

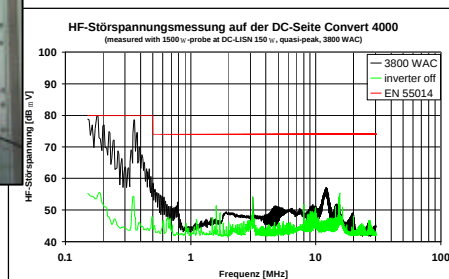
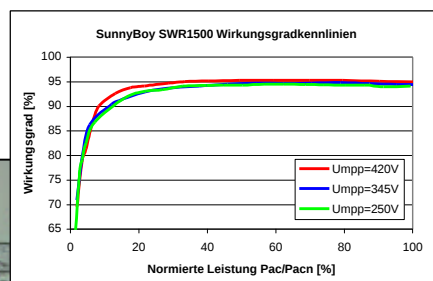
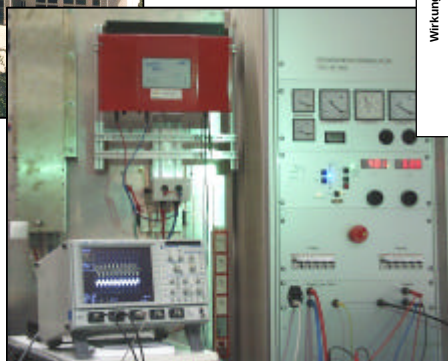


Bundesamt für Energie
Office fédéral de l'énergie
Ufficio federale dell'energia
Swiss Federal Office of Energy

Forschungsprogramm Photovoltaik

Qualitätssicherung von Photovoltaikanlagen

Schlussbericht



Verfasst von:

J.-D. Graf und H. Häberlin
Berner Fachhochschule

Hochschule für Technik und Architektur (HTA) Burgdorf
Labor für Photovoltaik
Jlcoweg 1
3400 Burgdorf

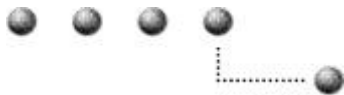
Ausgearbeitet im Auftrag:

Bundesamt für Energie (BFE)

Juli 2000

Schlussbericht:

BFE-Projekt Nr. DIS 2744 / 61703
ENET Nr. 200023



Zusammenfassung

Nach dem Umzug der Abteilung Elektrotechnik von Oberburg nach Burgdorf konnte im Rahmen eines früheren Projektes „Aufbau einer Testanlage für Photovoltaikwechselrichter bis 60kWp“ auf dem Dach des neuen Gebäudes eine 60kWp Photovoltaikanlage geplant und installiert werden, welche zu einer Testanlage für Netzverbund-Wechselrichter kleiner und mittlerer Leistung ausgebaut wurde.

Die in früheren Projekten durchgeführten Tests von Photovoltaik-Wechselrichtern für Netzverbundanlagen wurden im Rahmen dieses Projektes an einigen neu auf dem Schweizer PV-Markt erschienenen Geräten weitergeführt. Spezielles Gewicht wurde dabei auf Geräte gelegt, welche von Herstellern aus der Schweiz stammen oder auf Geräte, welche in der Schweiz vermutlich eine bedeutende Marktpresenz aufweisen werden. Bei allen Wechselrichtern wurden DC-AC-Umwandlungswirkungsgrad, Oberschwingungsströme, EMV-Verhalten, Selbstlauf, Rundsteuersignalempfindlichkeit, Einschaltleistung, Nennspannungsbereich und Betrieb bei Leistungsüberangebot untersucht. Im Rahmen dieses Projektes wurden folgende einphasigen Netzwechselrichter im Detail getestet:

- **Convert 4000** (3,8kW) von Sputnik AG
- **SWR 1500** (1,5kW) von SMA, BRD
- **Top Class Spark** (1,35kW) von ASP
- **Solcolino** (Modulwechselrichter 200W) von Hardmeier Electronic
- **OKE4E-100** (Modulwechselrichter 100W) von NKF Kabel BV, Holland

Daneben wurde auch die Wirkungsgradkennlinie eines neuen dreiphasigen 30kW-Wechselrichters **Solarmax DC30+** von Sputnik in einer Computer-Langzeitmessung ermittelt.

Neben diesen Messungen an neuen Wechselrichtern wurde auch die Langzeit-Zuverlässigkeitsstatistik für die bereits in früheren Projekten getesteten Wechselrichter weitergeführt.

Da einige Hersteller in der Schweiz auch auf dem Gebiet der Wechselrichter für Inselanlagen sehr aktiv sind, konnte im Rahmen dieses Projektes mit einigen kleinen Erweiterungen der bestehenden Infrastruktur ein Inselwechselrichter-Teststand für Wechselrichter bis 3 kW aufgebaut und in Betrieb genommen werden. Erste Tests wurden hauptsächlich an Geräten von Schweizer Herstellern durchgeführt. Im Rahmen dieses Projektes wurden folgende Inselwechselrichter getestet:

- **Twin Power SI 1224** (1,2kW) von Studer
- **Top Class 13/24** (1,3kW) von ASP

Generell zeigte sich, dass die getesteten Netzwechselrichter gegenüber früher deutliche Fortschritte gemacht haben. Erfahrene Hersteller konnten gegenüber früheren Geräten den Wirkungsgrad wiederum leicht steigern. Der europäische Wirkungsgrad aller getesteten Geräte lag (trotz ihrer zum Teil recht kleinen Nennleistung) über 90%, bei den traflosen Geräten gar zwischen 92,5% und 94,4%. Bei den traflosen Geräten wurden Spitzenwirkungsgrade zwischen 93,3% und 95,4% erreicht. Auch das EMV-Verhalten der Netzwechselrichter von erfahrenen Herstellern ist recht gut. Die Tests auf Oberschwingungsströme, Selbstlauf bei angepasster Last und Rundsteuersignalempfindlichkeit ergaben fast ausnahmslos gute Ergebnisse. Auch die Zuverlässigkeit fast aller erfassten Geräte liegt mittlerweile bei weniger als 0,3 Hardwaredefekten pro Wechselrichter-Betriebsjahr. Wegen des besonders in der BRD stark wachsenden PV-Marktes drängen aber auch neue Hersteller ohne die notwendige Erfahrung auf den Markt, deren Geräte unter Umständen nicht so ausgereift sind. Deshalb ist eine systematische Weiterführung der Tests von neuen Produkten sicher angezeigt.

Dagegen zeigten sich bei den getesteten Inselwechselrichtern vor allem auf der DC-Seite noch Schwächen bezüglich des EMV-Verhaltens. Die Situation ist hier ähnlich wie vor einigen Jahren bei den Netzwechselrichtern, als sich einige Hersteller der EMV-Problematik noch nicht bewusst waren.

Neben diesen Tests wurden im Rahmen dieses Projektes auch umfangreiche Verbesserungen an der Infrastruktur vorgenommen, die notwendig waren, um Wechselrichtertests immer nach dem neuesten Stand der Technik durchführen zu können. So wurde eine Netznachbildung für die Gleichstromseite entwickelt, die es erlaubt, EMV Messungen nicht nur schneller durchzuführen, sondern auch die Reproduzierbarkeit der Messungen zu verbessern. Weiter wurden im Rahmen von Semester- und Diplomarbeiten Solargenerator-Simulatoren für Wechselrichter bis 3kWp resp. 5kWp entwickelt und gebaut. Ein grösserer Simulator für Leistungen bis 25kWp ist im Rahmen eines von der Berner Fachhochschule finanzierten Kompetenzaufbauprojektes zur Zeit noch in der Realisierungsphase. Derartige Simulatoren werden es in Zukunft gestatten, Wechselrichtertests viel schneller durchzuführen. Da im Laufe des Projektes auch die Problematik des Inselbetriebs wieder an Bedeutung gewann, wurde die am Photovoltaik-Labor bereits früher entwickelte Inselbetriebs-Testschaltung weiter ausgebaut und verfeinert, so dass nun auch Tests nach den aktuellen deutschen und japanischen Vorstellungen möglich sind.



Abstract in English

During a former project a PV test plant for grid-connected PV inverters up to 60kW was designed, constructed and operated for more than two years at HTA Burgdorf's new building for the department of electrical engineering. In addition, a number of grid-connected inverters was tested.

During this new project, these test were continued, focusing on new Swiss inverters or inverters that were expected to get a significant market share in Switzerland. For all inverters the following properties were measured: DC-AC conversion efficiency, harmonics, RF interference (RFI) on DC- and AC-side, islanding, sensitivity to telecontrol signals, turn on power, operating voltage range and operation with available MPP power from the array exceeding rated DC power.

The following single-phase grid-connected inverters were tested during this project:

- **Convert 4000** (3.8kW), made by Sputnik AG
- **SWR 1500** (1.5kW), made by SMA, BRD
- **Top Class Spark** (1.35kW), made by ASP
- **Solcolino** (module inverter 200W), made by Hardmeier Electronic
- **OKE4E-100** (module inverter 100W), made by NKF Kabel BV, NL

In addition, the efficiency vs. power of a new 30kW-inverter **Solarmax DC30+** (three-phase) made by Sputnik AG was determined by means of an automatic computer measurement over an extended period of time.

Besides these tests, the long term reliability of grid-connected inverters tested already in former projects was monitored further.

As there are also some manufacturers for stand-alone inverters in Switzerland, the existing test facility was modified and extended to allow also the test of stand-alone inverters up to about 3kW. First tests were carried out with the following stand-alone inverters:

- **Studer Twin Power SI 1224** (1.2kW)
- **Top Class 13/24** (1.3kW)

Most grid-connected inverters were improved again compared to earlier devices. Again experienced inverter manufacturers could increase slightly the conversion efficiency. European efficiency of all inverters tested was higher than 90% , for devices without transformer even between 92.5% and 94.4%. Peak efficiency of inverters without transformer was even between 93.3% and 95.4% . EMC emissions from inverters made by experienced manufacturers were usually quite low. The test results for harmonic emissions, islanding under matched load conditions and sensitivity to simulated telecontrol signals were mostly very good. Reliability of nearly all inverters monitored is now below 0.3 inverter defects per inverter operation year. Due to the increasing PV-market especially in Germany, also new manufacturers appear on the market, whose inverters may not be so mature and reliable yet. Therefore it would be very useful to continue with the testing of new inverters to find possible weak points and problems as early as possible.

