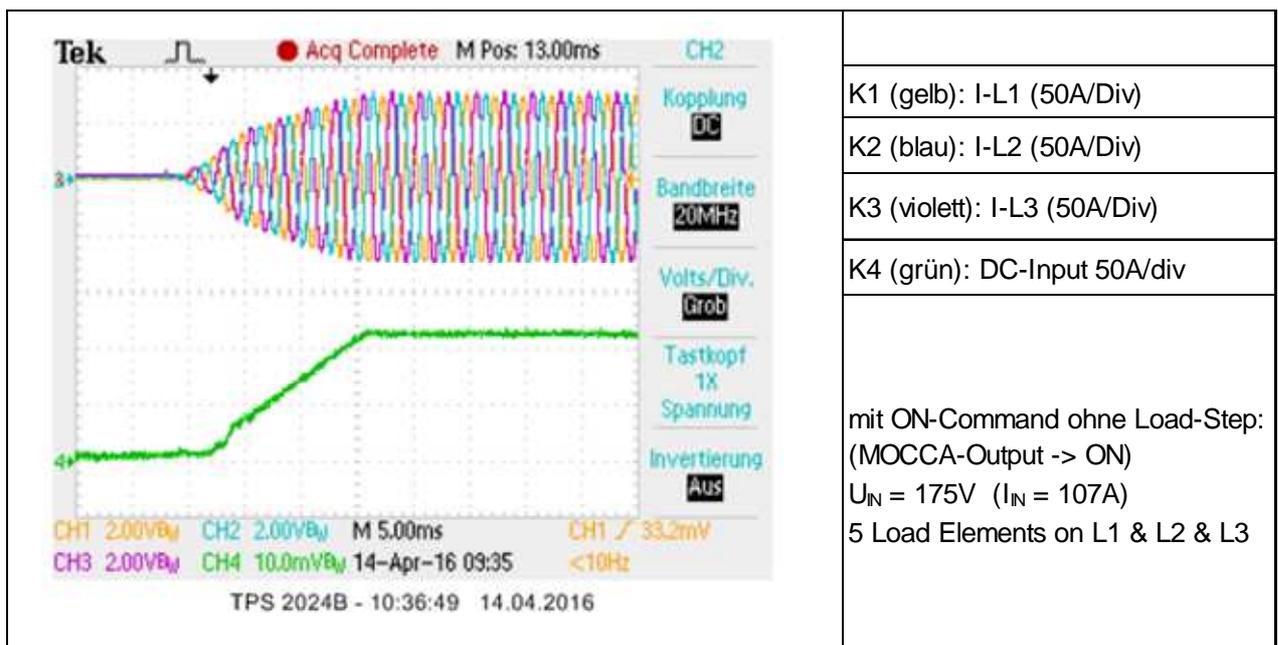


Abbildung II-35: Start-up Timing (4)

#### 4. Output Power Statischer Betrieb

##### 4.1 Betrieb im Leerlauf

##### 4.1.1 Spannung, Frequenz und Phase

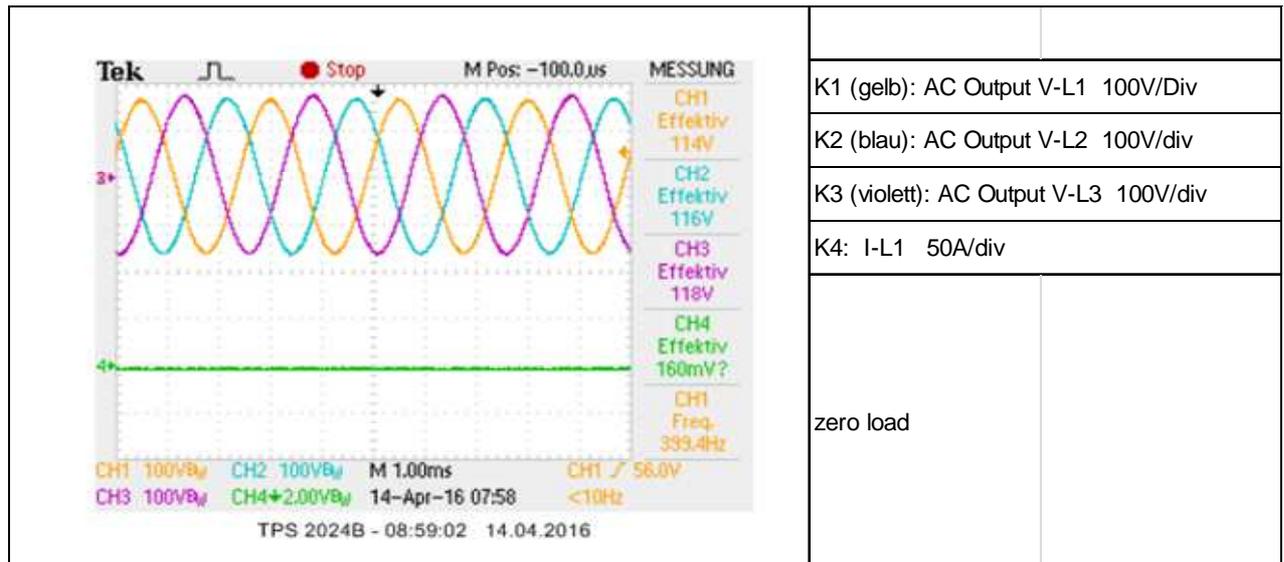


Abbildung II-36: Ausgangsspannung und Frequenz im Leerlauf

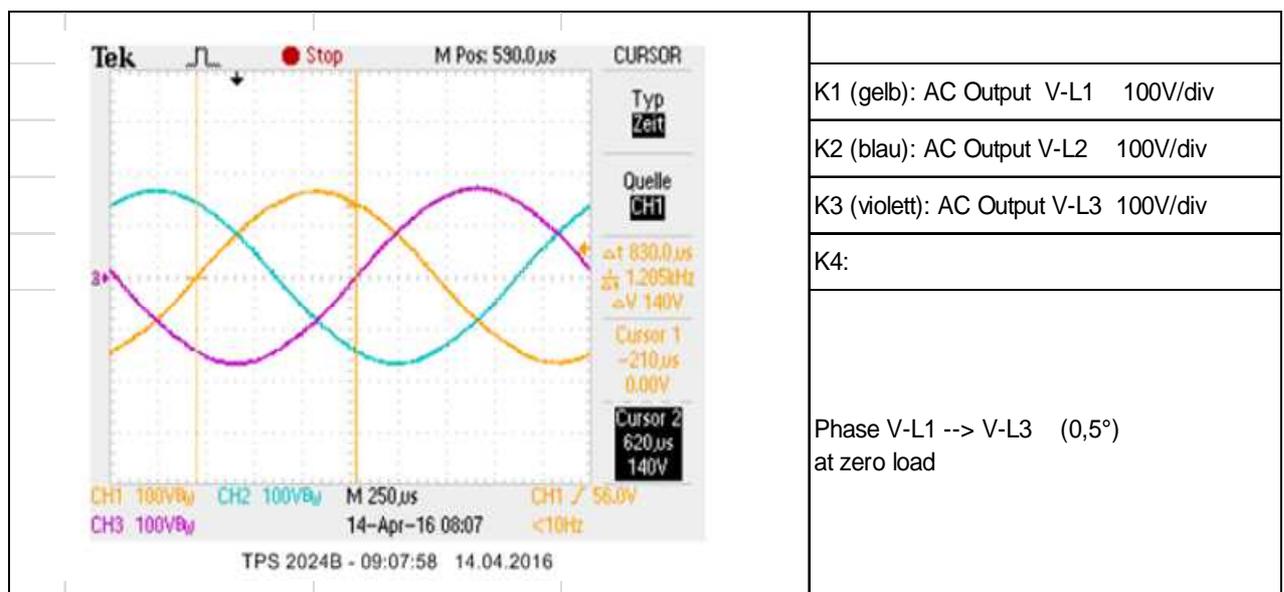


Abbildung II-37: Ausgangsspannung und Phasenlage im Leerlauf

 Abschlussbericht	Leistungswandler für alternative Energiesysteme in zivilen Flugzeugkabinen FKZ: 20K1101M	Issue: 1
		Datum: 15.06.2016

**Tabelle II-8:** Messdaten aus Spannung, Frequenz und Phase

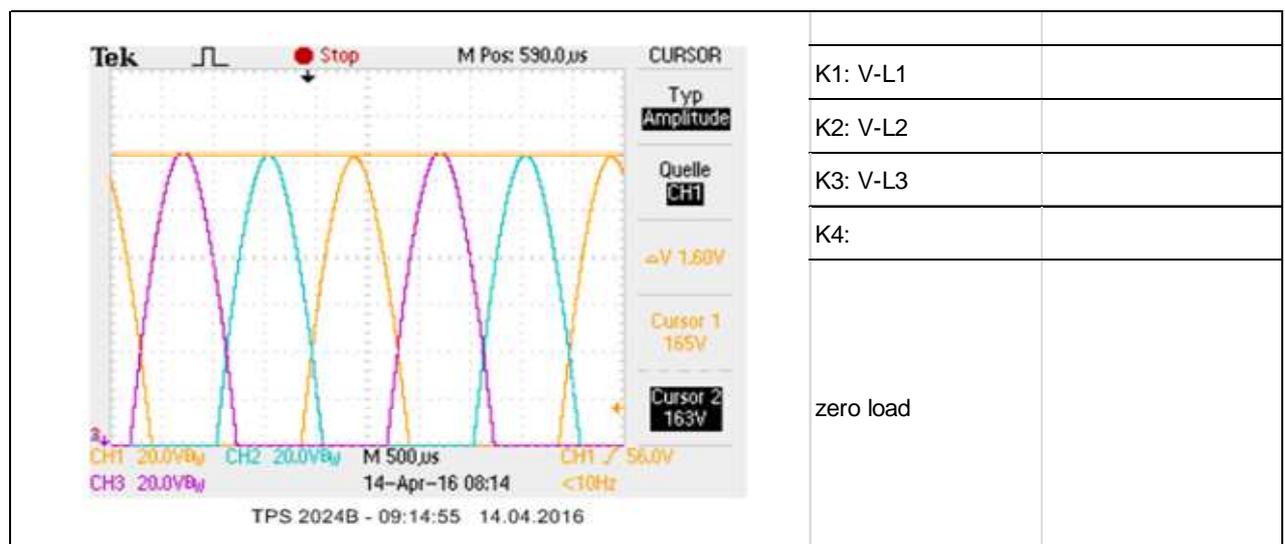
Mess-Parameter	Displacem. L1 / L2	Displacem. L1 / L3
Phi	2,0857 rad	4,1975 rad
PI	3,1416	3,1416
Phaseshift	0,831 ms	1,673 ms
Phi (Messwert)	119,5 deg	240,5 deg
Frequenz (Messwert)	399,40 Hz	399,40 Hz
Periode	2,504 ms	2,504 ms
Phaseshift	120,0 deg	240,0 deg
Voltage Displacement	-0,5 deg	0,5 deg

**Tabelle II-9 Bewertung der Messdaten aus Spannung, Frequenz und Phase**

AC Ausgangsspannungen	Ablesewert	Sollwert	Test Pass / Fail
Spannung L1, L2, L3	114 .... 118 Vrms	108 V ... 122 Vrms	<b>Pass</b>
Frequenz	399,4 Hz	395 Hz ... 405 Hz	<b>Pass</b>
Phase Displacement	-0,5; +0,5°	-4° ... +4°	<b>Pass</b>

#### 4.1.2 Modulation der Spannungsamplituden

Gemessen wird die maximal auftretende Differenzspannung ( $U_p$ ) zwischen den Phasen:



**Abbildung II-38:** Modulation der Spannungsamplituden im Leerlauf (1)

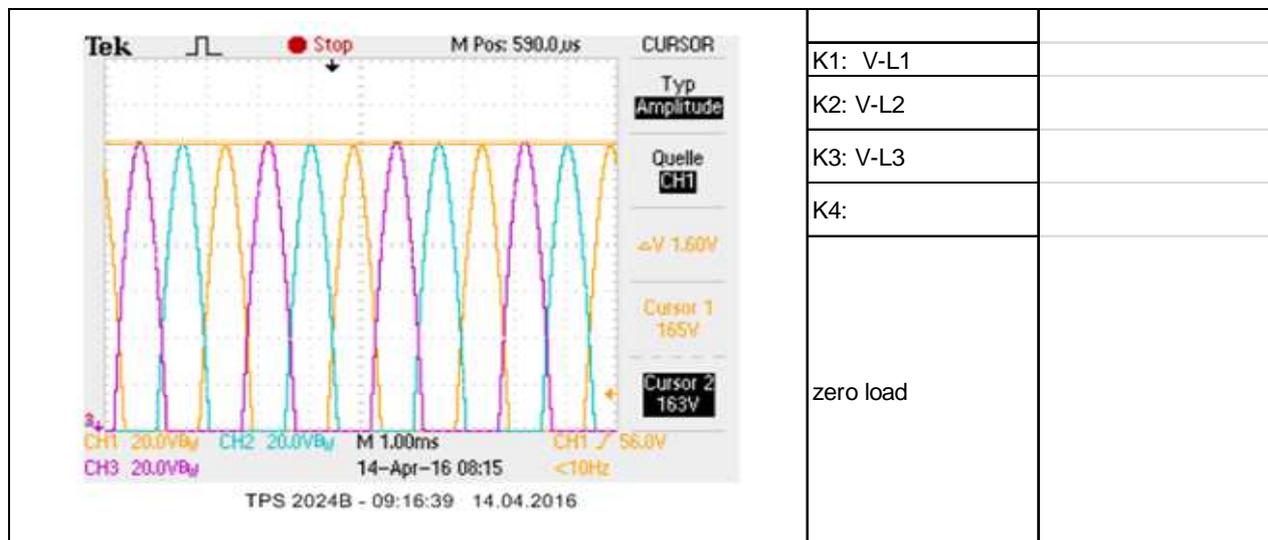


Abbildung II-39: Modulation der Spannungsamplituden im Leerlauf (2)

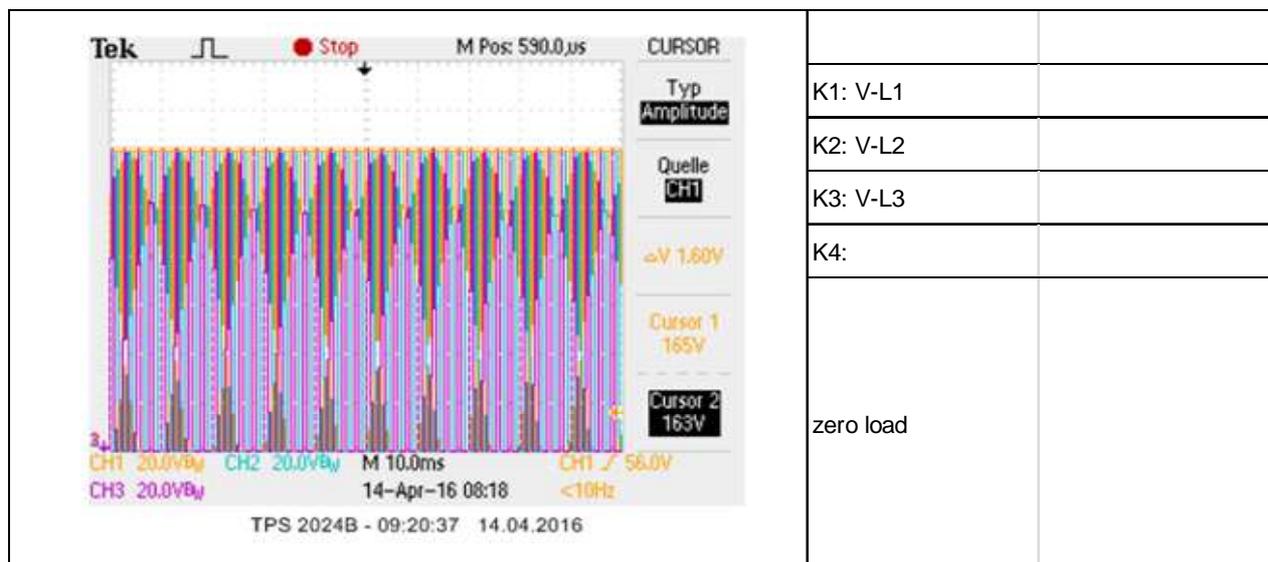


Abbildung II-40: Modulation der Spannungsamplituden im Leerlauf (3)

Tabelle II-10: Bewertung der Amplitudenmodulation im Leerlauf

Amplitudenwert	Ablesewert	Sollwert	Test Pass / Fail
Messwert: Voltage Modulation Amplitude	1,60 Vpp		
Limit- min Phase		0,00 Vpp	
Limit- max Phase		3,50 Vpp	
Result Voltage Displacement			<b>Pass</b>

#### 4.1.3 Messung der Harmonischen Oberschwingungen am Beispiel Phase 1

Alle drei Phasen (L1, L2, L3) wurden mit Scope im Spectrum Analyzer Mode gemessen. Die folgenden drei Plots zeigen das gemessene Spektrum für Phase L1 bei unterschiedlichen Frequenzbandbreiten im Leerlauf.

Die Messungen der Phasen L2 und L3 zeigten identische Ergebnisse.

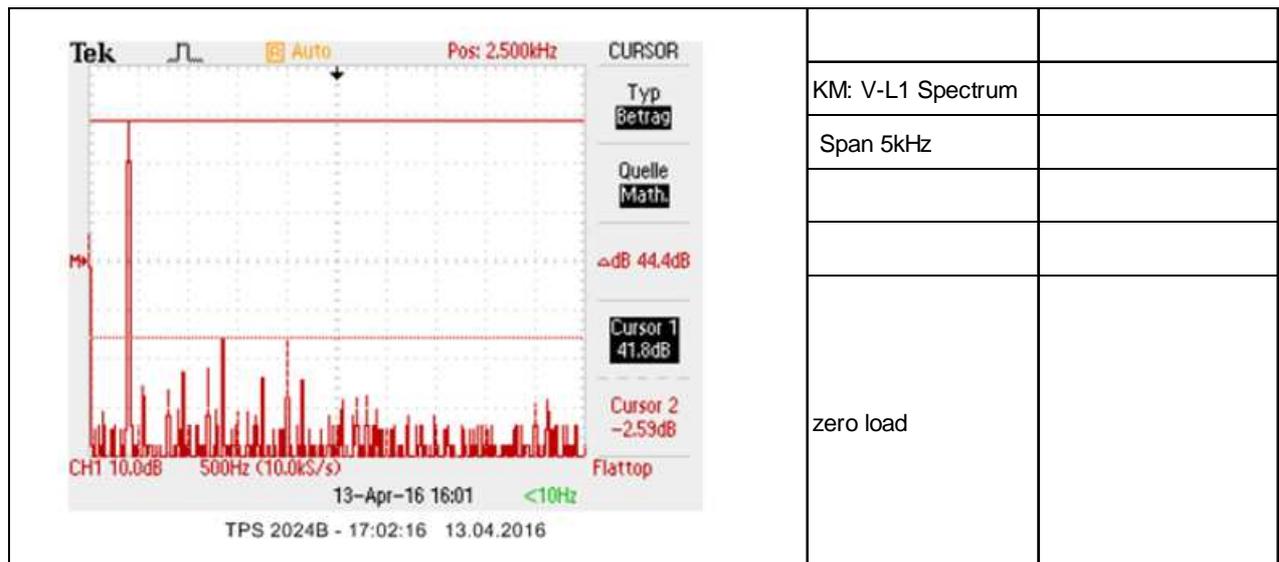


Abbildung II-41: Harmonische Oberschwingung Phase L1 bei Leerlauf (1)

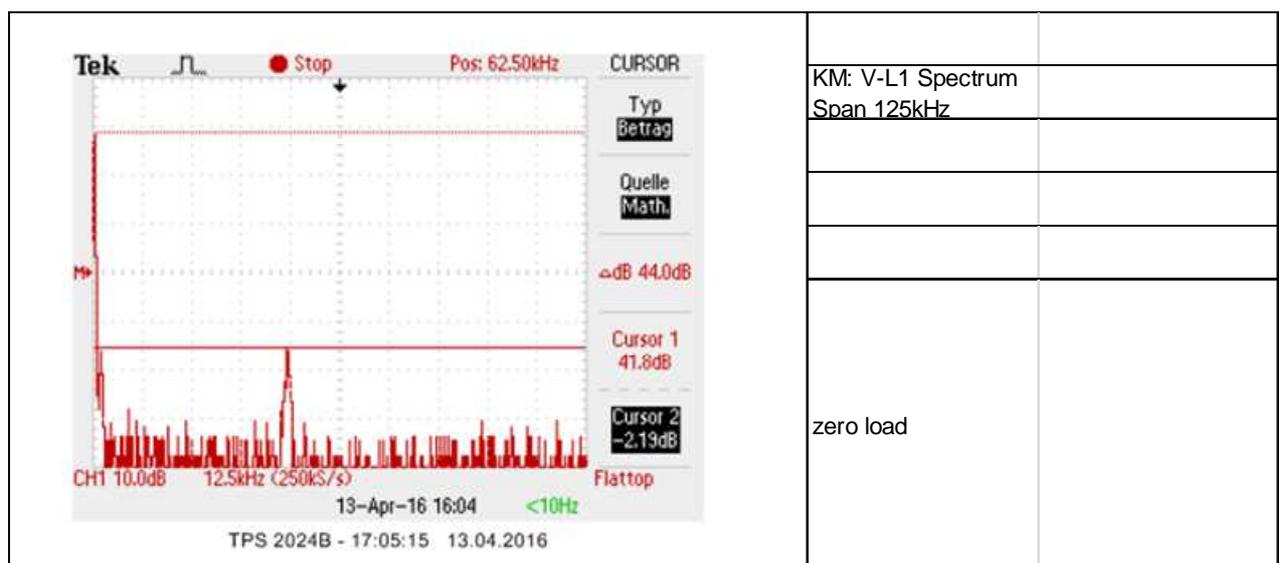
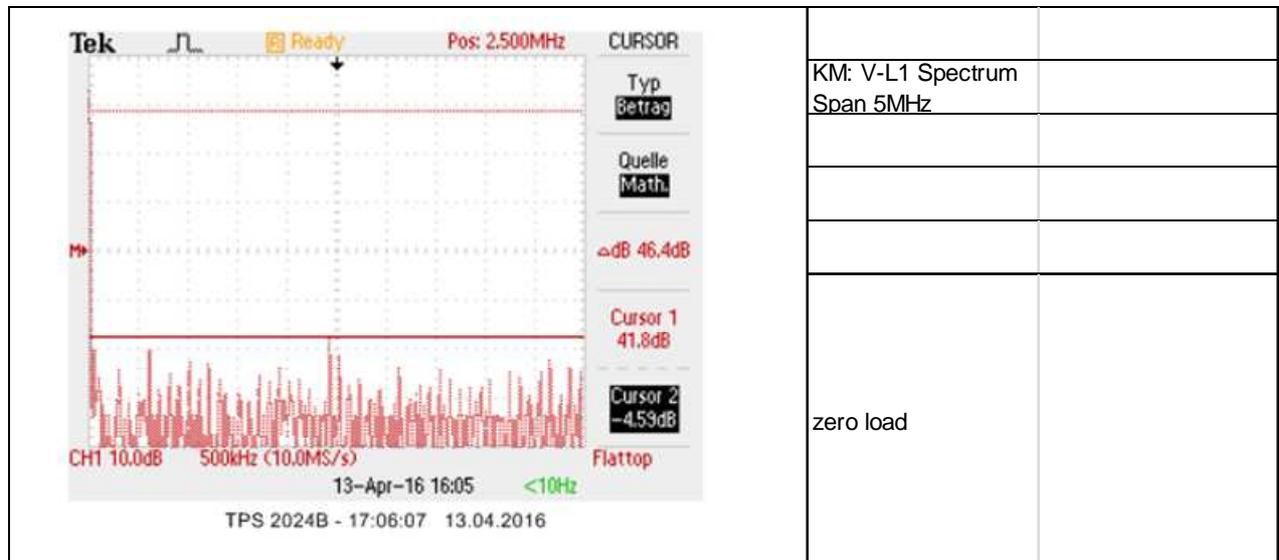


Abbildung II-42: Harmonische Oberschwingung Phase L1 bei Leerlauf (2)



**Abbildung II-43:** Harmonische Oberschwingung Phase L1 bei Leerlauf (3)

**Tabelle II-11:** Bewertung Oberschwingungen bei Leerlauf

Messung Oberschwingung	
	AC – Output: L1
Voltage Fundamental 400Hz	41,800 dBV
Voltage Fundamental 400Hz	123,03 Vrms
Voltage individual highest Level	-2,190 dBV
Voltage individual highest Level	0,78 Vrms
Frequency individual highest level	50,0 kHz
Individual harmonic distortion	0,63 %
Limit- max Phase (Distortion Factor)	8,00 %
<b>Result Individual harmonic distortion</b>	<b>Pass</b>

#### 4.2 Betrieb unter Volllast (3 x 5,7kW)

##### 4.2.1 Spannung und Frequenz

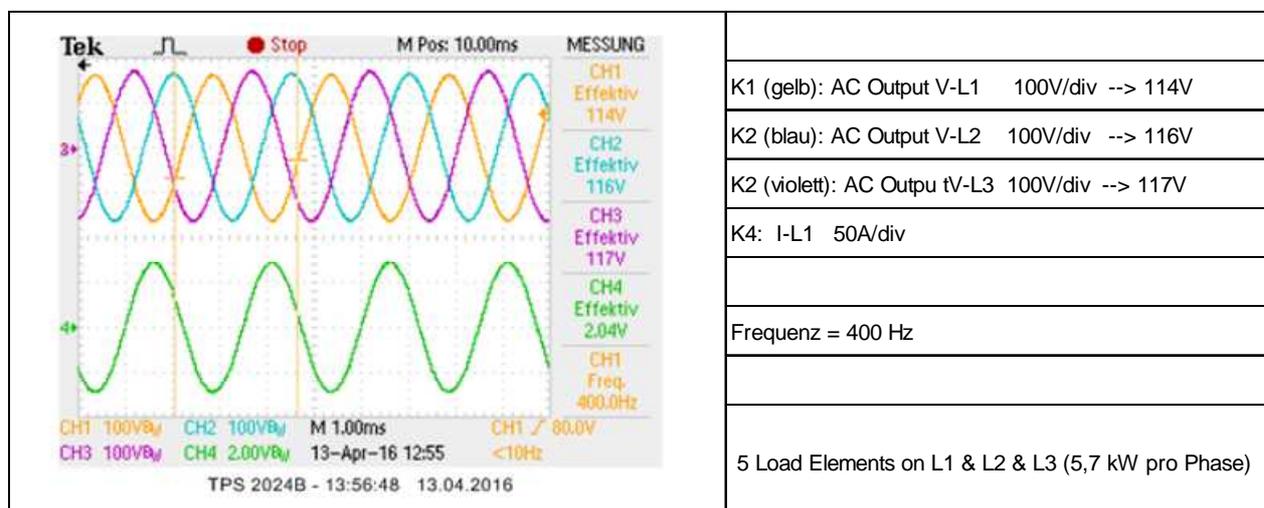


Abbildung II-44: Ausgangsspannung und Frequenz bei Volllast

Tabelle II-12: Bewertung Ausgangsspannung und Frequenz bei Volllast

Spannung			
	L1-Output	L2-Output	L3-Output
Current	49,93 A	49,98 A	50,08 A
Voltage	115,00 Vrms	114,70 Vrms	114,60 Vrms
<b>Power</b>	<b>5,741 kW</b>	<b>5,732 kW</b>	<b>5,739 kW</b>
Limit- min Phase	108,00 Vrms	108,00 Vrms	108,00 Vrms
Limit- max Phase	122,00 Vrms	122,00 Vrms	122,00 Vrms
<b>Result Steady-state voltage per phase</b>	<b>Pass</b>	<b>Pass</b>	<b>Pass</b>
U-average 3-phase	114,77 Vrms		
Limit- min average-3-phase	109,50 Vrms		
Limit- max average-3-phase	120,50 Vrms		
<b>Result Steady-state voltage average of three phases</b>	<b>Pass</b>		
Voltage unbalance	0,40 Vrms		
Limit- min average-3-phase	0,00 Vrms		
Limit- max average-3-phase	6,00 Vrms		
<b>Result Voltage unbalance</b>	<b>Pass</b>		
Frequenz			
Frequency	400 Hz		
Limit- min Phase	395,00 Hz		
Limit- max Phase	405,00 Hz		
<b>Result Steady-state voltage per phase</b>	<b>Pass</b>		

#### 4.2.2 Amplitude und Phasenbezug

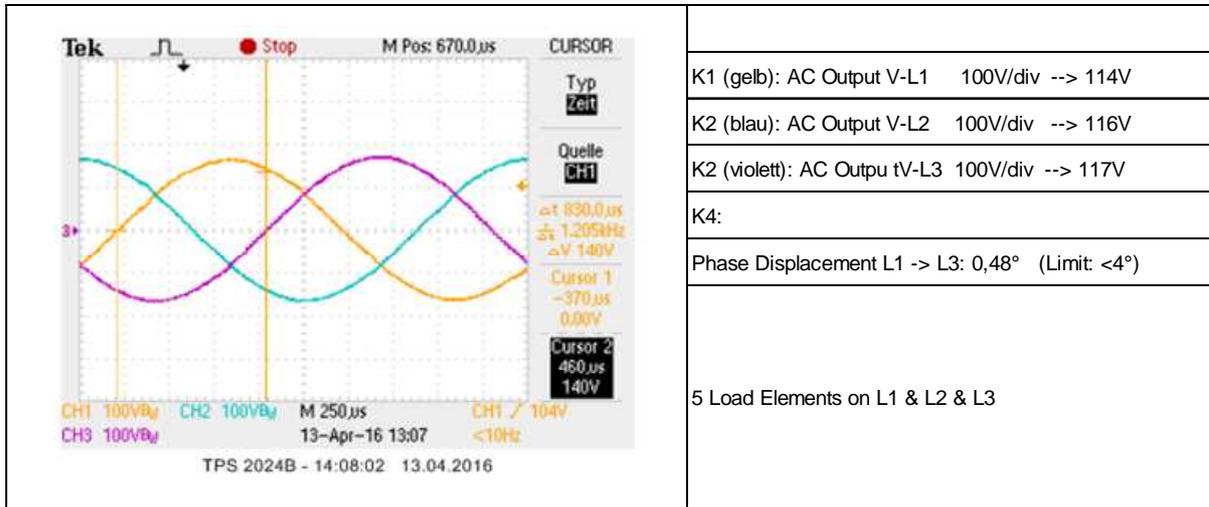


Abbildung II-45: Amplitude und Phase unter Vollast (1)

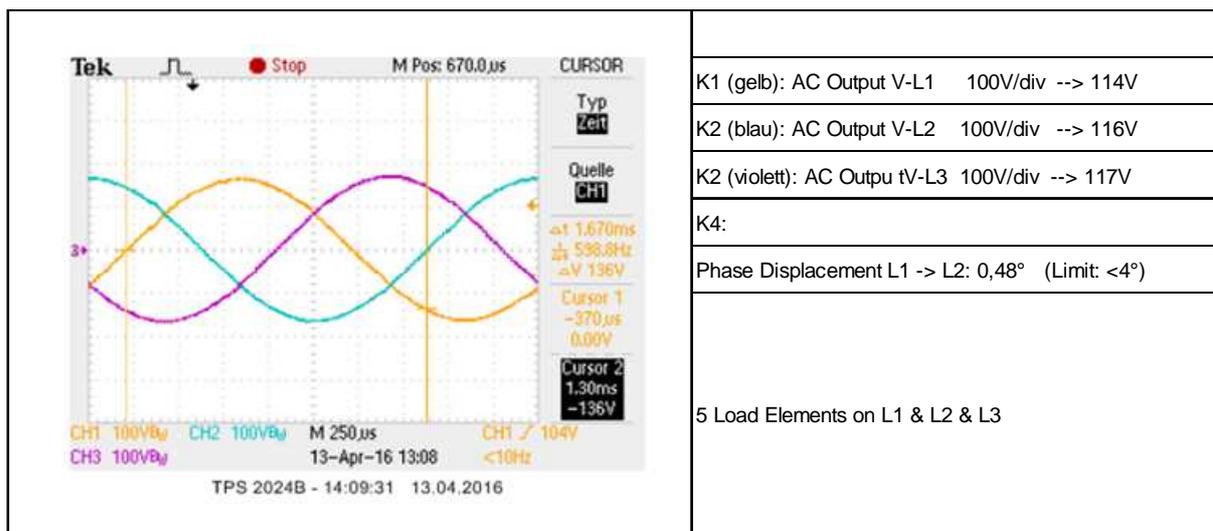
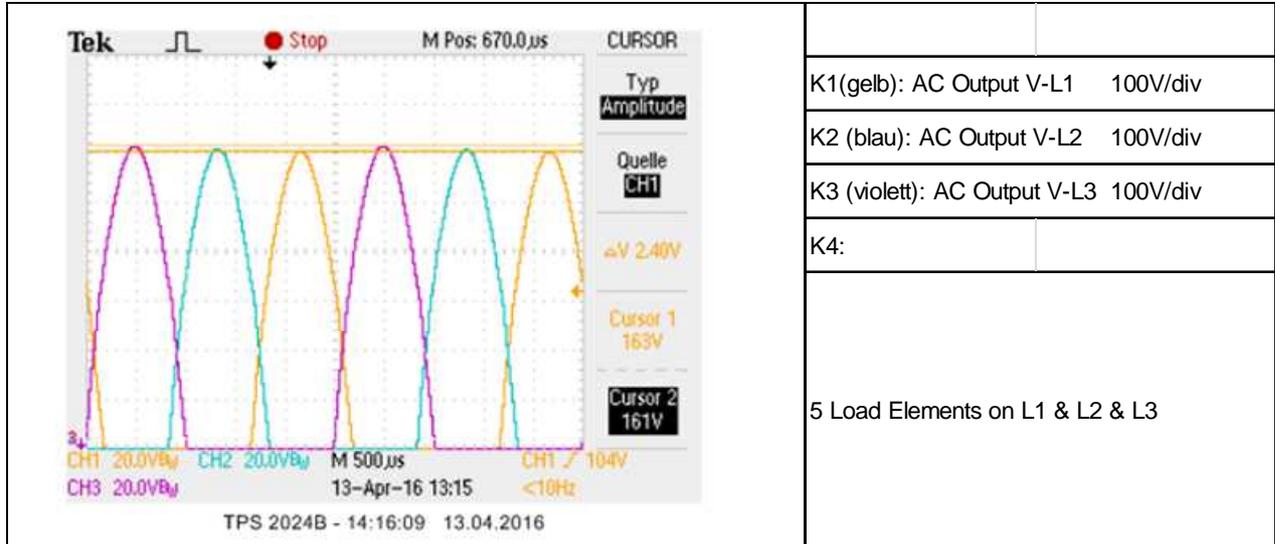