On the other hand, RF-emissions of the stand-alone inverters were too high to allow trouble-free operation under all conditions. The situation is similar to that in the field of grid-connected inverters a few years ago, when some manufacturers were not yet aware of the importance of EMC.

Besides these tests, during this project also significant improvements of the equipment used for the tests had to be carried out, to make inverter tests according to the latest state of the art possible. A DC-LISN was developed to facilitate and speed up RF emission measurements on the DC side under reproducible conditions. In addition, solar generator simulators of 3kWp and 5kWp were realised. An even larger solar generator simulator of 25kWp is being developed and should be operational by fall 2000. Such solar generator simulators should allow to speed up considerably inverter tests in the future. As during this project the islanding problem of grid-connected inverters became an important issue again on the international level, the existing test circuit developed earlier was modified and extended, in order to make possible also islanding tests according to ideas in Germany and Japan.

To ensure quality of new products, it would be very useful to go on testing new inverters appearing on the market also in the future. Besides DC to AC conversion efficiency, an interesting issue is also maximum power point tracking efficiency. Due to problems with the existing equipment, this problem could not be examined as intended. With some new equipment without these problems, which will be available in HTA Burgdorf's PV laboratory in the near future, hopefully it will be possible to have a close look to this issue in a next project.



INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung	2
1.1	Stichworte zum Projekt	2
1.2	Ziele und Beschreibung des Projektes	2
2	Überblick über die getesteten Wechselrichter	3
3	Wichtigste Resultate der Wechselrichtertests	4
3.1	Netzverbundwechselrichter	4
3.1.1	Wirkungsgrad	4
3.1.2	Oberschwingungen	7
3.1.3	Selbstlauf nach Netzausfall	8
3.1.4	Elektromagnetische Verträglichkeit	10
3.1.5	Empfindlichkeit auf Rundsteuersignale	12
3.1.6	Langzeitzuverlässigkeit	13
3.1.7	MPP-Tracking-Wirkungsgrad von Netzverbund-Wechselrichtern	15
3.2	Inselwechselrichter	18
3.2.1	Umwandlungs-Wirkungsgrad	18
3.2.2	Kurvenform und Oberschwingungsgehalt	19
3.2.3	Überlastverhalten	19
3.2.4	Elektromagnetische Verträglichkeit	20
4	Weiterentwicklung der Wechselrichtertestanlage	21
4.1	Realisierung eines Testplatzes für Inselwechselrichter	21
4.2	Bau eines Solargenerator-Simulators für kleinere Wechselrichter	22
4.3	Bau eines Solargenerator-Simulators für Wechselrichter bis 25kWp	23
4.4	Entwicklung einer Netznachbildung für EMV-Messungen auf der Gleichstromseite	25
5	Ergänzende Untersuchungen zum Selbstlaufverhalten von Photovoltaik-Wechselrichtern	26
5.1	Selbstlaufproblematik und mögliche Testschaltungen	26
5.2	Messprinzip von zwei Wechselrichtern mit ENS	28
5.3	Inselbildung bei Photovoltaikanlagen im Parallelbetrieb mit Motoren	31
5.3.1	Tests mit einphasig angeschlossenen Motoren in einphasiger Testschaltung	31
5.3.2	Leistungsübertragung zwischen den Phasen von Asynchronmotoren	32
5.3.3	Inselbildung bei einphasigem Phasenunterbruch bei einem einphasigen Wechselrichter mit dreiphasig angeschlossenen Asynchronmotor	34
5.4	Selbstlauftests an Systemen mit mehreren Wechselrichtern	36
6	Schlussbemerkungen	37
7	Verdankungen	37
8	Literatur	38



1 Einleitung

1.1 Stichworte zum Projekt

- Tests weiterer Wechselrichter für PV-Netzverbundanlagen
- Systematische Untersuchung des MPP-Tracking-Wirkungsgrades
- Aufbau einer Testanlage für Inselbetriebs-Wechselrichter bis 3kWp
- Weiterentwicklung der Selbstlaufftestschaltung
- Entwicklung von zwei Solargenerator-Simulatoren für Wechselrichter bis 25kWp
- Entwicklung einer DC-Netznachbildung für EMV-Messungen

1.2 Ziele und Beschreibung des Projektes

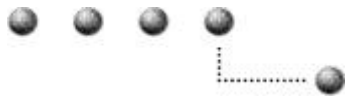
Die HTA Burgdorf befasst sich seit 1987 mit Photovoltaikanlagen zur direkten Umwandlung von Sonnenlicht in elektrische Energie. Bis Ende Februar 1993 betrieb sie in Oberburg eine Photovoltaikanlage von 3kWp, die speziell darauf ausgelegt war, einphasige Netzverbund-Wechselrichter zu testen.

Nach dem Umzug der Abteilung Elektrotechnik von Oberburg nach Burgdorf, konnte im Rahmen eines früheren Projektes „Aufbau einer Testanlage für Photovoltaikwechselrichter bis 60kWp“ (EF-REN (93)031 / ENET 9400561) [14] auf dem Dach des neuen Gebäudes eine 60kWp Photovoltaikanlage geplant und installiert werden. Die Anlage wurde zu einer Testanlage für Wechselrichter kleiner und mittlerer Leistung ausgebaut, die nicht fest auf einen Wechselrichter ausgelegt ist, sondern den Betrieb verschiedenster PV-Komponenten mit unterschiedlichen Gleichspannung und Gleichströmen gestattet [1, 2].

Die bisher durchgeführten Tests von Photovoltaik-Wechselrichtern für Netzverbundanlagen [3, 4, 5] wurden im Rahmen dieses Projektes an den neu erschienenen Geräten weitergeführt und die Schweizer Industrie bei der Weiterentwicklung dieser Geräte unterstützt.

Mit kleinen Erweiterungen der bestehenden Infrastruktur konnte ein Inselwechselrichterteststand für Wechselrichter bis 3 kW aufgebaut und in Betrieb genommen werden. Erste Tests wurden hauptsächlich an Geräten von Schweizer Herstellern durchgeführt.

Damit die Qualität des Wechselrichtermessplatzes weiter gesteigert werden konnte, wurden im Rahmen dieses Projektes auch notwendige Verbesserungen an der Infrastruktur vorgenommen. So wurde eine Netznachbildung für die Gleichstromseite entwickelt, die es erlaubt, EMV Messungen nicht nur schneller durchzuführen, sondern auch die Reproduzierbarkeit der Messungen zu verbessern. Weiter wurden im Rahmen von Semester- und Diplomarbeiten Solargenerator-Simulatoren für Wechselrichter bis 3kWp resp. 5kWp entwickelt und gebaut. Ein grösserer Simulator für Leistungen bis 25kWp ist im Rahmen eines von der Berner Fachhochschule finanzierten Kompetenzaufbauprojektes zur Zeit in der Realisierungsphase. Damit die Wechselrichter in Zukunft auch auf die Erfüllung der Normen anderer Länder getestet werden können, wurde die Inselbetriebs-Testschaltung verändert, so dass nun Tests auch nach deutschen und japanischen Vorstellungen möglich sind.



2 Überblick über die getesteten Wechselrichter

In Tabelle 1 sind die wichtigsten Wechselrichterdaten und Messresultate der an der HTA Burgdorf durchgeführten Tests ersichtlich. In den folgenden Teilabschnitten werden die einzelnen Messungen und die daraus gewonnenen Erkenntnisse kurz erläutert. In dem Anhang dieses Schlussberichtes sind die detaillierten Messresultate und Grafiken für jeden Wechselrichter ausführlich dargestellt.

Die beiden Wechselrichter Solcolino und OK4E-100 sind Modulwechselrichter. Auf Grund der geringen Grösse des Solargenerators und der damit verbundenen kleineren Abstrahlung ist deshalb auf der Gleichstromseite nicht der gleiche Entstöraufwand erforderlich wie bei grösseren Geräten. Die gemessenen HF-Emissionen auf der DC-Seite dürfen deshalb in der Praxis keine Probleme verursachen, obwohl sie über den Grenzwerten liegen.

Wechselrichter	S _N	U _{DC} (max)	Ein- schalt- leistung	Trans- for- mator	1: 1- phasig 3: 3- phasig	Europ. Wir- kungs- grad	Strom- Harmo- nische (<2kHz)	Selbst- lauf	EMV AC	EMV DC	Rund- steuer- signal- empfind- lichkeit
	kW	V	W _{DC}								
ASP Spark	1.35	276	15	NF	1	90.6	++	++	+ ²⁾	++	++
Solcolino	0.2	78	1.5	ohne	1	90.6	++	++	0	--	++
NKF OK4E-100	0.1	50	0.5	HF	1	90.3	++	0 ¹⁾	+	-	++
SMA SWR 1500	1.5	500	15	ohne	1	94.4	++	++	+ ²⁾	++	++
Convert4000	3.8	800	30	ohne	1	92.5	++	++	+ ²⁾	++	++

++ sehr gut, Norm mit Reserve erfüllt

+ gut, Norm erfüllt

0 befriedigend, Norm beinahe erfüllt

- mangelhaft, Norm nicht erfüllt

-- ungenügend, Norm bei weitem nicht erfüllt

¹⁾ Gelegentlicher Selbstlauf

²⁾ Leichte Überschreitung der Grenzwerte
im Bereich 150kHz-500kHz, aber gutes
Verhalten für f > 500kHz

Tabelle 1: Die wichtigsten Wechselrichterdaten und Messresultate der getesteten Wechselrichter.

Der in dieser Tabelle angegebene Europäische Wirkungsgrad wurde nach folgender Formel berechnet (Indexwert = Prozent der Nennleistung):

$$h = 0.03 h_5 + 0.06 h_{10} + 0.13 h_{20} + 0.1 h_{30} + 0.48 h_{50} + 0.2 h_{100}$$

3 Wichtigste Resultate der Wechselrichtertests

Aus Platzgründen können hier nur ausgewählte Testergebnisse dargestellt werden. Die detaillierten Testresultate befinden sich im Anhang.