Abbildung II-46: Amplitude und Phase unter Vollast (2)

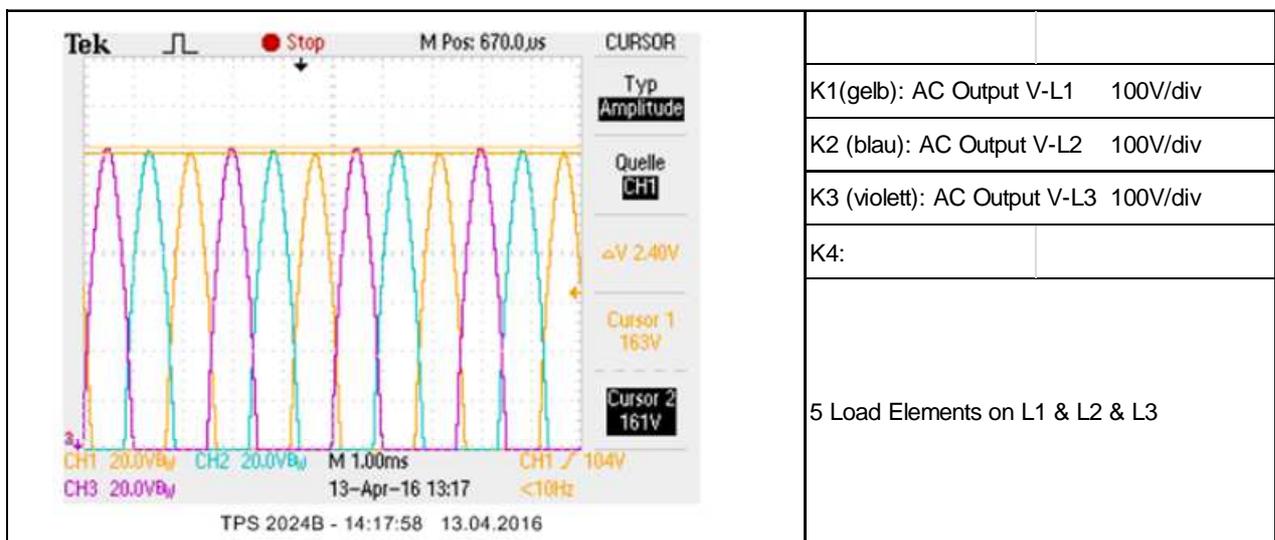
Tabelle II-13: Bewertung Amplituden und Phasenlage

	Displacem. L1 / L2	Displacem. L1 / L3
Phi	2,0857 rad	4,1975 rad
PI	3,1416	3,1416
Phaseshift	0,830 ms	1,670 ms
Phi	119,5 deg	240,5 deg
Frequenz	400,00 Hz	400,00 Hz
Periode	2,500 ms	2,500 ms
Phaseshift	120,0 deg	240,0 deg
Voltage Displacement	-0,5 deg	0,5 deg
Limit- min Phase	-4,0 deg	-4,0 deg
Limit- max Phase	4,0 deg	4,0 deg
<b>Result Voltage Displacement</b>	<b>pass</b>	<b>pass</b>

#### 4.2.3 Modulation der Spannungsamplituden



**Abbildung II-47:** Modulation der Spannungsamplituden bei Vollast (1)



**Abbildung II-48:** Modulation der Spannungsamplituden bei Vollast (2)

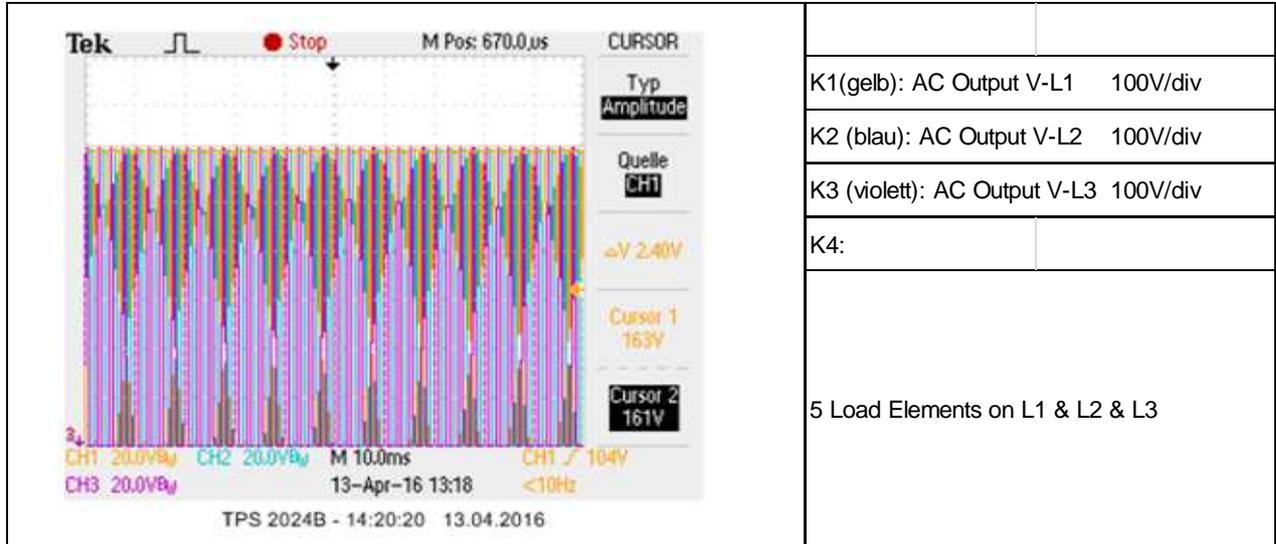


Abbildung II-49: Modulation der Spannungsamplituden bei Volllast(3)

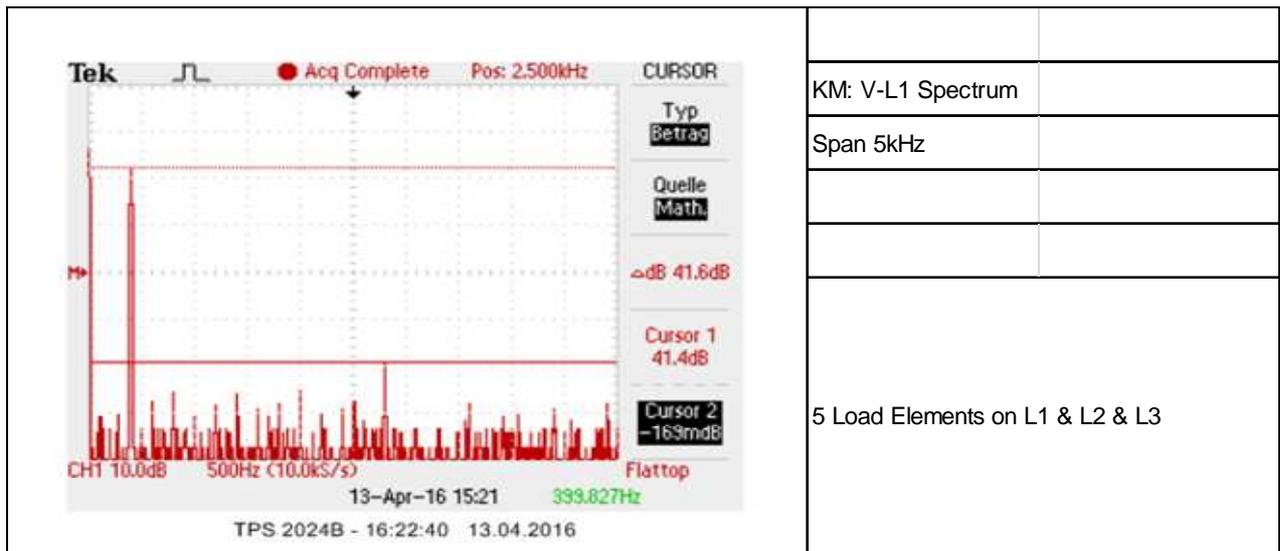
Tabelle II-14: Bewertung der Amplitudenmodulation bei Volllast

Amplitudenwert	Ablesewert	Sollwert	Test Pass / Fail
Messwert: Voltage Modulation Amplitude	2,40 Vpp		
Limit- min Phase		0,00 Vpp	
Limit- max Phase		3,50 Vpp	
<b>Result Voltage Displacement</b>			<b>Pass</b>

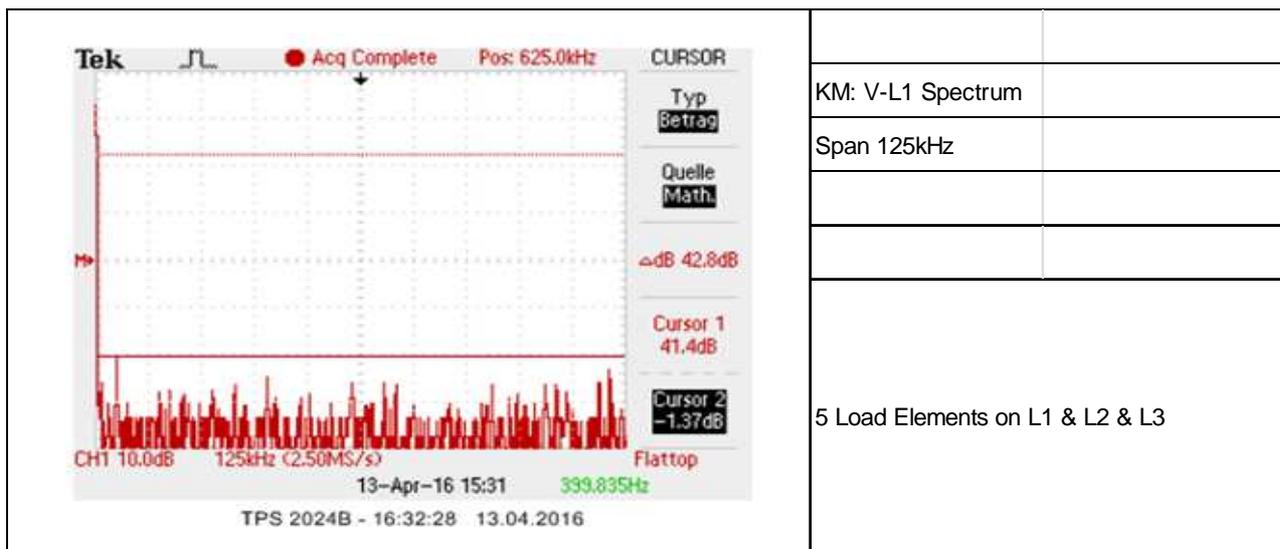
#### 4.2.4 Harmonischen Oberschwingungen der Ausgangswchselfspannung

Alle drei Phasen (L1, L2, L3) wurden mit Scope im Spectrum Analyzer Mode gemessen. Die folgenden drei Plots zeigen das gemessene Spektrum für Phase L1 bei unterschiedlichen Frequenzbandbreiten unter Vollast.

Dargestellt sind nur die Werte der Phase L1. Die Messungen der Phasen L2 und L3 zeigten identische Ergebnisse.



**Abbildung II-50:** Harmonische Oberschwingung der Phase L1 bei Vollast (1)



**Abbildung II-51:** Harmonische Oberschwingung der Phase L1 bei Vollast (2)



**Abbildung II-52:** Harmonische Oberschwingung der Phase L1 bei Vollast (3)

**Tabelle II-15:** Bewertung Oberschwingungsmessung bei Vollast

<b>Messung Oberschwingung</b>	
	<b>AC - Output</b>
Voltage Fundamental 400Hz (Messwert)	41,400 dBV
Voltage Fundamental 400Hz	117,49 Vrms
Voltage individual highest Level	-0,169 dBV
Voltage individual highest Level	0,98 Vrms
Frequency individual highest level	2,80 kHz
Individual harmonic distortion	0,83 %
Limit- max Phase (Distortion Factor)	8,00 %
<b>Result Individual harmonic distortion</b>	<b>Pass</b>

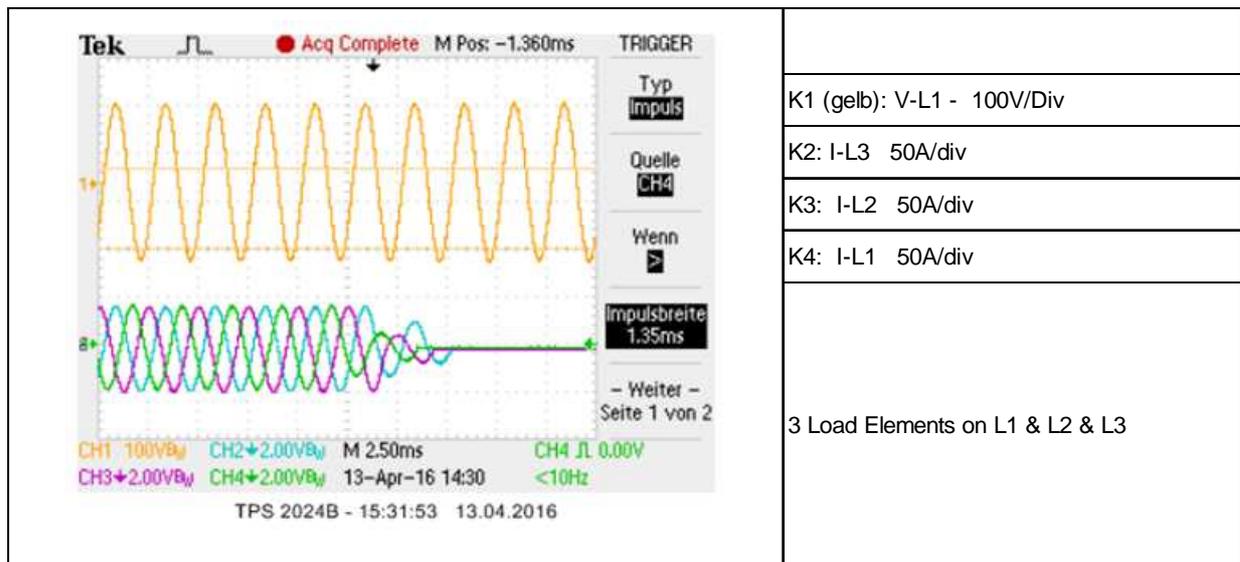
### 5. Output Power dynamischer Betrieb

Bei den folgenden Messungen waren die Ausgangsspannungen des Wechselrichters immer eingeschaltet und Lastwechsel vorgenommen.

Dabei soll der Einfluss dieser abrupten Lastwechsel auf die Stabilität der Ausgangsspannungen und der Frequenz gemessen werden.