3.1 Netzverbundwechselrichter

Seit etwa zwei Jahren ist bei einigen Wechselrichterherstellern ein Trend zu traflosen Wechselrichtern mit einer höheren DC-Spannung zu beobachten. Dieser Übergang zu traflosen Wechselrichtern und teilweise auch der Umstieg auf die höheren Systemspannungen (SolarMax S, Convert 4000, SWR 1500) ermöglicht es, den Wirkungsgrad um ca. 2% anzuheben. Diese Entwicklung geht jedoch möglicherweise etwas auf Kosten der Sicherheit, da diese Geräte keine galvanische Trennung mehr haben.

3.1.1 Wirkungsgrad

Wegen des kontinuierlichen Wachstums des Photovoltaik-Marktes wuchs auch die Konkurrenz unter den Wechselrichterherstellern und es entwickelte sich ein bedeutender Markt. Dies führte dazu, dass die Produzenten nicht nur ihre Produktionsmöglichkeiten optimierten und die Geräte qualitativ verbesserten, sondern auch infolge der steigenden Absatzzahlen die Preise senken konnten. Diese Entwicklung führte dazu, dass teilweise grosse Fortschritte im Bereich der Systemtechnik zu verzeichnen waren und dass neue, wesentlich leistungsfähigere Bauteile eingesetzt werden konnten. Übertragen auf einen neuen Wechselrichter bedeutet das: Die Umwandlungsverluste konnten reduziert und somit der Umwandlungswirkungsgrad des Wechselrichters gesteigert werden.

Bild 1 bis 5 zeigen die auf Nennleistung normierten Wirkungsgradkurven von verschiedenen Wechselrichtern. Wechselrichter ohne galvanischer Trennung weisen einen Europäischen Wirkungsgrad von bis zu 94.4% auf (Sunny Boy SWR 1500 $U_{MPP}=420V$). Dem gegenüber erreicht der ASP Spark Wechselrichter, mit galvanischer Trennung einen Europäischen Wirkungsgrad von 90.6%.

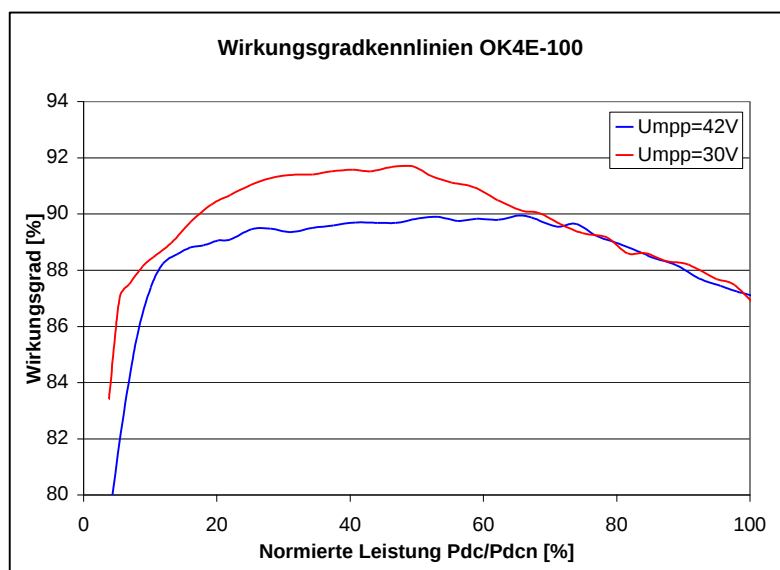


Bild 1:

Wirkungsgrad in Funktion der normierten (bezogen auf Nennleistung $100W_{DC}$) Wechselstromleistung des Modulwechselrichters OK4E-100. Wird der Wechselrichter bei grösseren Spannungen betrieben, so ist sein Wirkungsgrad auf Grund der grösseren kapazitiven Schaltungsverluste um bis zu 2% tiefer.

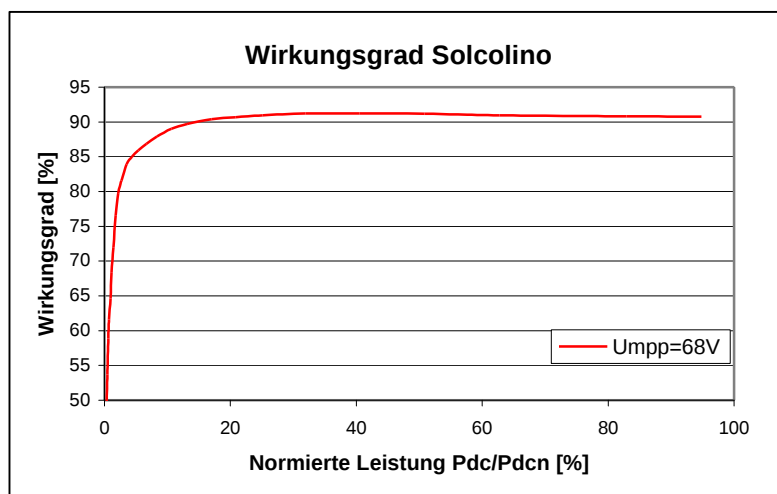


Bild 2:

Wirkungsgrad in Funktion der normierten (bezogen auf Nennleistung $240W_{DC}$) Gleichstromleistung des einphasigen, trafolosen Modulwechselrichters Solcolino.

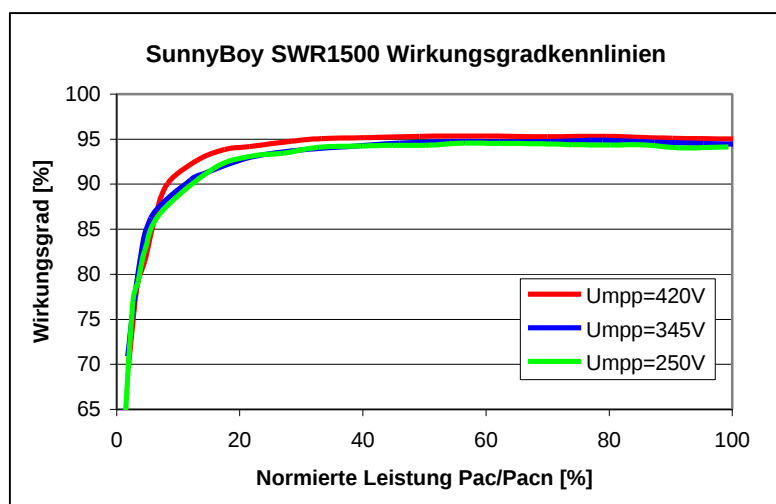


Bild 3:

Wirkungsgrad in Funktion der normierten (bezogen auf Nennleistung $1.5kW_{AC}$) Wechselstromleistung des einphasigen, trafolosen Wechselrichters SunnyBoy SWR 1500. Bedingt durch die grösseren Kupferverluste sinkt der Wirkungsgrad bei kleineren DC-Spannungen.

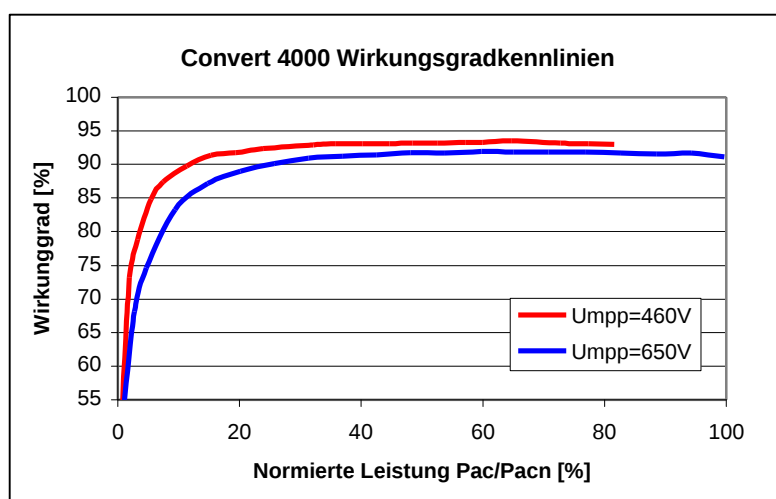


Bild 4:

Wirkungsgrad in Funktion der normierten (bezogen auf Nennleistung $3.8kW_{AC}$) Wechselstromleistung des einphasigen, trafolosen Wechselrichters Convert 4000. Bei erhöhter DC-Spannung sinkt der Wirkungsgrad als Folge von grösseren kapazitiven Schaltungsverlusten.

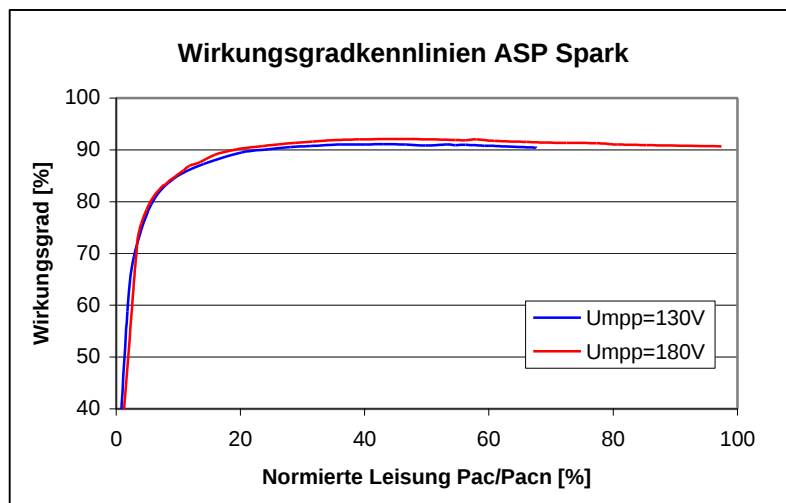


Bild 5:

Wirkungsgrad in Funktion der normierten (bezogen auf Nennleistung 1.35kW_{AC}) Wechselstromleistung des einphasigen Wechselrichters ASP Spark. Bei tieferer DC-Spannung sinkt der Wirkungsgrad als Folge von grösseren Kupferverlusten.