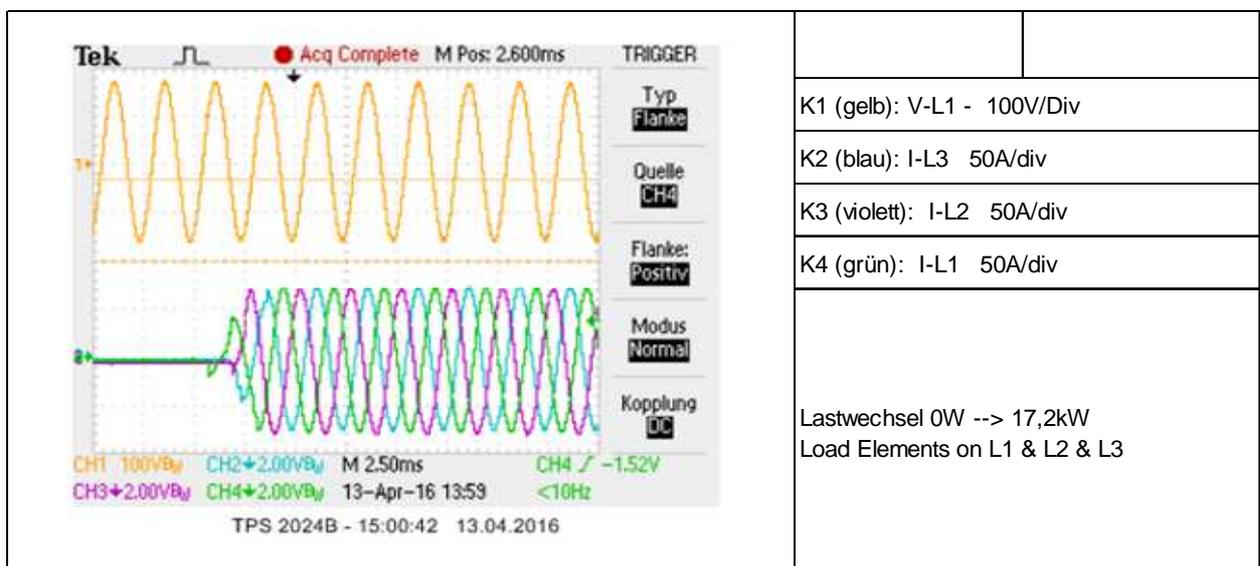
In den Messplots werden sowohl die Phasenspannungen als auch die –ströme aufgezeigt.

Abbildung II-53 zeigt die Auswirkungen auf Spannungen und Ströme bei einem Lastwechsel von 3x 3,4kW zu Leerlauf.

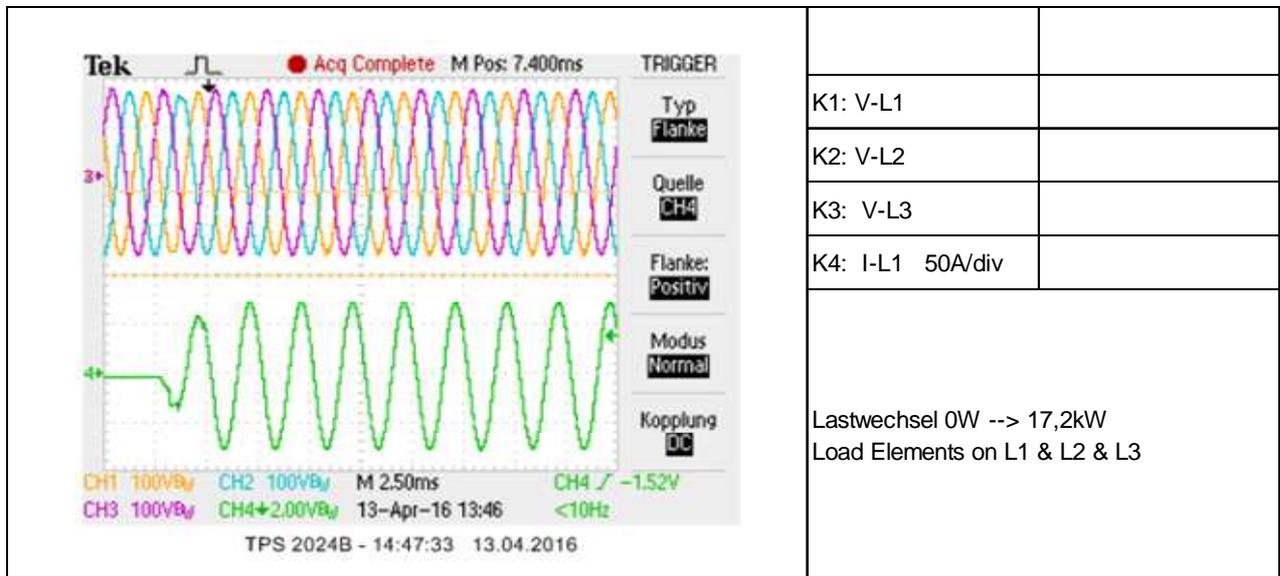


**Abbildung II-53:** Lastwechsel mit 3 Lastsegmenten je Phase (Abschalten 3 x 3,4kW)

Abbildung II-54, Abbildung II-55, Abbildung II-56, Abbildung II-57, Abbildung II-58 zeigen die Auswirkungen auf Spannungen und Ströme bei Lastwechsel von 3x 5,7kW zu Leerlauf und umgekehrt.

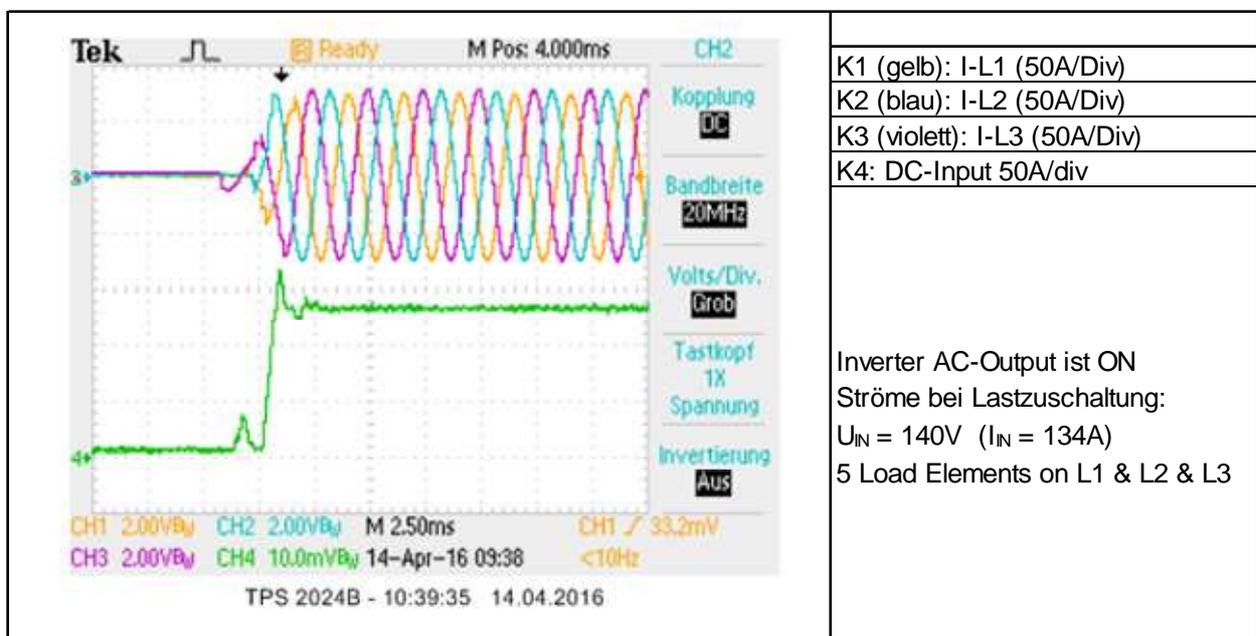


**Abbildung II-54:** Lastwechsel mit 5 Lastsegmenten je Phase (Einschalten 3 x 5,7kW) (1)

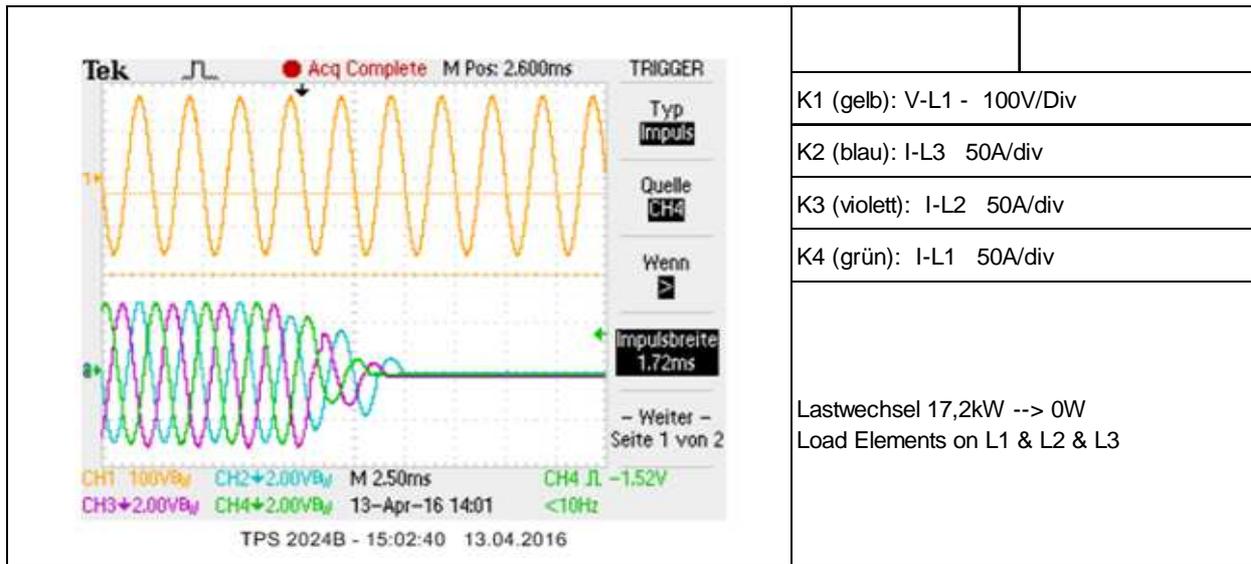


**Abbildung II-55:** Lastwechsel mit 5 Lastsegmenten je Phase (Einschalten 3 x 5,7kW) (2)

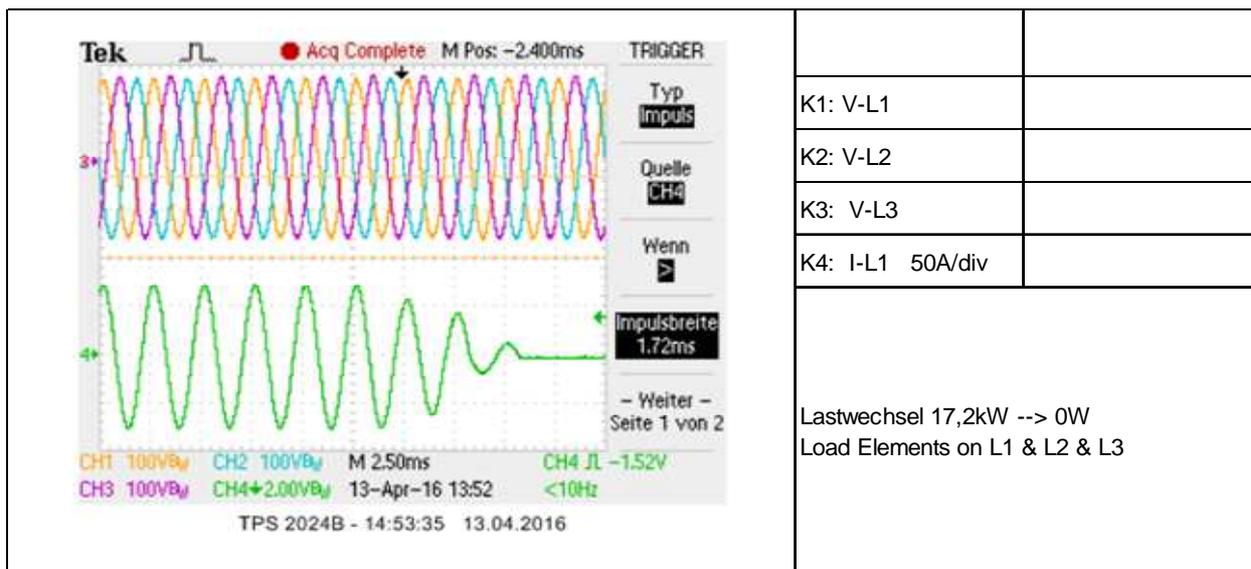
Die folgende Abbildung II-56 zeigt den Anstieg der Phasenströme L1, L2, L3 innerhalb von  $t = 2,5\text{ms}$ . Im Kanal 4 wird der Eingangsstrom der DC/DC-Konverter dargestellt.



**Abbildung II-56:** Lastwechsel mit 5 Lastsegmenten je Phase (Einschalten 3 x 5,7kW) (3)



**Abbildung II-57:** Lastwechsel mit 5 Lastsegmenten je Phase (Abschalten 3 x 5,7kW) (1)



**Abbildung II-58:** Lastwechsel mit 5 Lastsegmenten je Phase (Abschalten 3 x 5,7kW) (2)

**Tabelle II-16:** Bewertung der Lastwechsel

<b>Spannungs- und Frequenzstabilität bei Lastwechsel</b>			
	L1-Output	L2-Output	L3-Output
Voltage excursion	Keine Beeinflussung durch die Lastwechsel	Keine Beeinflussung durch die Lastwechsel	Keine Beeinflussung durch die Lastwechsel
Result Voltage Excursion	<b>Pass</b>	<b>Pass</b>	<b>Pass</b>
Frequency excursion	Keine Beeinflussung durch die Lastwechsel	Keine Beeinflussung durch die Lastwechsel	Keine Beeinflussung durch die Lastwechsel
Result Frequency Excursion	<b>Pass</b>	<b>Pass</b>	<b>Pass</b>

Ergebnis: Bei den Lastwechseln konnte keine Beeinflussung der Amplituden und Frequenzen beobachtet werden.

## 6. Crest Factor

Crest Faktor ist das Verhältnis von Spitzenwert zu Effektivwert einer AC Schwingung. Bei einer unverzerrten reinen Sinusschwingung beträgt der Crest Faktor 1,414 (= Wurzel aus 2).

Die zu testende Leistungselektronik muss in der Lage sein, die vorgegebenen Crest Faktor Werte zu bestehen, ohne dass die AC Ausgangsspannungen instabil werden.

Der nachfolgende Plot (Abbildung II-59) zeigt das Ergebnis der Crest Faktor Messung bei einer Leistung von 17,2 kW.

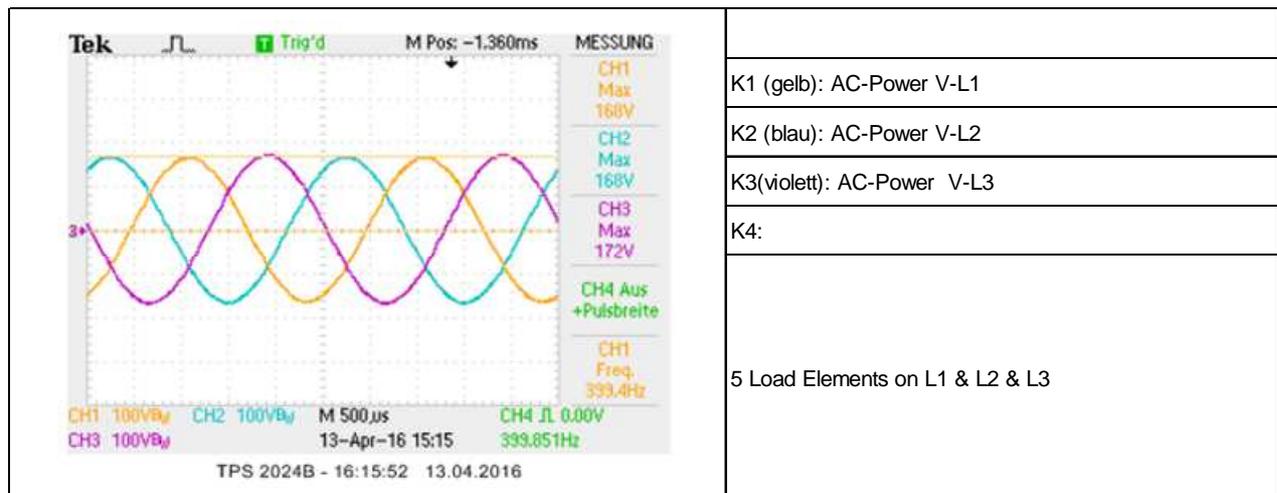


Abbildung II-59: Crest Factor Messung

Tabelle II-17: Bewertung Crest Factor

Messung Crest Factor			
Werte gemessen	L1-Output	L2-Output	L3-Output
VRMS (Voltmeter)	115,00 Vrms	114,70 Vrms	114,50 Vrms
Vpeak	168,00 Vpeak	168,00 Vpeak	172,00 Vpeak
Crest Factor	1,465	1,465	1,502
Limit- min Phase	1,26	1,26	1,26
Limit- max Phase	1,56	1,56	1,56
<b>Result Crest Factor</b>	<b>pass</b>	<b>pass</b>	<b>pass</b>

## 7. Load Unbalance

Das nachfolgende Diagramm zeigt die maximal zulässige Unbalance pro Phase.

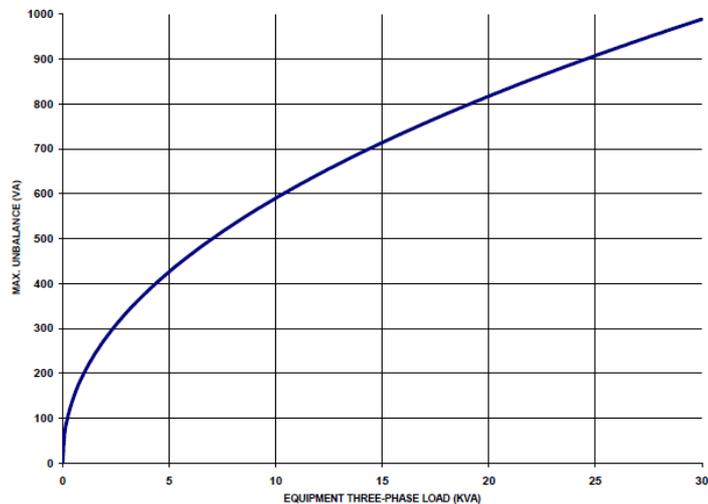


Abbildung II-60: Unbalance Anforderung (ABD0100.1.8)

Entsprechend Diagramm ist bei einer geforderten maximalen Ausgangsleistung von

$$P = 3 \times 5 \text{ kVA} = 15 \text{ kVA}$$

eine „Unbalance“-Fähigkeit von  $\geq 714 \text{ VA}$  gefordert.

Der folgende Test wurde mit einer Unbalance von 1,1kW zwischen der Phase L1 (4,6kW) und den Phasen L2/L3 (je 5,7kW) durchgeführt.

In Abbildung II-61 und Abbildung II-62 werden die Phasenspannungen und Phasenströme dargestellt (L1, L2, L3). Kanal K4 zeigt die Auswirkung der unsymmetrischen Belastung auf den Eingangsstrom der DC/DC-Konverter.

Es wurde keine Beeinflussung in der Spannungsstabilität festgestellt. Der Test gilt somit als erfolgreich bestanden.

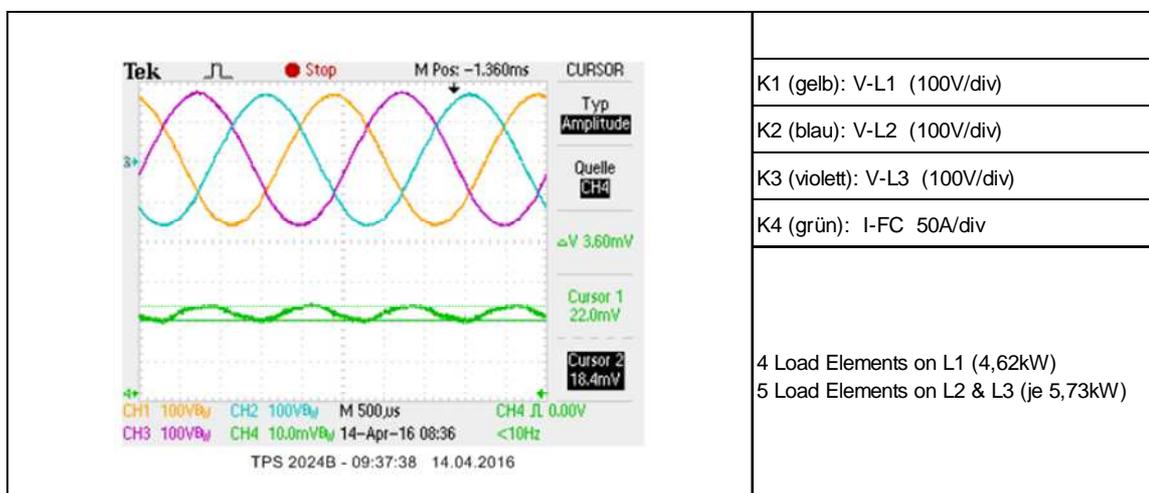


Abbildung II-61: Unbalance Messung (1)

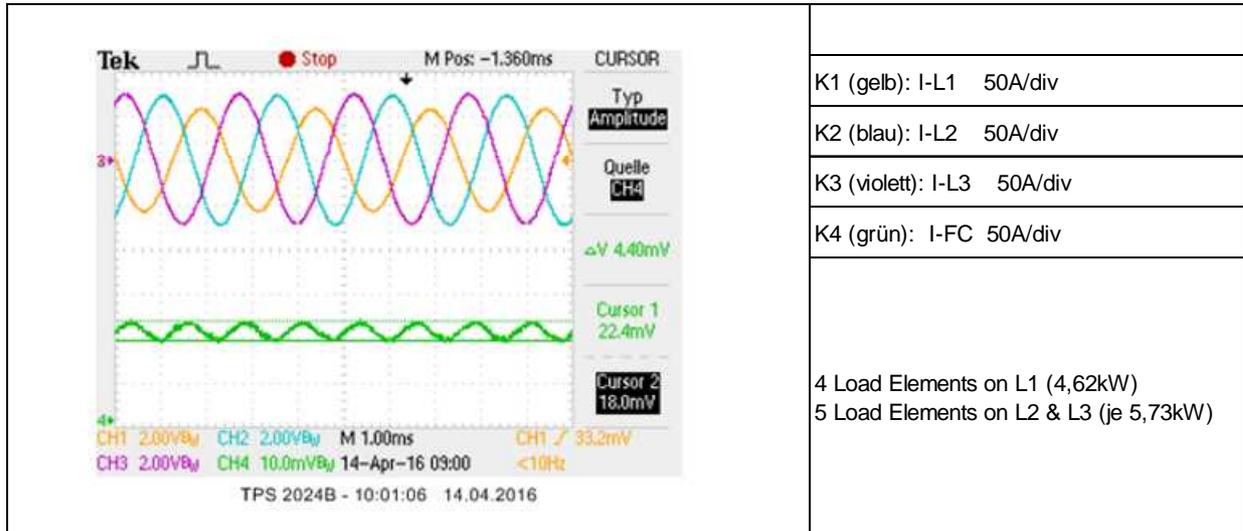


Abbildung II-62: Unbalance Messung (2)

Tabelle II-18: Bewertung der Messergebnisse bei Load Unbalance

Voltage Unbalance			
Messwerte:	L1-Output	L2-Output	L3-Output
Current	40,13 A	50,05 A	50,10 A
Voltage	115,30 Vrms	114,80 Vrms	114,50 Vrms
Limit- min Phase	108,00 Vrms	108,00 Vrms	108,00 Vrms
Limit- max Phase	122,00 Vrms	122,00 Vrms	122,00 Vrms
<b>Result Steady-state voltage per phase</b>	<b>pass</b>	<b>pass</b>	<b>pass</b>

U-average 3-phase	114,87 Vrms
Limit- min average-3-phase	109,50 Vrms
Limit- max average-3-phase	120,50 Vrms
<b>Result Steady-state voltage average of three phases</b>	<b>pass</b>

Voltage unbalance	0,80 Vrms
Limit- min average-3-phase	0,00 Vrms
Limit- max average-3-phase	6,00 Vrms
<b>Result Voltage unbalance</b>	<b>pass</b>

Bei Last „Unbalance“ wurde folgendes Spektrum auf der Eingangsseite der DC/DC-Konverter gemessen:

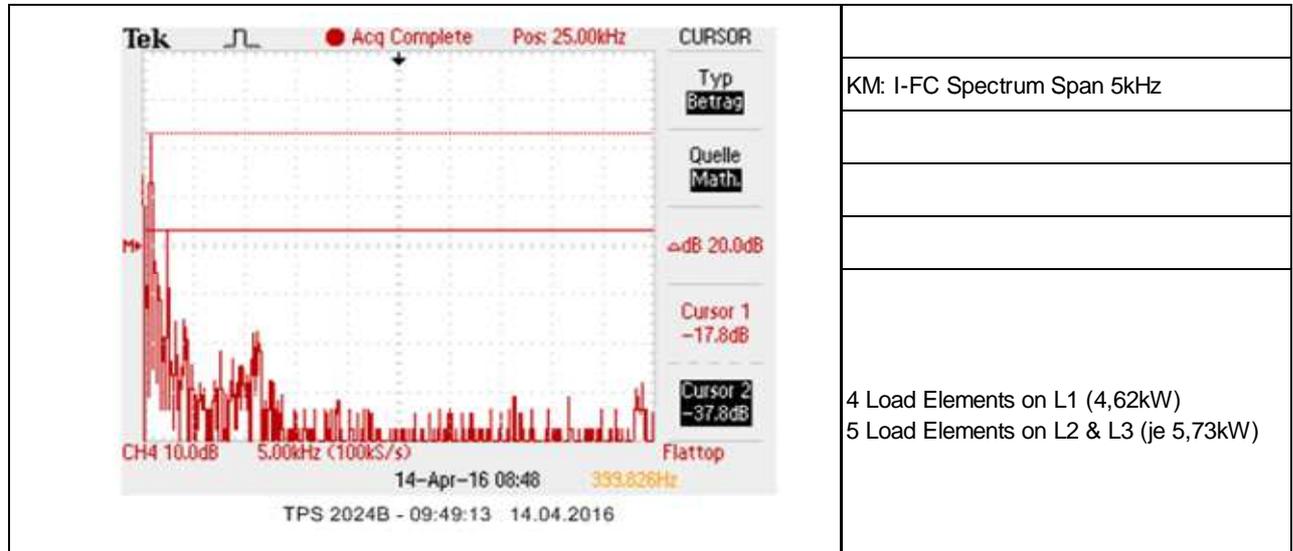


Abbildung II-63: Frequenzspektrum am Konverter DC-Eingang bei Load Unbalance

Tabelle II-19: Auswirkung der Load Unbalance auf den-Konverter-Eingang

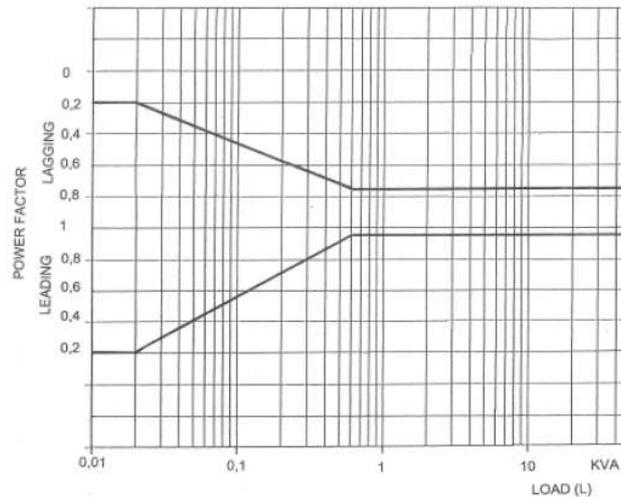
Eingangsströme (Wechselstromanteil) DC/DC-Konverter	
FC Current AC-portion Fundamental 800Hz LEM Voltage reading	<b>-37,800 dBV</b>
FC Current AC-portion Fundamental 800Hz LEM Voltage reading	0,013 Vrms
FC Current AC-portion Fundamental 800Hz Current	<b>6,44 Arms</b>
FC Current AC-portion highest level > 800Hz LEM Voltage reading	<b>-57,400 dBV</b>
FC Current AC-portion highest level > 800Hz LEM Voltage reading	0,001 Vrms
FC Current AC-portion highest level > 800Hz Current	<b>0,67 Arms</b>
FC Current AC-portion highest level > 800Hz Frequency	<b>2,40 kHz</b>
<b>Result FC Current AC-Portion</b>	<b>no specified value.</b>

## 8. Powerfaktor

Power Faktor (PF) ist definiert als das Verhältnis von Wirkleistung (W) zu Scheinleistung (S):

$$PF = P/S$$

Der Power Faktor ist wie folgt spezifiziert:



Load (L) KVA	Power factor	
	Leading	Lagging
≤ 0.01	0.2	0.2
0.02	0.2	0.2
0.03	0.29	0.27
0.04	0.35	0.31
0.06	0.44	0.38
0.08	0.51	0.42
0.1	0.55	0.45
0.2	0.71	0.57
0.3	0.80	0.62
0.4	0.86	0.68
0.5	0.91	0.72
≥ 0.6	0.95	0.75

**Abbildung II-64:** Anforderung Power Factor (ABD0100.1.8)

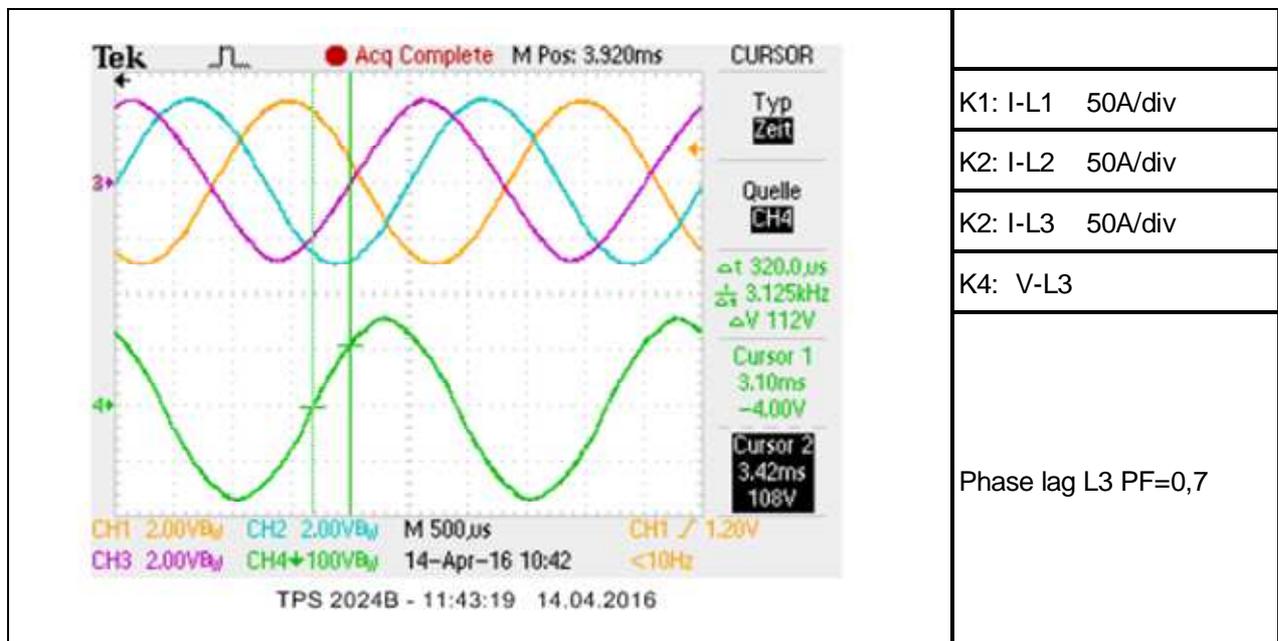
Power factor lagging bedeutet Induktive Stromkomponente. Power factor leading bedeutet kapazitive Stromkomponente.

Wie aus der Tabelle (Abbildung II-64) zu entnehmen ist, muss der Wechselrichter bei einer Ausgangsleistung ab 0,6kVA bei einer induktiven Belastung von PF = 0,75 eine stabile AC-Ausgangsspannung liefern.

Diese Belastung führt zu einem erhöhten Ripple-Strom auf der DC-Eingangsseite.