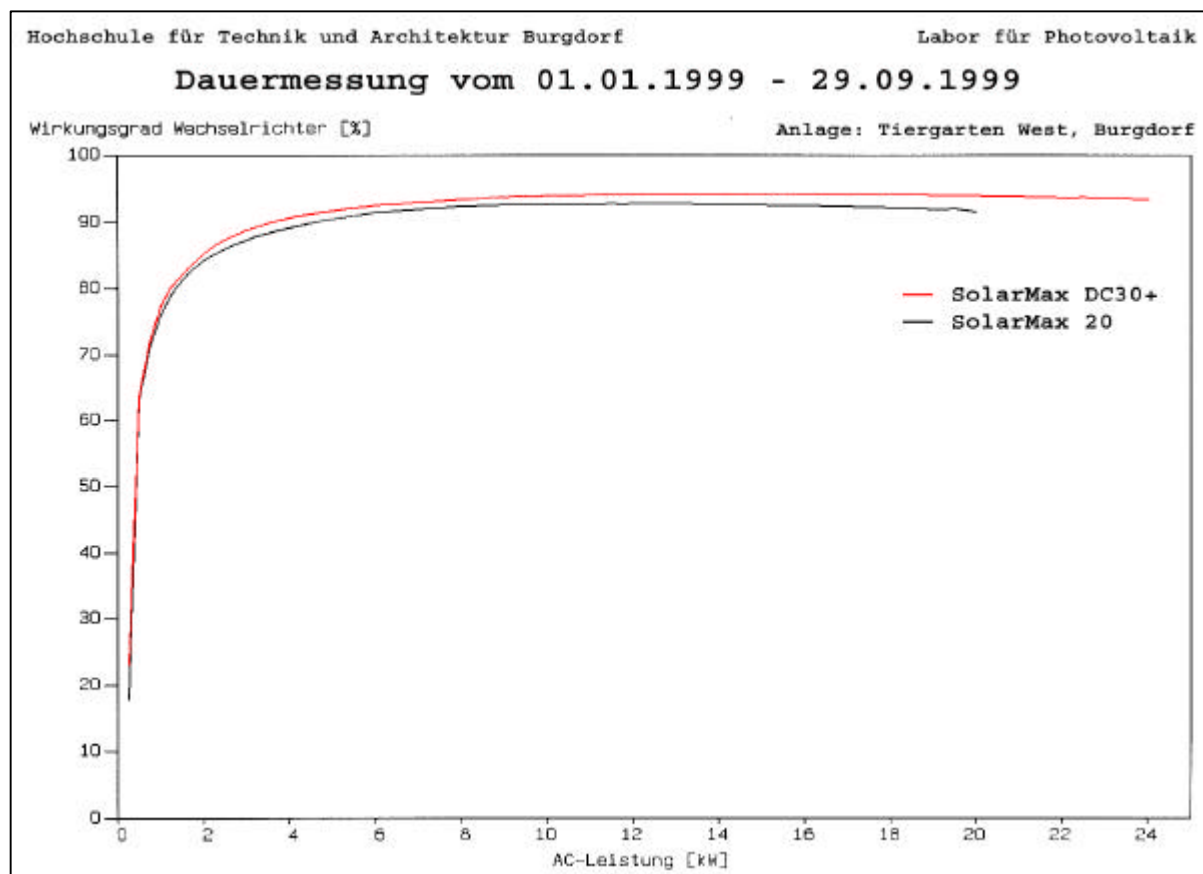


Bild 6:

Wirkungsgradkurven von zwei dreiphasigen SolarMax Wechselrichtern mit galvanischer Trennung. Das neuere Gerät (SolarMax DC30+, Baujahr 1998) ist für eine max. DC-Leistung von 30kW ausgelegt, aber aufgrund der beschränkten Solargeneratorfläche nur mit einer DC-Leistung von 24 kWp beschaltet. Das Vorgängermodell (SolarMax 20, Baujahr 1994) hat eine max. Ausgangsleistung von 20kW und ist mit der Nennleistung beschaltet.

3.1.2 Oberschwingungen

Bei den getesteten Geräten handelt es sich bei allen um selbstgeführte Wechselrichter mit hochfrequenter Pulsbreitenmodulation. Deshalb sind die Oberwellenströme, die in das Netz abgegeben werden, meistens unterhalb der Grenzwerte der Norm EN61000-3-2. In der Vergangenheit überschritten nur wenige Geräte partiell (> 25. Harmonische) die Grenzwerte, wobei das vorwiegend bei Betriebspunkten in der Nähe der Nennleistung auftrat. Diese Harmonischen sollten jedoch keine Probleme verursachen, sofern die Netzimpedanz beim Einspeisepunkt nicht zu hoch ist.

Ein Gerät, das die Grenzwerte nach der EN61000-3-2 in der Vergangenheit leicht überschritten hatte, ist der Sunny Boy SWR 700 (28. und 30. Harmonische). Dieses Verhalten führte dazu, dass der neu erschienene Sunny Boy SWR1500, in dieser Beziehung etwas genauer betrachtet wurde.

Die Messungen zeigen, dass dieser Fehler beim SWR1500 behoben wurde, so dass der Wechselrichter die geforderten Normen erfüllt.

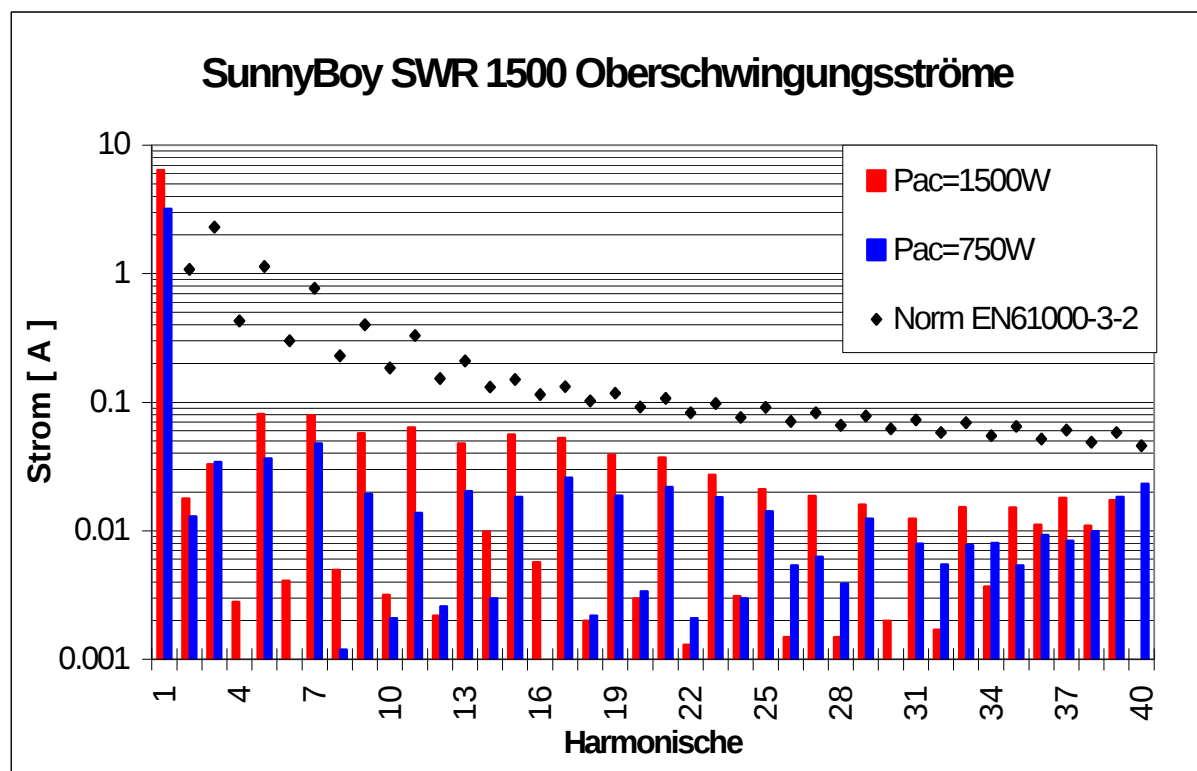


Bild 7:

Stromoberschwingungen des Sunny Boy 1500 Wechselrichters im Vergleich zu den Grenzwerten der EN61000-3-2. Die Harmonischen liegen deutlich unter den Grenzwerten. Es ist also eine klare Verbesserung gegenüber dem Sunny Boy SWR 700 feststellbar.

3.1.3 Selbstlauf nach Netzausfall

Selbstgeführte Wechselrichter haben prinzipiell die Tendenz zum Selbstlauf nach einem Netzausfall. Dieses Verhalten muss jedoch aus Sicherheitsgründen vermieden werden.

In Deutschland wird dafür die Überwachung der Netzimpedanz vorgeschlagen [8]. Die ursprünglich vorgeschriebene Testschaltung war relativ kompliziert. Sie kann jedoch unter der Berücksichtigung der Netzwerktheorie in eine äquivalente Schaltung umgewandelt werden [6, 7], die einfacher zu handhaben ist (siehe Bild 8). Die Impedanzüberwachung, auch ENS (**E**inrichtung zur **N**etzüberwachung mit jeweils zugeordnetem **S**chaltorgan in Reihe) genannt, berücksichtigt einen Normenvorschlag der Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik in Köln. Dabei musste sich der Wechselrichter ursprünglich bei einem Impedanzsprung von $\Delta Z_N = 0,5 \Omega$, in jedem Fall aber bei einer Gesamtimpedanz von $Z_N > 1,75 \Omega$ innerhalb von fünf Sekunden vom Netz freischalten. Ausserdem durfte sich der Wechselrichter nur auf Netze aufschalten, deren Impedanz $Z_N < 1,25 \Omega$ beträgt. Gemäss den neusten Vorschriften soll dagegen nur noch der Impedanzsprung als Abschaltkriterium dienen [8].