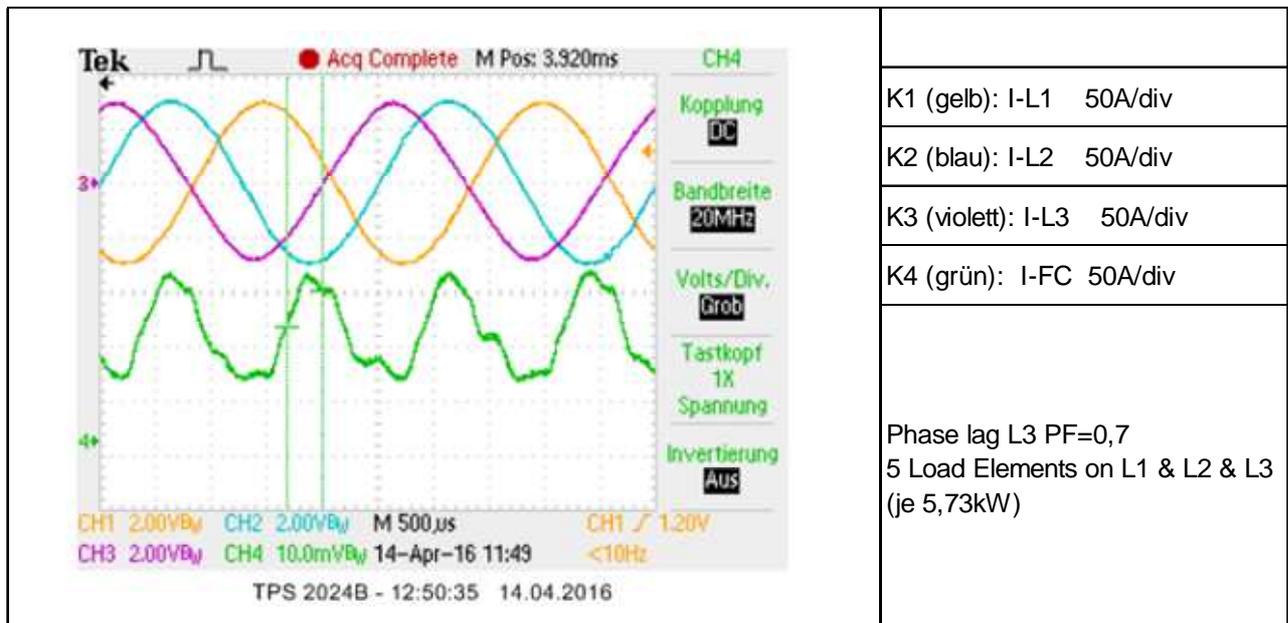
Zur Erzeugung der induktiven Komponente wurde eine entsprechende Drossel in Reihe zu den Lastwiderständen geschaltet.

Der nachfolgende Plot (Abbildung II-65) zeigt stabile Phasen-Ausgangsströme und die Ausgangsspannung der Phase L3 bei einer Ausgangsleistung von 3 x 5,73 kW und einer eingestellten induktiven Belastung von P/S = 0,7 unsymmetrisch auf der Phase L3.



**Abbildung II-65:** Power Factor – Induktive Last (1)

In Abbildung II-66 wird auf Kanal 4 (grün) die Auswirkung auf den Eingangsstrom der 4 DC/DC-Konverter durch die aktuelle Testeinstellung des Power Faktors dargestellt.



**Abbildung II-66:** Power Factor – Induktive Last (2)

Tabelle II-20: Bewertung der Power Factor Messung

	L1-Output	L2-Output	L3-Output
ULEM	2,0600 V	2,0400 V	1,9070 V
Current	51,50 A	51,00 A	47,68 A
Voltage	115,20 Vrms	114,50 Vrms	111,00 Vrms
Limit- min Phase	108,00 Vrms	108,00 Vrms	108,00 Vrms
Limit- max Phase	122,00 Vrms	122,00 Vrms	122,00 Vrms
<b>Result Steady-state voltage per phase</b>	<b>Pass</b>	<b>Pass</b>	<b>Pass</b>
U-average 3-phase	113,90 Vrms		
Limit- min average-3-phase	109,50 Vrms		
Limit- max average-3-phase	120,50 Vrms		
<b>Result Steady-state voltage average of three phases</b>	<b>Pass</b>		
Voltage unbalance	4,20 Vrms		
Limit- min average-3-phase	0,00 Vrms		
Limit- max average-3-phase	6,00 Vrms		
<b>Result Voltage unbalance</b>	<b>Pass</b>		

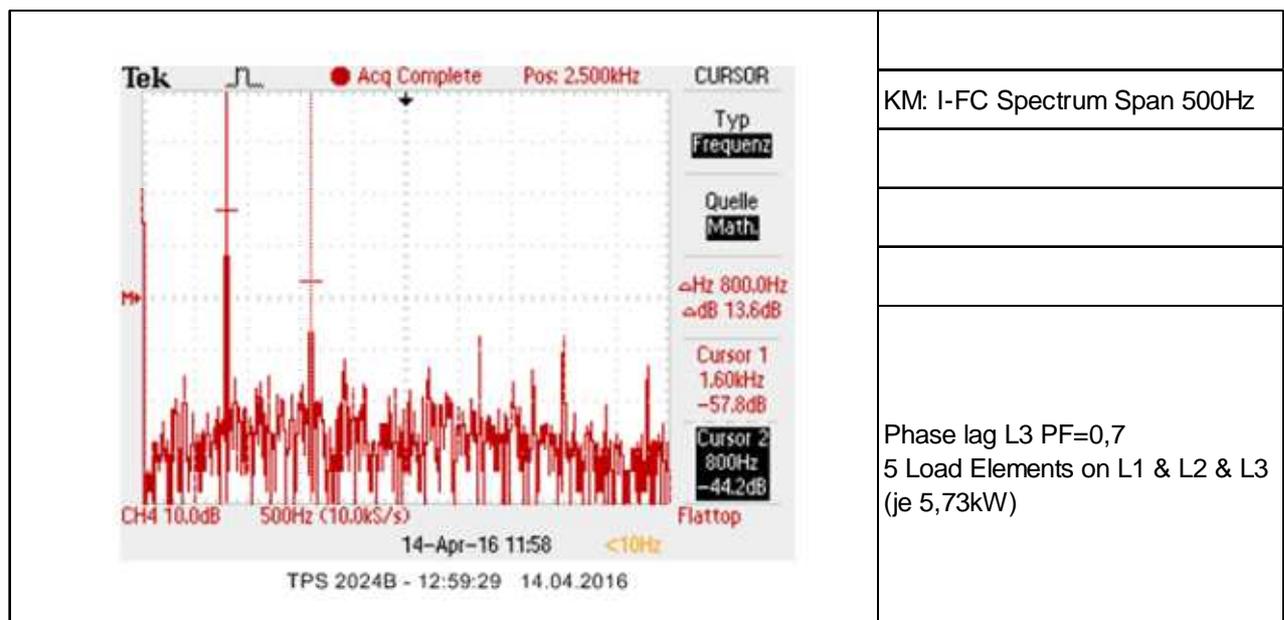


Abbildung II-67: Spektrum des Eingangsstroms der DC/DC-Konverter bei PF = 0,7 (1)

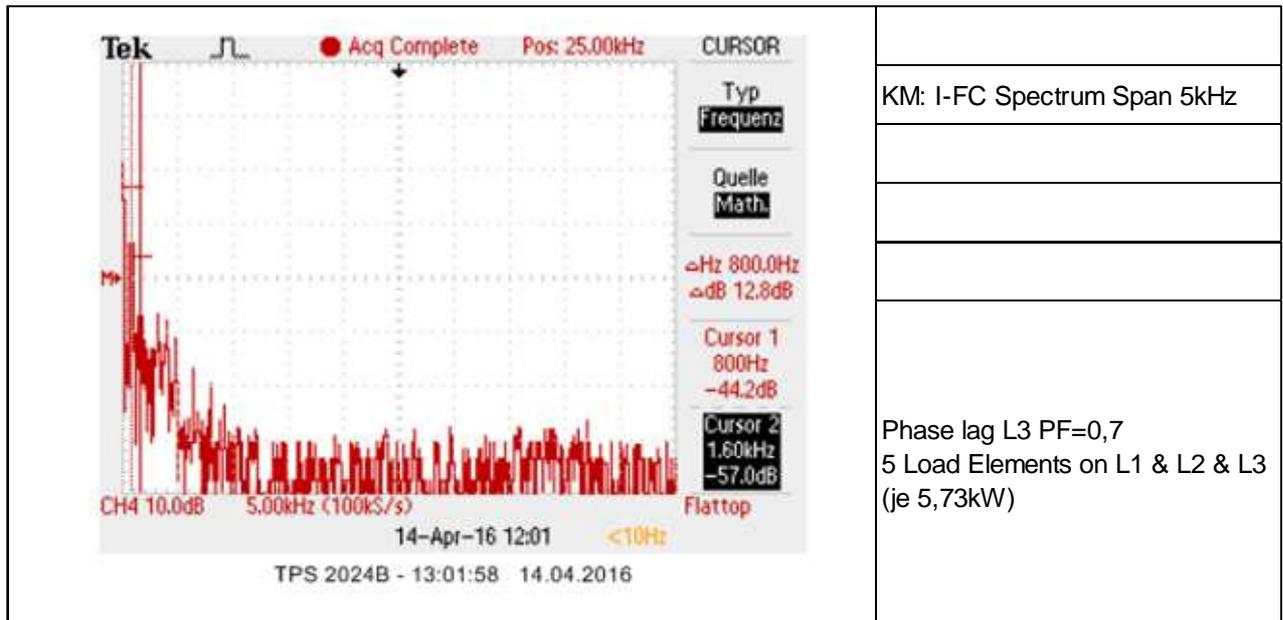


Abbildung II-68: Spektrum des Eingangsstroms der DC/DC-Konverter bei PF = 0,7 (2)

Tabelle II-21: Bewertung der Spektralanalyse des Konverter-Eingangsstroms

FC Current AC-portion Fundamental 800Hz TEK AM 503 Voltage reading	<b>-44,200 dBV</b>
FC Current AC-portion Fundamental 800Hz LEM Voltage reading	0,006 Vrms
FC Current AC-portion Fundamental 800Hz Current	<b>30,83 Arms</b>
FC Current AC-portion highest level > 800Hz LEM Voltage reading	<b>-33,000 dBV</b>
FC Current AC-portion highest level > 800Hz LEM Voltage reading	0,022 Vrms
FC Current AC-portion highest level > 800Hz Current	<b>2,80 Arms</b>
FC Current AC-portion highest level > 800Hz Frequency	<b>2,40 kHz</b>
<b>Result FC Current AC-Portion</b>	<b>no spec.</b>

## 9. Elektromagnetische Verträglichkeit

### 9.1 Conducted Emission AC Ausgang

Abbildung II-69 zeigt beispielhaft eine FFT-Analyse der AC-Ausgangsspannung an Phase L1 bei maximaler Last.

Die beiden Cursor Linien zeigen die 400Hz Grundwelle mit  $41,4\text{dB} = 117\text{ V}_{\text{RMS}}$  (Cursor 1) und die doppelte Schaltfrequenz des Schaltreglers ( $2 \times 30\text{kHz}$ ) mit  $-1,37\text{dB} = 0,9\text{V}_{\text{RMS}}$  (Cursor 2).

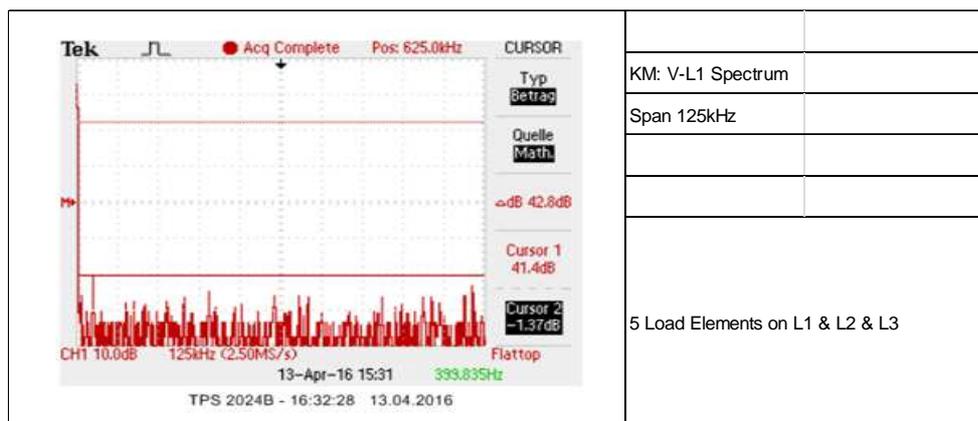


Abbildung II-69: Beispiel spektrale Darstellung der Wechselspannung an Phase L1

Dargestellt sind nur die Werte der Phase L1. Die Phasen L2, L3 zeigen identische Ergebnisse.

### 9.2 Conducted Emission Eingang DC/DC-Konverter

Bei der Emission Messung am Konverter-Eingang werden die Störungen, die durch diverse Schaltvorgänge in den DC/DC-Konvertern selbst und Rückwirkungen aus dem Wechselrichter und dessen Lastverhältnissen verursacht werden, ausgemessen.

Die Abbildung II-70 zeigt die Wechselstromanteile am DC-Eingang bei unsymmetrischer Belastung zwischen den drei Phasen L1, L2, L3.

Die unsymmetrische Belastung führt zu einem erhöhten Ripple-Strom und damit auch zu einem erhöhten Störsignalanteil auf der DC-Eingangsseite.

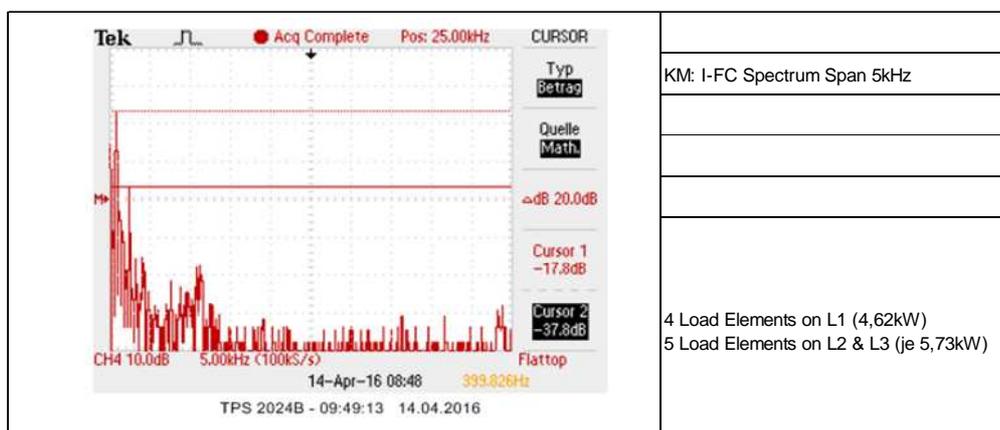


Abbildung II-70: Spektrale Darstellung des Konverter-Eingangsstromes

 Abschlussbericht	Leistungswandler für alternative Energiesysteme in zivilen Flugzeugkabinen FKZ: 20K1101M	Issue: 1
		Datum: 15.06.2016

#### II.1.4.3.4 Full Functional Test bei reduzierter Last

Im Laufe der Entwicklungszeit konkretisierte sich der im Galley für die gesamte Kette der Leistungswandler zur Verfügung stehende Einbauraum. Die geforderte Drehstromleistung wurde auf  $P_{OUT} \leq 3,5kW$  je Phase angepasst. Dadurch konnte die eingangsseitige Stromversorgung des Wechselrichters auf nur zwei DC/DC-Wandler Module reduziert werden.

Dank der modularen Aufbauweise der Leistungskette konnte bei Wechselrichter flexibel auf die neuen Raumanforderungen reagiert werden indem nur noch das Gehäuse an die neue Einbaugeometrie angepasst werden musste.

Um sicherzustellen, dass die Leistungskette mit zwei Konvertern den modifizierten Anforderungen genügen, wurden weitere Tests durchgeführt.

##### II.1.4.3.4.1 Dimension DC/AC Wechselrichtergehäuse V02

Mit den neuen geometrischen Größen wurde ein Holzmodell des Wechselrichtergehäuses erstellt und in den zur Verfügung stehenden Galley-Raum eingepasst.

Die neuen Maße sind:

- Bauvolumen: 24,6 dm<sup>3</sup>
- Baugröße L x W x H: 496 x 300 x 165 (mm)
- Gewicht: 24 kg

Die o.g. Abmessungen entsprechen der Interface Zeichnung 1117-ASP-TA-20000A00 für das modifizierte Gehäuse der Version V02 (Abbildung II-71).

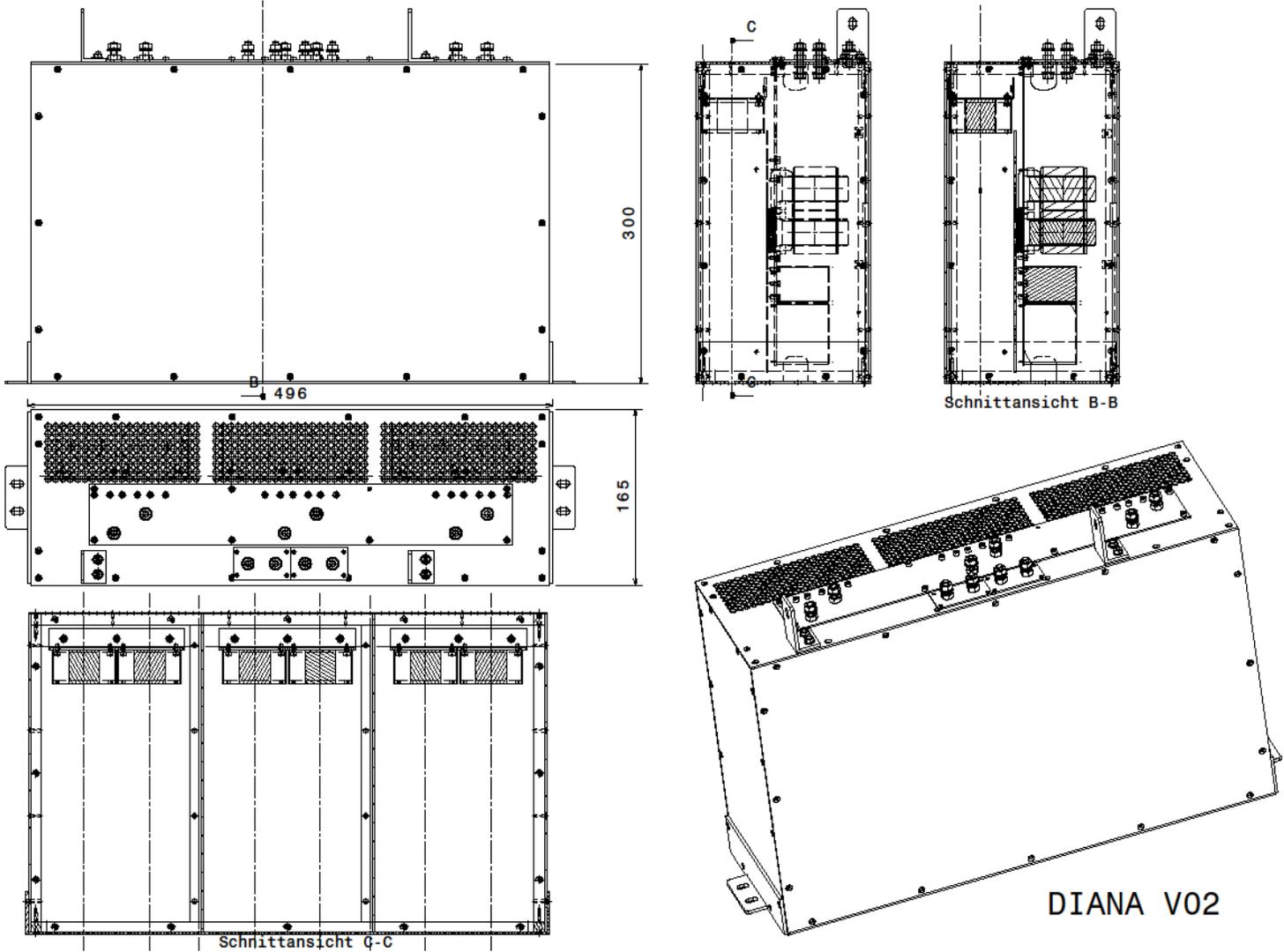


Abbildung II-71: Interface Zeichnung 1117-ASP-TA-20000A00 (Version V02)

#### II.1.4.3.4.2 Elektrische Tests

In den nachfolgenden Tests werden nur die Testschritte aus Kapitel II.1.4.3.3.2 (Vollastbetrieb) wiederholt, die für den Betrieb unter reduzierter Last im Einsatzprofil der Galley-Anwendung relevant sind.

##### 1. Leerlauf Leistungsaufnahme

In der folgenden Tabelle ist die Verlustleistung über die gesamte Leistungskette (2 x DC/DC-Konverter und 3-phas. DC/AC-Wechselrichter) ohne AC-Last dargestellt.

**Tabelle II-22: Leistungsaufnahme im Leerlauf**

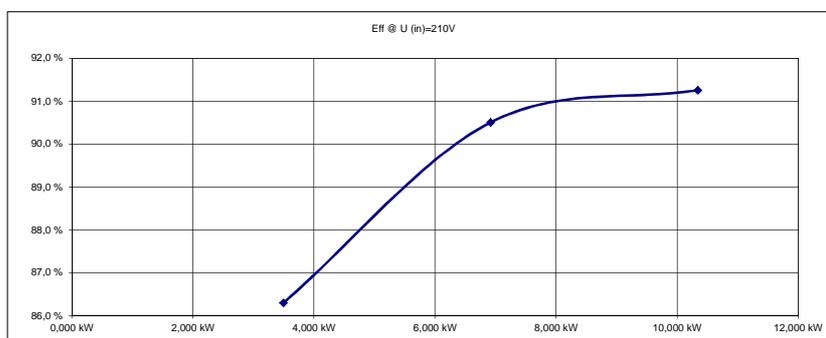
Zero Load	DC Input	L1-Output	L2-Output	L3-Output
<b>U</b>	<b>210,00 V</b>	<b>115,70 V</b>	<b>115,50 V</b>	<b>115,30 V</b>
<b>I</b>	-	0,00 A	0,00 A	0,00 A
<b>P (2 x DC/DC-Konverter)</b>	0,440 kW	0,000 kW	0,000 kW	0,000 kW
<b>P-Input</b>	<b>0,440 kW</b>			

##### 2. Ermittlung des Wirkungsgrades

Der Gesamtwirkungsgrad ( $\text{Eff } \Sigma$ ) wurde über die gesamte Leistungskette (2 x DC/DC-Konverter und DC/AC-Wechselrichter) ermittelt.

**Tabelle II-23: Gesamtwirkungsgrad**

UFC	IFC	$P_{\text{DC/DC-IN}}$	$P_{\text{AC-OUT}}$	P-dissip.	$\text{Eff } \Sigma$
<b>210,00 V</b>	-	<b>4,050 kW</b>	<b>3,495 kW</b>	<b>0,555 kW</b>	<b>86,3 %</b>
<b>210,00 V</b>	-	<b>7,640 kW</b>	<b>6,914 kW</b>	<b>0,726 kW</b>	<b>90,5 %</b>
<b>210,00 V</b>	-	<b>11,330 kW</b>	<b>10,339 kW</b>	<b>0,991 kW</b>	<b>91,3 %</b>



**Abbildung II-72: Gesamtwirkungsgrad der Leistungskette mit 2 DC/DC-Konverter**

 Abschlussbericht	Leistungswandler für alternative Energiesysteme in zivilen Flugzeugkabinen FKZ: 20K1101M	Issue: 1
		Datum: 15.06.2016

### 3. Start-Up Timing

Die drei 115V-Wechselrichter Ausgänge sind bereits mit jeweils 3 Lastelementen als reduzierte Anlaufast ( $P = 10,3\text{kW}$ ) verbunden. Die Konverter-Ausgangsspannung und damit die Eingangsspannung für den Wechselrichter wird über Kommando eingeschaltet.

Die Zeitverzögerung zwischen dem Kommando-H-Pegel und dem Start der Ausgangsspannungen  $U_{L1}$ ,  $U_{L2}$ ,  $U_{L3}$  beträgt unverändert 1,3s.

### 4. Output Power statischer Betrieb

4.1 Betrieb im Leerlauf → Keine Änderung: Alle Messungen sind nahezu identisch mit Kapitel II.1.4.3.3.2 (4.1)

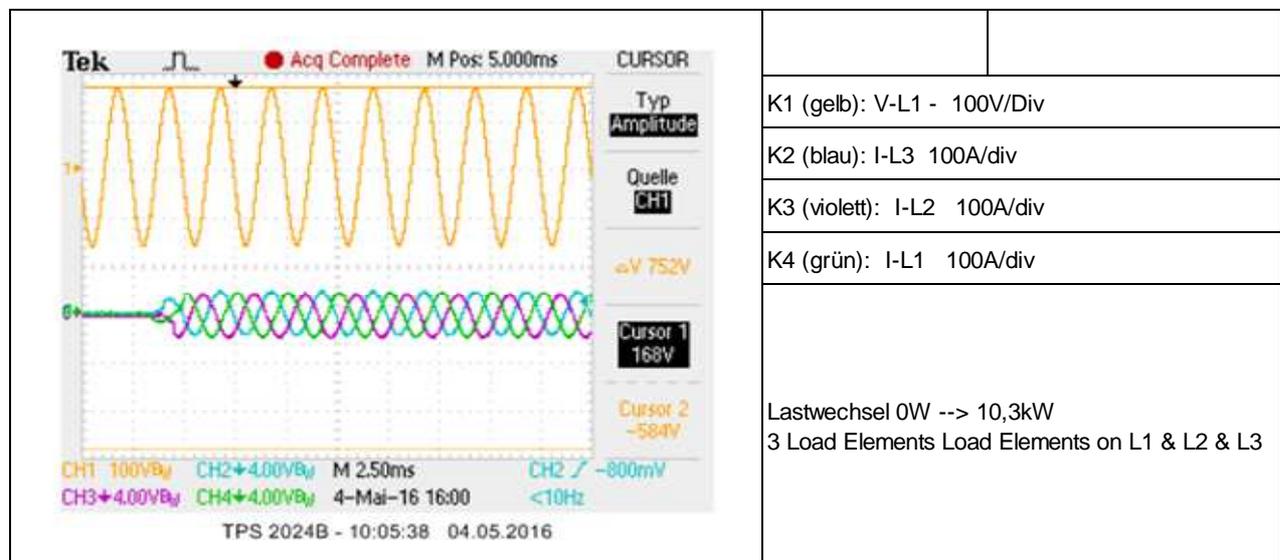
4.2 Betrieb unter Teillast → Keine Änderung: Alle Messungen sind nahezu identisch mit Kapitel II.1.4.3.3.2 (4.2)

### 5. Output Power dynamischer Betrieb

Bei den folgenden Messungen waren die Ausgangsspannungen des Wechselrichters immer eingeschaltet und es wurde ein Lastwechsel mit  $3 \times 3,43\text{kW} = 10,3\text{kW}$  vorgenommen.

Diese Messergebnisse waren ebenfalls vergleichbar mit den Werten aus Kapitel II.1.4.3.3.2 (5) Abbildung II-53.

In Abbildung II-73 wird die Auswirkung auf Amplitude und Stromverlauf beim Einschalten der Last ( $3 \times 3,43\text{kW}$ ) gezeigt.



**Abbildung II-73:** Lastwechsel mit 3 Lastelementen je Phase

Die Ausregelung der Phasenströme L1, L2, L3 erfolgte innerhalb von etwa 1,3ms.

Es konnte ferner keine Beeinflussung der Amplituden und Frequenzen beobachtet werden.

### 6. Crest Factor

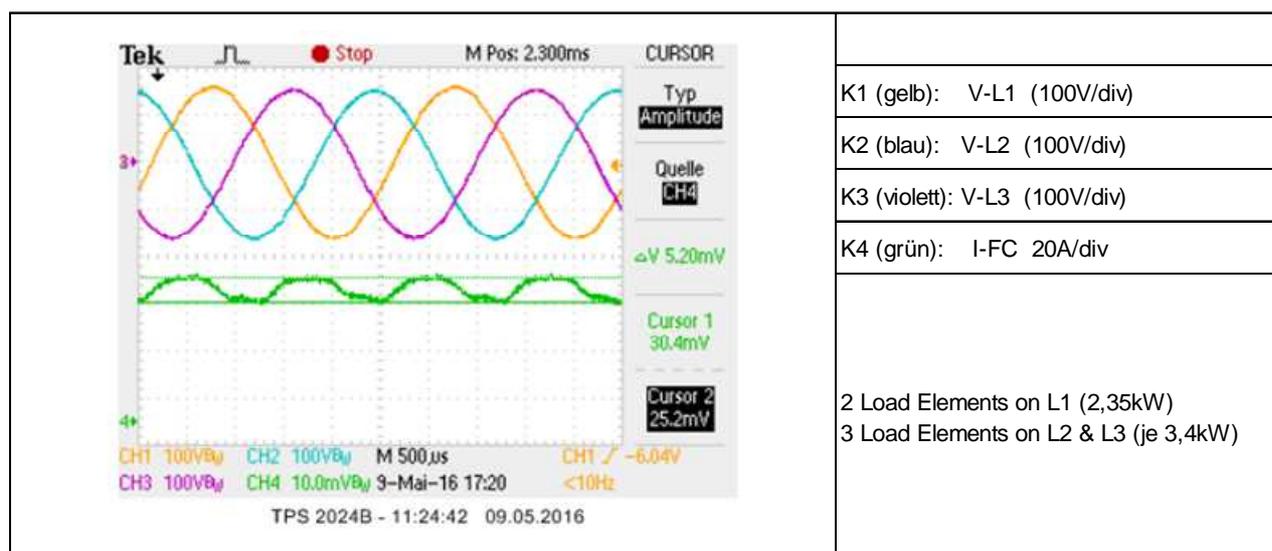
Keine Veränderung im Verhältnis von Spitzenwert zu Effektivwert der AC-Schwingungen. Die Messwerte sind identisch mit Kapitel II.1.4.3.3.2 (6).

 Abschlussbericht	Leistungswandler für alternative Energiesysteme in zivilen Flugzeugkabinen FKZ: 20K1101M	Issue: 1
		Datum: 15.06.2016

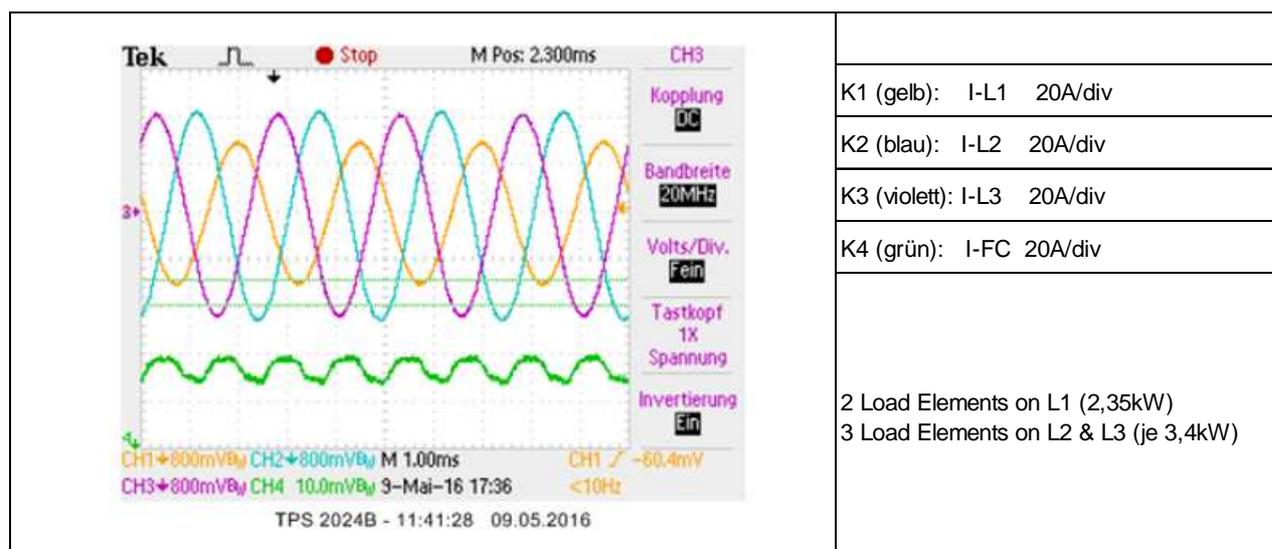
### 7. Resistive Load Unbalance

Der folgende Test wurde mit einer um ca. 1kW reduzierten Leistung zwischen der Phase L1 (2,35kW) und den Phasen L2/L3 (je 3,4kW) durchgeführt.

In Abbildung II-74 und Abbildung II-75 werden die Phasenspannungen und Phasenströme dargestellt (K1, K2, K3). Kanal K4 zeigt die Auswirkung der unsymmetrischen Belastung auf den Eingangsstrom der zwei DC/DC-Konverter.



**Abbildung II-74:** Unbalance Messung bei Teillast (1)



**Abbildung II-75:** Unbalance Messung bei Teillast (2)

 Abschlussbericht	Leistungswandler für alternative Energiesysteme in zivilen Flugzeugkabinen FKZ: 20K1101M	Issue: 1
		Datum: 15.06.2016

Tabelle II-24: Bewertung der Messergebnisse bei Load Unbalance unter Teillast

Voltage Unbalance			
Messwerte:	L1-Output	L2-Output	L3-Output
Current	20,35 A	30,04 A	29,60 A
Voltage	115,50 Vrms	115,00 Vrms	114,90 Vrms
Limit- min Phase	108,00 Vrms	108,00 Vrms	108,00 Vrms
Limit- max Phase	122,00 Vrms	122,00 Vrms	122,00 Vrms
<b>Result Steady-state voltage per phase</b>	<b>Pass</b>	<b>Pass</b>	<b>Pass</b>

U-average 3-phase	115,13 Vrms
Limit- min average-3-phase	109,50 Vrms
Limit- max average-3-phase	120,50 Vrms
<b>Result Steady-state voltage average of three phases</b>	<b>Pass</b>

Voltage unbalance	0,60 Vrms
Limit- min average-3-phase	0,00 Vrms
Limit- max average-3-phase	6,00 Vrms
<b>Result Voltage unbalance</b>	<b>Pass</b>

Es wurde keine Beeinflussung in der Stabilität der Ausgangsspannungen festgestellt. Der Test gilt somit als erfolgreich.