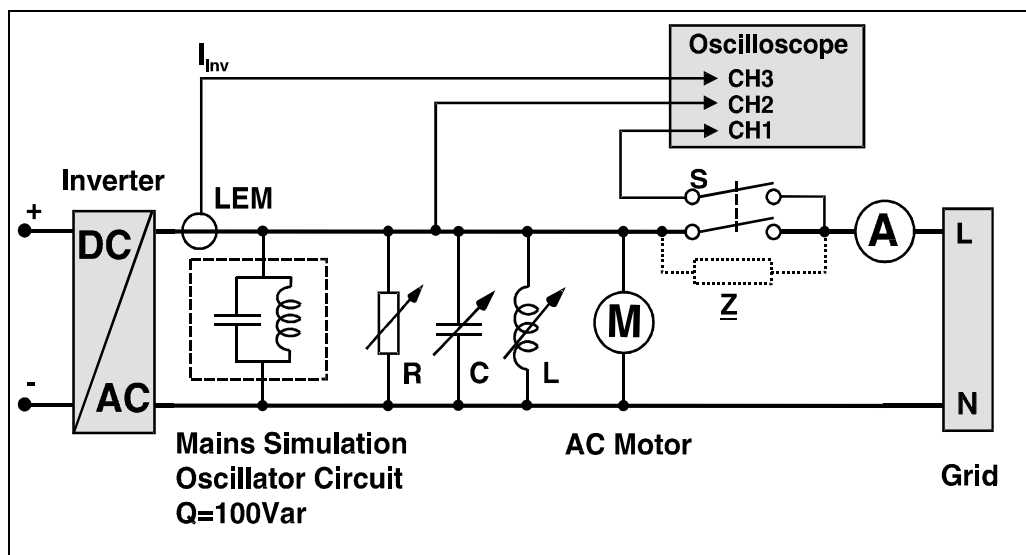


Bild 8:

Testschaltung für Selbstlauftests nach den aktuellen Vorschriften in der Schweiz, Deutschland und Japan.

Die Elemente R, C und L werden so abgeglichen, dass die Anzeige des Ampèremeters A minimal ist, danach wird der Schalter S geöffnet. CH1 dient zur Feststellung des Schaltzeitpunktes. Für den Test nach der aktuellen Schweizer Vorschrift wird $\underline{Z} = \infty$ gesetzt. Für den Test nach dem neuen BRD-Testvorschlag wird $\underline{Z}$ so gewählt, dass sich zusammen mit der zwischen L und N vorhandenen Netzimpedanz die für den Test erforderliche Gesamtimpedanz ergibt. Nach fünf Sekunden muss der Wechselrichterstrom (CH3) jeweils 0 sein.

Die Tests nach der Schweizer Vorschrift verliefen sehr erfreulich. Jeder Wechselrichter erkannte in kürzester Zeit den Netzausfall und schaltete sich prompt ab. Der Wechselrichter Convert 4000 bestand zudem auch den Selbstlauftest nach deutschem Vorschlag.

In der Vergangenheit wurde festgestellt, dass beim Umschalten vom Normalbetrieb in den Leerlauf (z.B. Netzausfall) kurzzeitige Überspannungen am Wechselrichter-Ausgang entstehen können. Das kann unter Umständen zur Zerstörung von Verbrauchern mit kleiner Leistungsaufnahme (Radio, Laptop usw.) führen. Darum wurde diese Messung neu in die Testreihe der HTA Burgdorf aufgenommen.

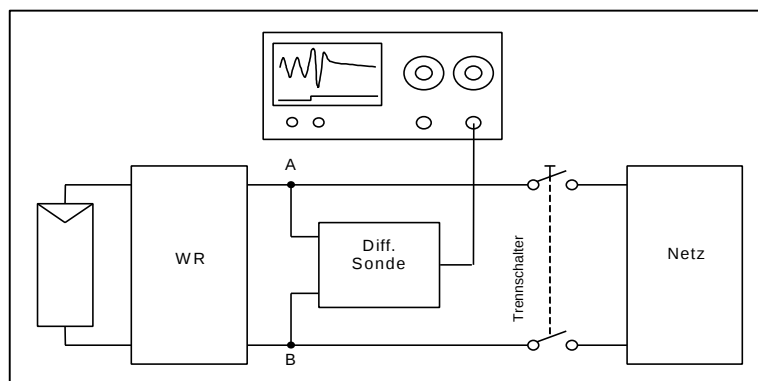


Bild 9:

Schema des Aufbaus zur Messung des Spannungsverlaufs bei Leerlaufabschaltung. Die Spannung zwischen Punkt A und B am Wechselrichter-Ausgang beträgt vor der Trennung vom Netz $230\text{ V}_{\text{eff}}$, was einer Amplitude von etwa 325 V entspricht.

Bei früheren Tests traten bei dem SMA SWR 700 während mehrerer Perioden Ausgangsspannungen von bis zu 760 V_p auf (siehe Bild 10). Das ist mehr als das 2,3-fache der normalen Amplitude und erhöht daher aufgrund des höheren Energiegehalts das Schadenspotential. Wie dem Bild 11 zu entnehmen ist, wurde das Problem vom Hersteller erkannt und bei neueren Modellen wesentlich entschärft.

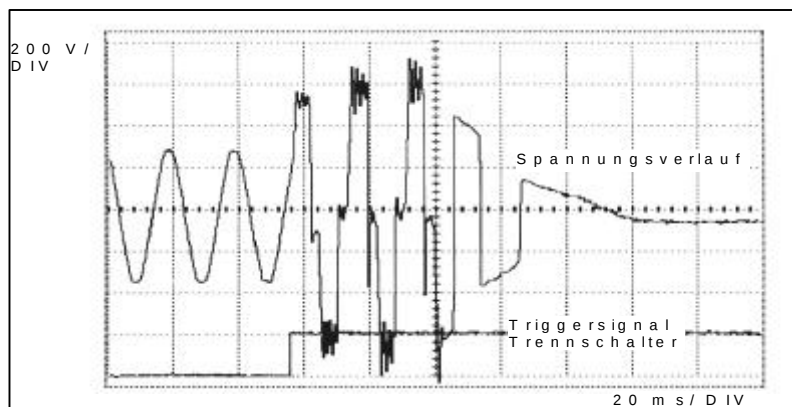


Bild 10:

Spannungsverlauf des SWR700 bei Leerlaufabschaltung. Die maximale Amplitude beträgt ca. 760 V .

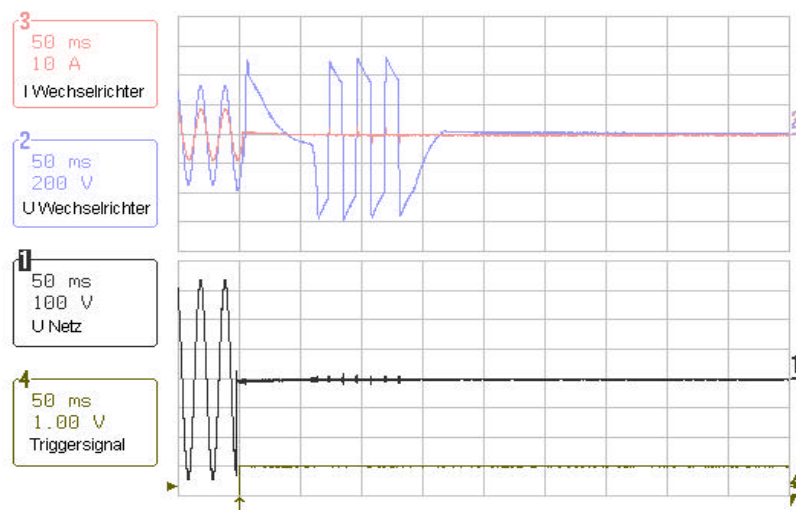


Bild 11:

Spannungsverlauf des SMA SWR 1500 bei Leerlaufabschaltung. Die Spannung steigt während drei Perioden auf ca. 500 V an. Im Vergleich zum Verhalten des Vorgängermodells (Bild 10) stellt dies eine wesentliche Verbesserung dar.

3.1.4 Elektromagnetische Verträglichkeit

In den letzten Jahren sind die Emissionen von hochfrequenten Störspannungen auf der AC- und DC-Seite beträchtlich gesunken. Auf der AC-Seite sind die meisten, bei einer Belastung von 50-100% der AC-Nennleistung getesteten Wechselrichter, unterhalb der Grenzwerte der Norm EN55014.

Auch auf der DC-Seite sind die Emissionen meist unterhalb der Grenzwerte. Nur die beiden Modulwechselrichter Solcolino und der OKE4E-100 überschreiten partiell die Grenzwerte. Das ist jedoch für einen Modulwechselrichter unbedeutend, da die Abstrahlung über die sehr kleine DC-Verkabelung und 1-2 Module vernachlässigt werden kann.

Bild 12 zeigt als Beispiel die von einem OK4E-100 auf der DC-Seite emittierten hochfrequenten Störspannungen. Für den praktischen Einsatz dürfte die Entstörung knapp genügend sein.

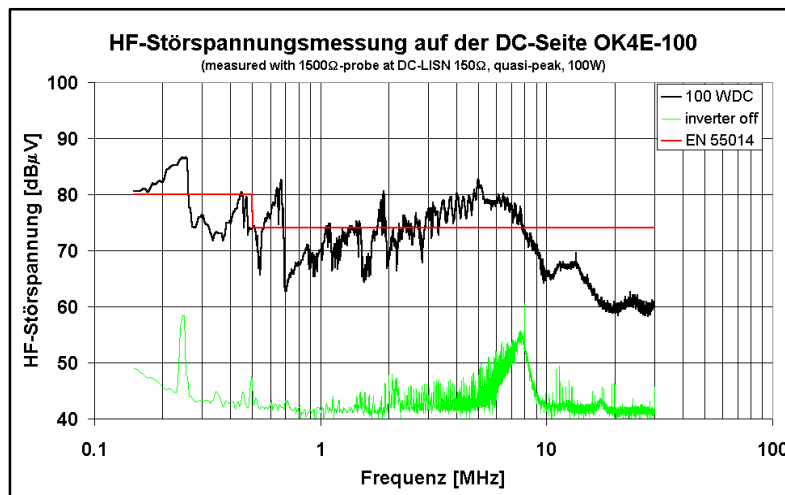


Bild 12:

HF-Störspannungen, die ein OK4E-100 auf der DC-Seite produziert. Partiiell überschreitet der Wechselrichter die Grenzwerte der EN55014.

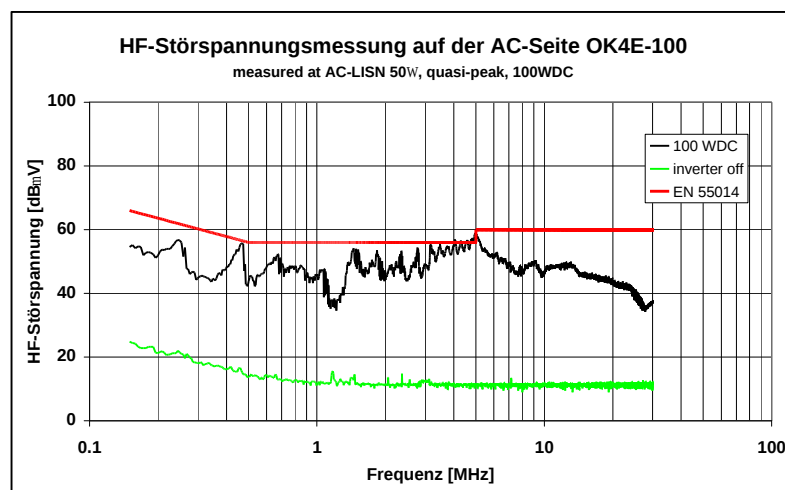


Bild 13:

HF-Störspannungen, die ein OK4E-100 auf der AC-Seite produziert. Die Störspannungen liegen im ganzen Bereich unter den Grenzwerten der EN55014.

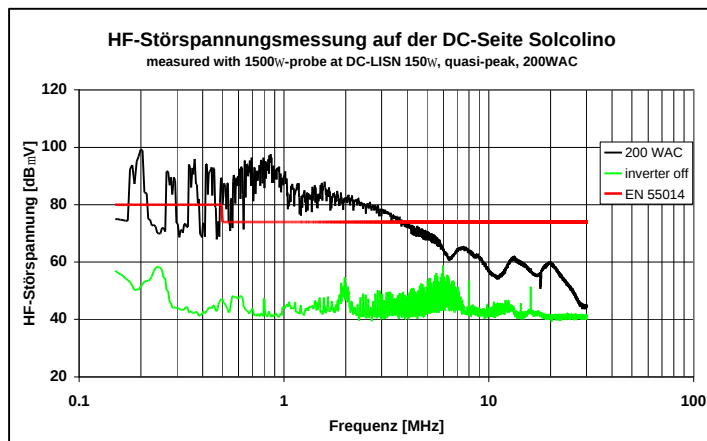


Bild 14:

HF-Störspannungen, die ein Solcolino auf der DC-Seite produziert. Die Störspannungen überschreiten partiell die Grenzwerte der EN55014.

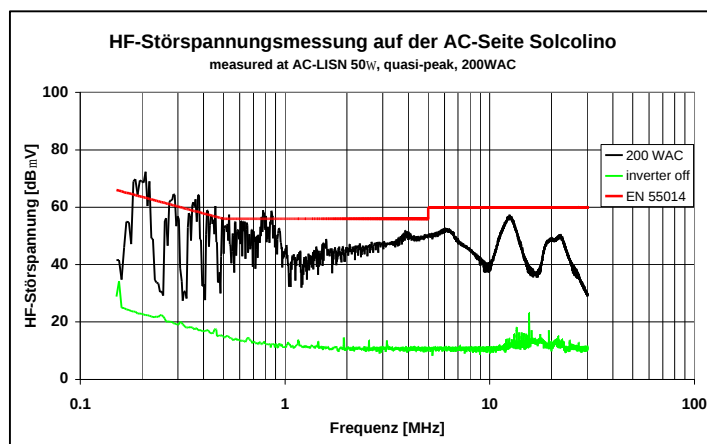


Bild 15:

HF-Störspannungen, die ein Solcolino auf der AC-Seite produziert. Partiiell überschreitet der Wechselrichter die Grenzwerte der EN55014.

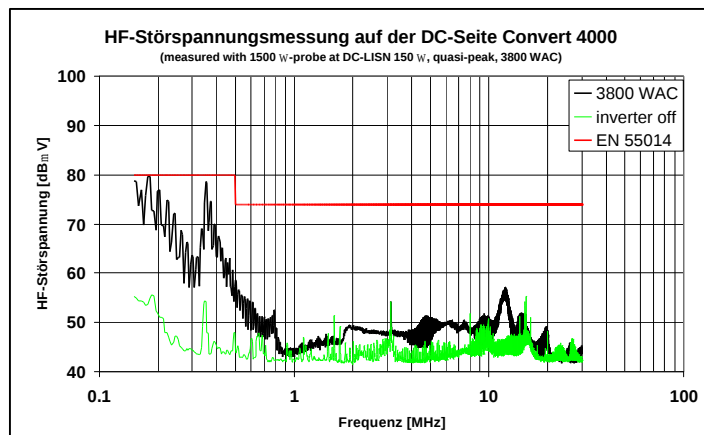


Bild 16:

HF-Störspannungen, die ein Convert 4000 auf der DC-Seite produziert. Die Störspannungen liegen im ganzen Bereich unterhalb der Grenzwerte der EN55014.

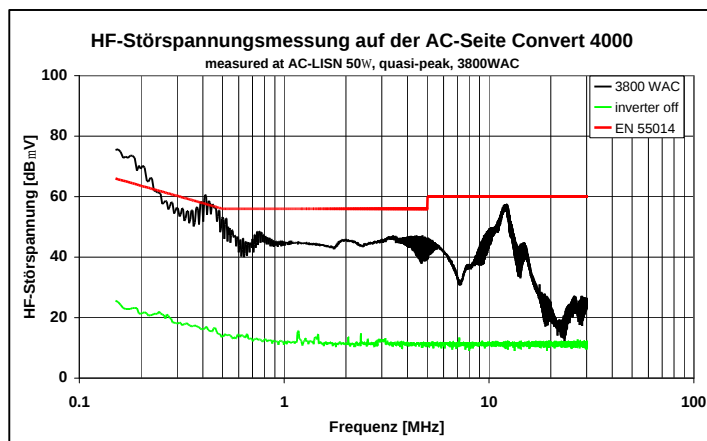


Bild 17:

HF-Störspannungen, die ein Convert 4000 auf der AC-Seite produziert. Die Störspannungen liegen im unteren Frequenzbereich über den Grenzwerten der EN55014.

3.1.5 Empfindlichkeit auf Rundsteuersignale

Mit der Hilfe unseres Rundsteuersignal-Simulators wurden die Wechselrichter bei vielen verschiedenen möglichen Rundsteuer-Frequenzen getestet. Keiner der Wechselrichter zeigte eine Fehlfunktion infolge des Rundsteuersignals (RSS), sofern die Testspannung unterhalb des zulässigen RSS-Pegels lag. Bei höheren Frequenzen mussten die Pegel bei der Messung mit dem Solcolino etwas reduziert werden, weil sich der Wechselrichter kurzzeitig ausschaltete.

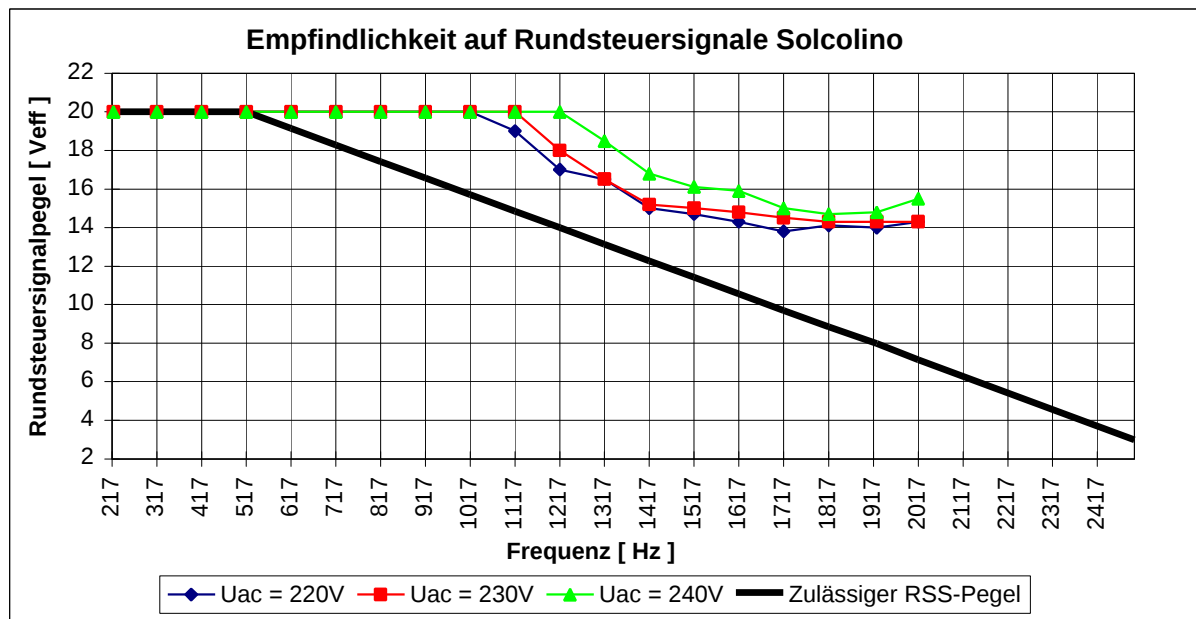


Bild 18:

Rundsteuersignalempfindlichkeit in Funktion der Netzspannung beim Solcolino. Bis zu einer Frequenz von 1017Hz hat das maximale Prüfsignal von 20V_{eff} keinen Einfluss auf das Betriebsverhalten des Wechselrichters.

Um in diesem Test ein '++' zu erhalten, müssen alle Kurven oberhalb der Kurve mit den zulässigen RSS-Pegel liegen.



3.1.6 Langzeitzuverlässigkeit

Auf Grund von Synergien zu dem Projekt „Langzeitverhalten von netzgekoppelten Photovoltaikanlagen [15] konnte die Anzahl der überwachten Geräte ausgedehnt werden. Zur Zeit wird die Weiterführung der Überwachung in Erwartung auf ein Folgeprojekt selber getragen. Das führt dazu, dass durch die höhere Anzahl der Wechselrichter detailliertere Zuverlässigkeitsdaten gewonnen werden können und dass die Tabelle 1 im Vergleich zu den Jahresberichten wesentlich umfangreicher wurde.