 Abschlussbericht	Leistungswandler für alternative Energiesysteme in zivilen Flugzeugkabinen FKZ: 20K1101M	Issue: 1
		Datum: 15.06.2016

## II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Im Folgenden sind die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises mit Stand vom 06.06.2016 aufgelistet.

1.1	Position	Gesamtvorkalkulation (€)	Gesamtnachkalkulation (€)
0813	Material		
0823	FE-Fremdleistungen		
0837	Personalkosten		
0838	Reisekosten		
0847	Abschreibungen auf vorhabenspezifische Anlagen		
0848	Abschreibungen auf sonstige genutzte Anlagen des FE-Bereichs		
0850	Sonstige unmittelbare Vorhabenkosten		
0855	<b>Summe</b> unmittelbare Vorhabenkosten (Pos 0813 – 0850)		
0856	Kosten innerbetrieblicher Leistungen		
0860	Verwaltungskosten		
0881	<b>Gesamte Selbstkosten des Vorhabens</b> (Summe Pos. 0855 – 0860)		

	Zuwendung		
	Erhalten bisher		
	<b>Noch offen</b>		

Note: Werte wegen Veröffentlichung entfernt.

**Tabelle II-25: Zahlenmäßiger Nachweis**

 Abschlussbericht	Leistungswandler für alternative Energiesysteme in zivilen Flugzeugkabinen FKZ: 20K1101M	Issue: 1
		Datum: 15.06.2016

### **II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Die gewährte Zuwendung wurde von ASP-Equipment benötigt, um die durch den Vorhabensführer DIEHL definierten Parameter hinsichtlich der Leistungselektronik für die Energieautarke Galley erreichen zu können.

Im Bereich der Luft- und Raumfahrt sind sehr lange Zeiten für eine Produktreifmachung von der Konzeptidee bis hin zu einem marktfähigen Serienprodukt erforderlich. Gerade die Konzeption eines neuen hochtechnologischen Gesamtsystems erfordert dabei industriennahe Forschungsaktivitäten mit der dafür erforderlichen Zeit.

ASP-Equipment fehlt als private KMU die Möglichkeit liquide Mittel zu akquirieren und für industriennahe Forschungsaktivitäten langfristig zu binden. Da ASP-Equipment jedoch bestrebt ist, weiter zu wachsen und wie bisher, kontinuierlich neue Arbeitsplätze am Standort Deutschland zu schaffen, ist es zwingend erforderliche innovative zeitgemäße Produkte wie den hier beschriebenen Leistungswandler in das Unternehmensportfolio aufzunehmen. Insbesondere im Leistungswandler sehen wir ein Produkt mit dem Potential in einigen Jahren eine Serienproduktion mit bedeutender Auslastung der Unternehmensressourcen zu schaffen.

### **II.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere bzgl. der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans**

Der 15kW Leistungswandler, der im Rahmen der Energieautarken Galley entwickelt wurde zeichnet sich durch ein gutes Verwertungspotential aus.

Obwohl die Anwendung des 15kW Leistungswandlers in der Energieautarken Galley Anlass für das hiesige Fördervorhaben war, steht die hier erforschte robuste und relativ gesehen kleine und leichte Technologie zur Wandelung hoher elektrischer Energie in Flugzeugkabinen grundsätzlich auch anderen Applikationen zur Verfügung.

Es ist daher wichtig die vorliegenden Entwicklungsergebnisse in entsprechenden Fachkreisen bekannt zu machen. Dies wird ASP-Equipment unter anderem im Rahmen seines Web-Auftritts, sowie dem Messeauftritt auf der ILA durchführen.

Außerdem vermarktet ASP-Equipment diese Technologie in direkter Ansprache an mögliche Kunden.

Dennoch kommt der Anwendung der Forschungsergebnisse im Rahmen der Energieautarken Galley eine besondere Bedeutung zu, nachdem Vermarktungsaktivitäten des Vorhabensführers DIEHL erfolgsversprechende Rückmeldungen ergeben.

Allerdings ergibt sich wegen der gewonnenen Erkenntnisse im Rahmen des Vorhabens für die Energieautarken Galley aus Sicht des Gesamtsystems weiteres Einsparpotential hinsichtlich des Bauraumbedarfs des Leistungswandlers in deutlichem Maß. Das zum Abschluß dieses Vorhabens erreichte Layout des Energieautarken Trolleys entspricht noch nicht den Erfordernissen des Gesamtsystems. Aus diesem Grund sind weiter führende industriennahe Forschungsaktivitäten erforderlich.

 Abschlussbericht	Leistungswandler für alternative Energiesysteme in zivilen Flugzeugkabinen FKZ: 20K1101M	Issue: 1
		Datum: 15.06.2016

## **II.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

-keine-

## **II.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses**

Es sind folgende Aktionen entweder bereits durchgeführt, oder sind kurzfristig geplant:

1. Teilnahme an einem Workshop mit dem Cluster Brennstoffzelle BW. Ziel ist es die Industrialisierung der mobilen und stationären Brennstoffzellenanwendungen voranzutreiben.
2. Präsentation der Technologie im Rahmen des Messeauftritts ILA 2016 im Juni 2016.
3. Aufnahme der Technologie in den ASP Internetauftritt, u.a. damit bei evtl. Google Anfragen die ASP Kompetenz erscheint.

 Abschlussbericht	Leistungswandler für alternative Energiesysteme in zivilen Flugzeugkabinen FKZ: 20K1101M	Issue: 1
		Datum: 15.06.2016

### III. Anlage I – Kurzgefasster Erfolgskontrollbericht

#### III.1 Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen

Mit der Entwicklung eines 15 kW Leistungswandlers sollte eine Basistechnologie mit Ausrichtung auf das Ziel einer nachhaltigen Luftfahrt erforscht werden.

Durch das Vorhandensein des technisch und wirtschaftlich vorteilhaften „Leistungswandlers für alternative Energiesysteme in zivilen Flugzeugkabinen“ bei ASP, bringt sich eine deutsche KMU in eine strategisch günstige Position.

Weiter ist die Technologie mit ASP bei einem KMU verfügbar. Dies entspricht dem strategischen Ziel des BMWi, auch KMUs technisch und wirtschaftlich zu stärken.

#### III.2 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse des Vorhabens, erreichte Nebenergebnisse und wesentliche gesammelte Erfahrung

Zu Beginn des Teilvorhabens sollte ein Leistungswandler, zum eingangsseitigen Anschluss an ein Li-Ion Akkusystem mit einer DC Spannung im Bereich von 137V bis 216V entwickelt werden. Die Ausgangsseite sollte die für eine Bordspannung üblichen Parameter (3x115VAC, Drehstrom, 400Hz) bereitstellen. Die Dauer-Ausgangsleistung des Wechselrichters wurde mit 15kVA angenommen.

Als Ergebnis von Trade-offs wurden Leistungswandler mit modular kombinierbaren Funktionsmodulen entwickelt, mit denen der in der Luftfahrt übliche Drehstrom mit 3 x 115V 400 Hz und als alternativer Abgriff eine +/-270V DC Spannung zur Verfügung gestellt werden soll, um mit zukünftigen Hochvolt-Bordnetzen kompatibel zu sein.

Die maximale geregelte Eingangsspannung für den Wechselrichter durfte jedoch wegen der zur Verfügung stehenden Halbleiter +/- 215V ( $\rightarrow 430V_p$ ) nicht überschreiten.

Um flexibel auf die Anforderungen reagieren zu können wurden die Ausgangsspannungen der DC/DC-Konverter umschaltbar gestaltet:

- +/- 270V / 15kW zur Simulation eines Hochvolt-Bordnetzes  $U = 540V_{DC}$
- +/- 215V / 12kW zur Spannungsversorgung des Wechselrichters

Durch die Parallelschaltung zweier zusätzlicher Konverter konnte der Wechselrichter bis zu seiner maximal möglichen Dauerausgangsleistung von 15kVA betrieben und getestet werden.

Abbildung III-1 zeigt das Blockschaltbild der Leistungskette



 Abschlussbericht	Leistungswandler für alternative Energiesysteme in zivilen Flugzeugkabinen FKZ: 20K1101M	Issue: 1
		Datum: 15.06.2016

Nachdem der Einbauraum für den Wechselrichter weiter konkretisiert werden konnte verringerte sich mit dessen modifizierten mechanischen Design das Einbauvolumen von 38,9 dm<sup>3</sup> auf 24,6 dm<sup>3</sup>. Das Gewicht vermindert sich auf etwa 24,0 kg.

Umfangreichen Recherchen zeigten überdies, dass am Markt keine Wechselrichter mit vergleichbaren Leistungen (115V / 400Hz / 15kW / 3-phasig) mit diesen geringen Volumen- und Gewichtswerten erhältlich sind.

## 2. Testergebnisse elektrische Performance

Die Ergebnisse aus der Testphase werden umfassend als positiv betrachtet. Alle elektrischen Tests sind damit erfolgreich abgeschlossen.

Für eine mögliche zukünftige Überarbeitung und Serienverwendung des Designs müssen sowohl die elektrischen als auch mechanischen Anforderungen genauer spezifiziert werden.

Designtreiber war die Erzielung eines maximalen Wirkungsgrades.

Bei Dimensionierung und Festlegung der Leistungshalbleiter und Layout-Erstellung musste festgestellt werden, dass die zum Entwicklungszeitpunkt propagierten hocheffizienten Bauelemente für eine „worst case“ Eingangsspannung von 700V<sub>p</sub> (MIL-STD-704F: U<sub>w.c.</sub> = +/- 350V) nicht zur Verfügung standen.

### Ausblick:

Um mit der realisierten 270V Ausgangsspannung der DC/DC-Konverter kompatibel zu sein, und zur weiteren Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades muss der Wechselrichters im Rahmen eines Re-Designs mit spannungskompatiblen Bauelementen ausgerüstet werden.

Der im Galley für die gesamte Kette der Leistungswandler zur Verfügung stehende Einbauraum muss weiter konkretisiert werden. Die geforderte Drehstromleistung muß in diesem Zusammenhang besonders hinsichtlich Belastungsprofilen genauer definiert werden. Die eingangsseitige Stromversorgung des Wechselrichters kann weiterhin durch die DC/DC-Wandler-Module erfolgen.

Dank der modularen Aufbauweise der Leistungskette kann flexibel auf eventuell neue Raumanforderungen reagiert werden.

 Abschlussbericht	Leistungswandler für alternative Energiesysteme in zivilen Flugzeugkabinen FKZ: 20K1101M	Issue: 1
		Datum: 15.06.2016

### III.3 Fortschreibung des Verwertungsplans

- **Erfindungen und Schutzrechtsanmeldungen**

Durch die Entwicklung des Leistungswandlers werden keine fremden Schutzrechte in Anspruch genommen.

Seitens ASP werden keine Patente für verwertbare Teile des Vorhabens angemeldet. Dies wird nicht als nicht zwingend notwendig angesehen.

- **Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende**

Die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten bedürfen einer differenzierten Betrachtung.

Zum einen hat ASP-Equipment mit dem Ergebnis des hier durchgeführten Vorhabens wesentliche technologische Erkenntnisse für Leistungskonverter im Anwendungsbereich von Brennstoffzellen im Bereich der Luftfahrt gewonnen. Diese sind prinzipiell von wirtschaftlicher Bedeutung für ASP-Equipment, da eine Beitragsfähigkeit mit Auslastung von Unternehmensressourcen bei solchen Anwendungen möglich ist.

Zum anderen konnten im abgeschlossenen Vorhaben wesentliche Anforderungen im konkreten Zusammenhang mit den dimensional Anforderungen für eine Applikation innerhalb einer Energieautarken Galley nicht vollständig erreicht werden. Es bedarf weiterer deutlicher Maßnahmen um das System in seiner Baugröße zu reduzieren und die Integration der Leistungselektronik in eine Energieautarke Galley darzustellen.

Aus Sicht des Gesamtvorhabens der Energieautarke Galley sollten in einem nachfolgenden Vorhaben Maßnahmen zur weiteren Reduktion der Baugröße erarbeitet werden. Demnach sind wirtschaftliche Erfolgsaussichten in 5 bis 6 Jahren gegeben.

- **Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende**

Die gewonnenen wissenschaftlichen und technischen Ergebnisse nach Projektende sind eindeutig positiv und können mit einem Zeithorizont von 3 bis 6 Jahren umgesetzt werden.

Es ging im hier bearbeiteten Vorhaben darum mit neu auf dem Markt erhältlichen Siliciumcarbiddioden eine wesentliche Optimierung von Bauraum und Gewicht darzustellen. Außerdem sollte die Topologie bereits die spätere Anwendung in Flugzeugkabinen berücksichtigen damit eine spätere Qualifikation ohne grundsätzliche Änderungen möglich sein. Angestrebt war die Optimierung eines solchen Leistungswandlers über zurückliegende technische Grenzen hinaus. Dies ist mit dem hier bearbeiteten Vorhaben erfolgreich umgesetzt worden.

- **Wissenschaftliche und Wirtschaftliche Anschlussfähigkeit**

Die wissenschaftliche Anschlußfähigkeit mit den Ergebnissen dieses Vorhabens ist unmittelbar gegeben, sobald eine Anschlußphase im Sinne eines Vorhabens gefördert werden kann. Die Erkenntnisse aus diesem Vorhaben stehen als background IP zur Verfügung, sobald in einem nachfolgenden Vorhaben Maßnahmen zur weiteren Reduktion der Baugröße erarbeitet werden. Im Anschluß wird auch die wirtschaftliche Anschlußfähigkeit als gut bewertet, nachdem die hier gewonnenen Erkenntnisse als Produktidee der Energieautarken Galley mit guten Vermarktungschancen in frühestens fünf Jahren gegeben ist.

	Leistungswandler für alternative Energiesysteme in zivilen Flugzeugkabinen FKZ: 20K1101M	Issue: 1
Abschlussbericht		Datum: 15.06.2016

### III.4 Arbeiten, die zu keiner Lösung führten

-keine-

### III.5 Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer

Die Ergebnisse dieses Vorhabens werden durch ASP-Equipment im Rahmen des Vertriebskonzeptes präsentiert. Der Vorhabens DIEHL präsentiert auch seinerseits das Gesamtsystem der Energieautarken Galley, nachdem versucht werden soll, das Gesamtsystem auf dem Markt zu etablieren.

### III.6 Einhaltung von Kosten- und Zeitplanung

Der Kostenrahmen wurde von ASP-Equipment eingehalten.

Der Zeitplan hat sich gegenüber dem Antrag erheblich verzögert. Der Vorhabensführer DIEHL hatte ASP-Equipment mehrmals darum gebeten die Aktivitäten kurzzeitig zu unterbrechen, nachdem es zu Verzögerungen auch bei anderen Teilsystemen kam.

 <b>ASP</b> ADVANCED SPACE POWER EQUIPMENT GmbH	Leistungswandler für alternative Energiesysteme in zivilen Flugzeugkabinen FKZ: 20K1101M	Issue: 1
		Datum: 15.06.2016
Schlussbericht		

#### IV. Anlage II – Berichtsblatt und Document Control Sheet

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht	
3. Titel Leistungswandler für alternative Energiesysteme in zivilen Flugzeugkabinen		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Erik Mache, Thomas Hintze		5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2015
		6. Veröffentlichungsdatum 30.6.2016
		7. Form der Publikation Bericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Advanced Space Power Equipment GmbH Am Wasserstall 2 88682 Salem		9. Ber. Nr. Durchführende Institution
		10. Förderkennzeichen FKZ 20K1101M
		11. Seitenzahl
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)  53107 Bonn		13. Literaturangaben
		14. Tabellen
		15. Abbildungen
16. Zusätzliche Angaben		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)		

	Leistungswandler für alternative Energiesysteme in zivilen Flugzeugkabinen FKZ: 20K1101M	Issue: 1
Abschlussbericht		Datum: 15.06.2016
<p>18. Kurzfassung</p> <p>Der 15kW Leistungswandler, der im Rahmen der Energieautarken Galley entwickelt wurde zeichnet sich durch ein gutes Verwertungspotential aus.</p> <p>Obwohl die Anwendung des 15kW Leistungswandlers in der Energieautarken Galley Anlass für das hiesige Fördervorhaben war, steht die hier erforschte robuste und relativ gesehen kleine und leichte Technologie zur Wandelung hoher elektrischer Energie in Flugzeugkabinen auch anderen Applikationen zur Verfügung</p>		
<p>19. Schlagwörter</p> <p>Leistungselektronik, Converter, Energieautarke Kabine, Brennstoffzelle</p>		
<p>20. Verlag</p>	<p>21. Preis</p>	