Die Zuverlässigkeit der von der HTA Burgdorf überwachten netzgekoppelten Wechselrichter konnte erfreulicherweise in den letzten Betriebsjahren weiter gesteigert werden. In den Jahren 1992 bis 1994 war die Ausfallrate bedingt durch die mangelhafte Qualität vieler Wechselrichter und teilweise auch aufgrund von schlechten Netzverhältnissen (Anlage Birg, hohe Transienten auf dem Netz beim Anlauf der Schilthornbahn) deutlich höher als in den nachfolgenden Jahren. Bedingt durch die zunehmende Erfahrung der Hersteller konnten in den Jahren 1995 bis 1997 viele neuere und ausgereifere Wechselrichter in Betrieb genommen werden. Dadurch sank schon 1995 die Anzahl der jährlich beobachteten Wechselrichter-Defekte deutlich ab. Der Wiederanstieg der Wechselrichterausfälle im Jahre 1998 ist im Wesentlichen auf zwei erneute Ausfälle eines schon seit Jahren sehr unzuverlässig arbeitenden Wechselrichters zurückzuführen, der Ende Dezember 1998 durch einen anderen Wechselrichter ersetzt wurde.

Betrachtet man die Zuverlässigkeit von normalen Haushaltgeräten, so kann gesagt werden, dass die Zuverlässigkeit der Wechselrichter in den Betriebsjahren 1997 bis heute durchaus mit derjenigen der Haushaltgeräte verglichen werden kann.

Wechselrichter	Bau-jahr	Betriebs-monate	Anzahl Hardwaredefekte										Hardware-Defekte pro WR-Betriebsjahr									
			92	93	94	95	96	97	98	99	00	Total	92	93	94	95	96	97	98	99	00	
PVWR 1500	1992	94	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
PVWR 1800	1992	201	0	3	5	4	0					12	0.0	0.8	1.3	1.0	0.0					
Solcon 3300	1991	146	0	0	0	0	1	0	0	2	0	3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	1.0	0.0	
Solcon 3400HE	1992	333	1	1	4	0	1	0	0	2	0	9	33.2	1.0	1.6	0.0	0.2	0.0	0.0	0.4	0.0	
Solarmax S	1995	851				0	5	0	4	1	1	11				0.0	0.4	0.0	0.3	0.1	0.2	
TopClass 1800	1993	79		0	0	0	0	0	0	0	0	0		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
TopClass 2500/4 Grid III	1996	47					0	0	0	0	0	0					0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
TopClass 2500/6 Grid II	1994	144			0	0	1	1	0	0	0	2			0.0	0.0	0.5	0.5	0.0	0.0	0.0	
TopClass 2500/6 Grid III	1996	34					0	0	0	0	0	0					0.0	0.0	0.0		0.0	
TopClass 3000	1992	141	1	2	1	1	1	0	0	0	0	6	1.9	1.3	0.5	0.5	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	
TopClass 4000/6 Grid II	1994	241			0	2	0	0	1	0	0	3			0.0	0.5	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	
TopClass 4000/6 Grid III	1996	245					1	0	0	1	1	3					0.7	0.0	0.0	0.2	0.4	
Solarmax 15	1995	60				0	0	0	0	0	0	0				0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
SolarMax20	1994	118			1	0	0	0	0	0	0	1			1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
SolarMaxDC30+	1998	17							0	0	0	0							0.0	0.0	0.0	
EcoPower20	1994	57			5	0	3	2	2			12			5.6	0.0	3.0	2.0	2.3			
EdiSun 200	1996	43					0	1	0	0	0	1					0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	
Total		2851	2	6	16	7	13	4	7	6	2	63	0.71	0.69	0.95	0.29	0.34	0.09	0.16	0.14	0.11	

Tabelle 2: Ausfallstatistik der Wechselrichter aller von der HTA Burgdorf untersuchten Anlagen. Stand Ende Mai 2000.

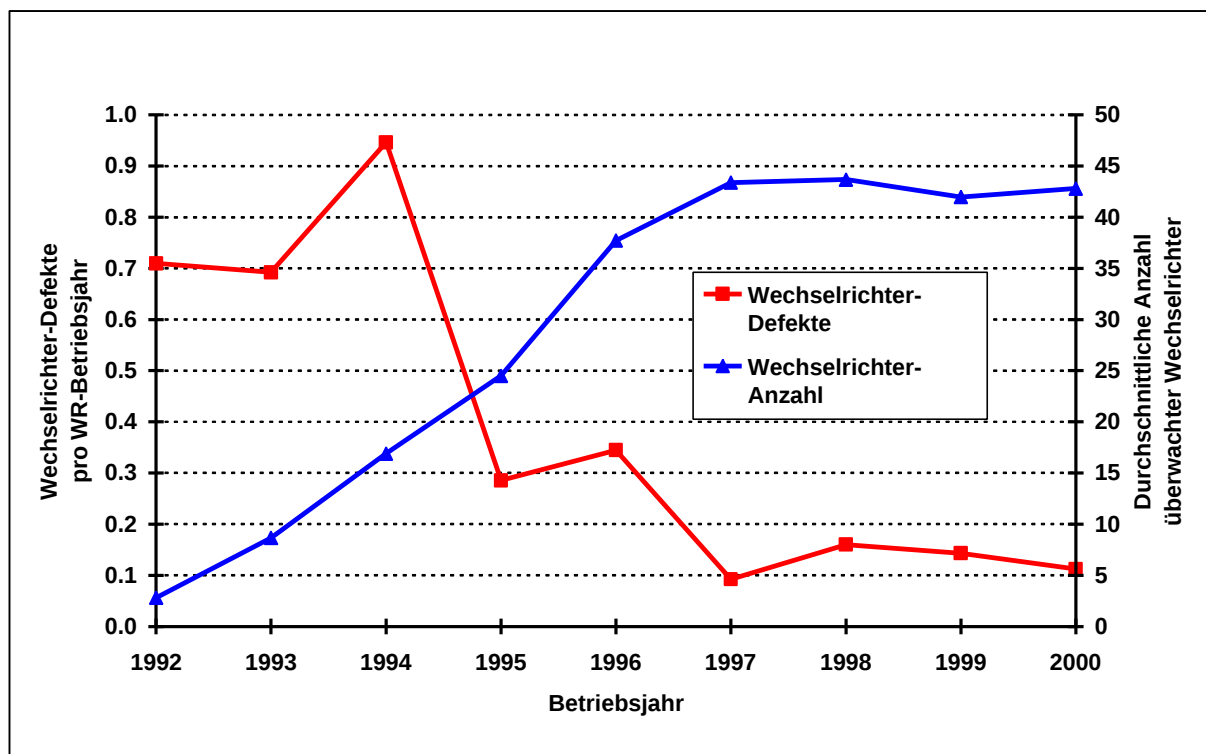


Bild 19:

Wechselrichter-Defekte pro Wechselrichter-Betriebsjahr und durchschnittliche Anzahl überwachter Wechselrichter der HTA Burgdorf. Im Vergleich zu den ersten Betriebsjahren ist die heutige Zuverlässigkeit um ca. Faktor 10 höher. Die Werte der ersten 5 Monate des Jahres 2000 wurden auf ein ganzes Jahr hochgerechnet.



3.1.7 MPP-Tracking-Wirkungsgrad von Netzverbund-Wechselrichtern

Damit ein Wechselrichter eine optimale Energieproduktion erreicht, muss er unabhängig von der Einstrahlung und der Solarzellen-Temperatur im MPP (Maximum Power Point) des Solargenerators arbeiten. Das bedingt, dass sich der Wechselrichter in einem kontinuierlichen Suchvorgang befindet und dass dabei, abhängig von der Güte des Regelalgorithmus, Energie verloren geht. Als Mass für die Güte dieser Anpassung an den MPP ist der Anpassungsgrad oder MPP-Tracking Wirkungsgrad definiert. Man unterscheidet dabei zwischen dem statischen und dem dynamischen MPP-Tracking-Wirkungsgrad.

Um das Trackingverhalten eingehend untersuchen zu können, wurde an der HTA Burgdorf ein Messsystem entwickelt, das es erlaubt, Angaben über den statischen und den dynamischen MPP-Anpassungswirkungsgrad oder MPP-Tracking-Wirkungsgrad zu machen.

Wie sich aus verschiedenen Messungen zeigte, besteht das Hauptproblem der Messung darin, dass es zwingend erforderlich ist, dass auf einen stabilen Simulator als DC-Quelle zurückgegriffen werden kann. Leider war der vorhandene 10kW Simulator in Folge konzeptionell bedingter Schwachstellen nur bedingt geeignet. Die Störungen durch den fluktuierenden Stromverlauf (siehe Bild 34) führten zu falschen MPP-Messungen, und als Folge davon zu falschen Werten für den MPP-Tracking Wirkungsgrad.

Die MPP-Tracking-Messungen mussten daher alle mit einem kleinen Diodenkettensimulator (Kapitel 4.2) durchgeführt werden. Auch diese Messung ist aber nicht optimal, denn auf Grund des Temperaturdrifts der Dioden können nur Messungen bei kleinen Leistungen und kurzer Dauer gemacht werden.

Dieser Umstand führte schliesslich dazu, dass der Entschluss für den Bau eines eigenen, auf unsere Bedürfnisse optimal zugeschnittenen Simulators gefasst wurde. Mehr dazu im Kapitel 4.3.

Statischer MPP-Tracking-Wirkungsgrad

Der statische MPP-Tracking- oder auch MPP-Anpassungs-Wirkungsgrad genannt gibt das Verhältnis zwischen der mittleren DC-Leistung, die der Wechselrichter dem Solargenerator entnimmt, und der im MPP maximal zur Verfügung stehenden Leistung des Solargenerators an. Die bisher getesteten Wechselrichter wiesen einen statischen MPP-Tracking-Wirkungsgrad von bis zu 99,5% auf, unter dem Vorbehalt der oben aufgeführten Schwachpunkte des Messsystems.

$$\text{Statischer MPPT-Wirkungsgrad} \quad h_{MPPT} = \frac{\int_0^{t_M} p_{WR}(t) \cdot dt}{P_{MPP} \cdot t_M}$$

$p_{WR}(t)$: Die Solargeneratorleistung (am Wechselrichtereingang) in Funktion der Zeit.

P_{MPP} : Die verfügbare Leistung des Solargenerators im MPP (unverändert während t_M).

t_M : Dauer der Messung (Beginn zur Zeit $t=0$).

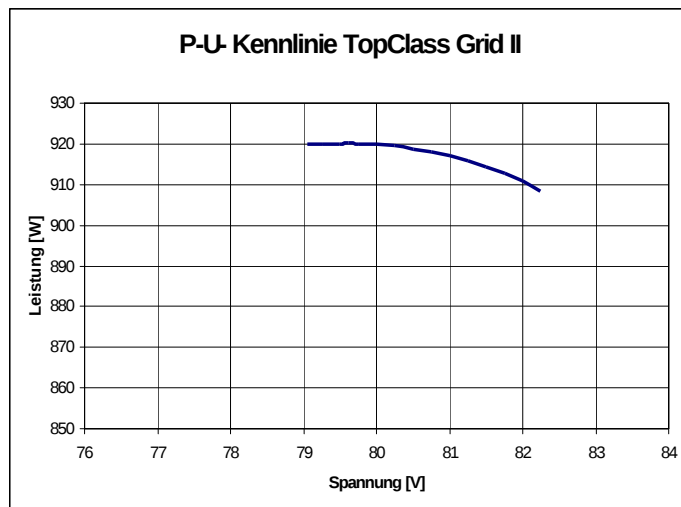


Bild 20:

Statisches MPP-Tracking eines Top Class Grid II 2500/6. Die Messpunkte wurden während 100s bei konstanter DC-Leistung aufgezeichnet und entsprechen den Arbeitspunkten des Wechselrichters. Es ist erkennbar, dass sich der Wechselrichter in einem kontinuierlichen Suchvorgang rund um den MPP befindet. Darum arbeitet der Wechselrichter in der Regel ausserhalb des MPP's.

Dynamischer MPP-Tracking- Wirkungsgrad

Ist die Einstrahlung und somit auch die Leistung im MPP nicht konstant, sondern eine Funktion der Zeit, kann der dynamische MPP-Tracking-Wirkungsgrad definiert werden. Der dynamische MPP-Tracking-Wirkungsgrad gibt somit direkt Auskunft darüber, wie schnell der Regelalgorithmus des Wechselrichters in der Lage ist, einen neuen Arbeitspunkt zu finden. Zur Bestimmung dieses Wertes wird während einer bestimmten Messzeit mit einem programmierbaren Solargenerator-Simulator ein exakt definiertes Profil erzeugt und abgefahren.

Dynamischer MPPT-Wirkungsgrad

$$h_{MPPT} = \frac{\int_0^{t_M} p_{WR}(t) \cdot dt}{\int_0^{t_M} p_{MPP}(t) \cdot dt}$$

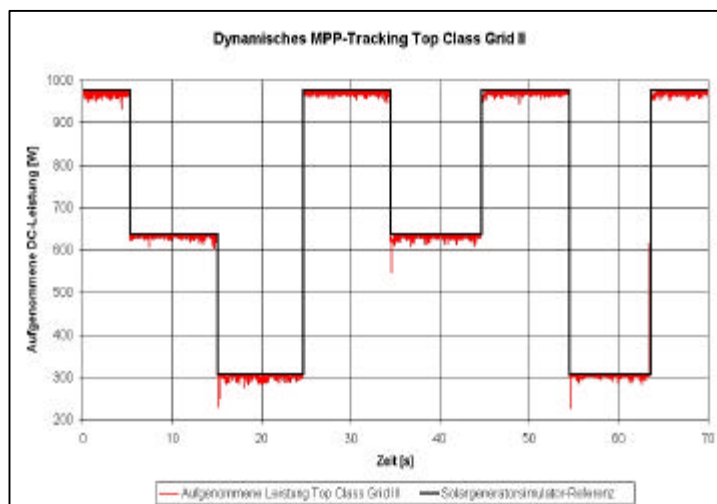


Bild 21:

Dynamisches MPP-Tracking eines Top Class Grid II 2500/6. Als Referenz dienen drei parallel geschaltete identische Leistungsnetzgeräte. Die Leistungssprünge entstehen durch Ein- resp. Ausschalten einzelner Netzgeräte. Der Wechselrichter zeigt ein gutes dynamisches MPP-Tracking, Änderungen im Leistungsangebot werden sofort nachgeregelt.

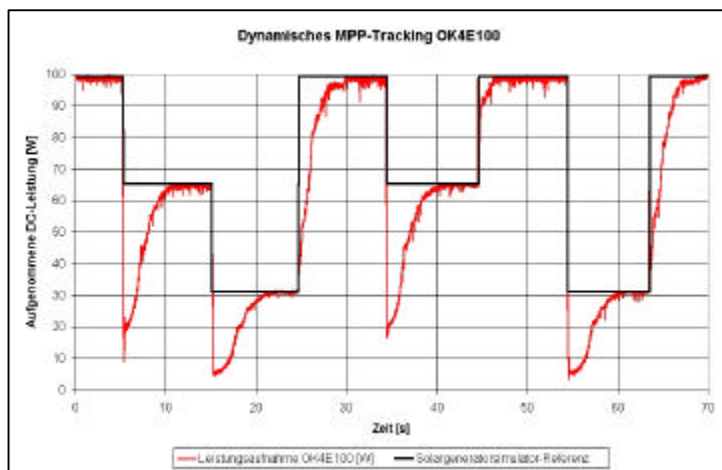


Bild 22:

Dynamisches MPP-Tracking eines Modul-Wechselrichters OK4E100. Der Wechselrichter reagiert viel träger als der Top Class. Nach jeder Änderung des Leistungsangebotes vergehen ca. 5 Sekunden, bis das Gerät wieder im MPP arbeitet. So geht wertvolle Energie verloren

Damit der Energieverlust minimal gehalten werden kann, ist eine schnelle Regelung erwünscht, mit dem Nachteil, dass diese Systeme unter Umständen zum Schwingen neigen. Hier gilt es also für die Hersteller einen Kompromiss zu finden.

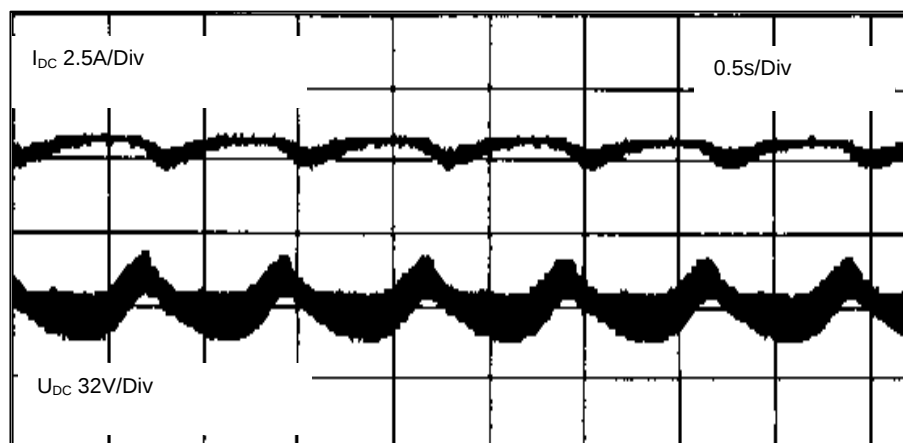


Bild 23:

Langsames Schwingen eines Wechselrichters (Vorserienmodell) auf der DC-Seite um den MPP. Bei diesem Gerät traten diese Störungen nur bei grossen Leistungen und hoher DC-Spannung auf.

3.2 Inselwechselrichter

3.2.1 Umwandlungswirkungsgrad

Für die Untersuchungen bezüglich des Umwandlungswirkungsgrades werden die Wechselrichter mit verschiedenen Verbrauchern belastet. Zunächst werden rein ohmsche Verbraucher an den Ausgang der Wechselrichter geschaltet. Dies führt zu den Kennlinien, wie sie dem Bild 24 zu entnehmen sind.

Der TwinPower SI1224 hat auch im unteren Leistungsbereich ($S_{AC} < 20VA$) einen sehr hohen Wirkungsgrad. Dies ist darum weil er über zwei Transformatoren ($S_{Trafo1} = 20VA$, $S_{Trafo2} = 1200VA$) verfügt und er bei kleinen Leistungen auf den kleineren Transformator mit den entsprechend kleineren Verlusten zurückgreifen kann. Im oberen Leistungsbereich ($S_{AC} > 20VA$) weist der TopClass 13/24, der mit herkömmlicher Technologie, also mit nur einem Transformator ausgerüstet ist, annähernd den gleichen Wirkungsgrad auf wie der TwinPower SI 1224.

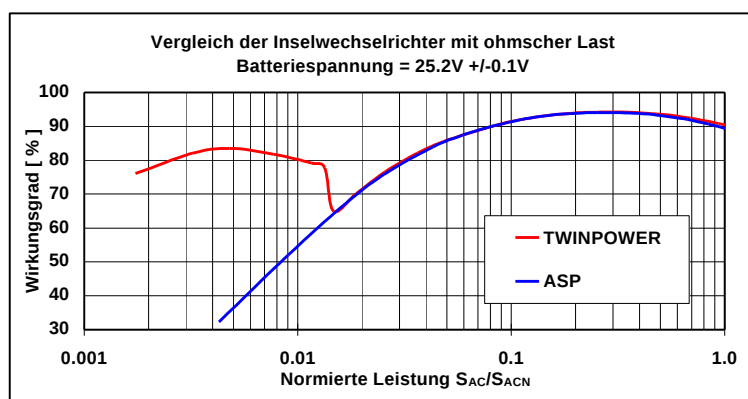


Bild 24:

Vergleich des Umwandlungswirkungsgrades eines Inselwechselrichters TwinPower SI1224 ($S_{ACN} = 1,2kVA$) und eines TopClass 13/24 ($S_{ACN} = 1,3kVA$) bei ohmscher Last.

Da die meisten Verbraucher ohmsch/induktive Charakteristik aufweisen, ist auch der Umwandlungswirkungsgrad bei diesen Verbrauchern ausserordentlich wichtig. Bild 25 zeigt, dass bei sinkendem $\cos \varphi$ auch der Wirkungsgrad abnimmt. Dies stammt daher, weil auch die Kupferverluste im Wechselrichter auf Grund der grösser werdenden Scheinleistung stetig zunehmen.

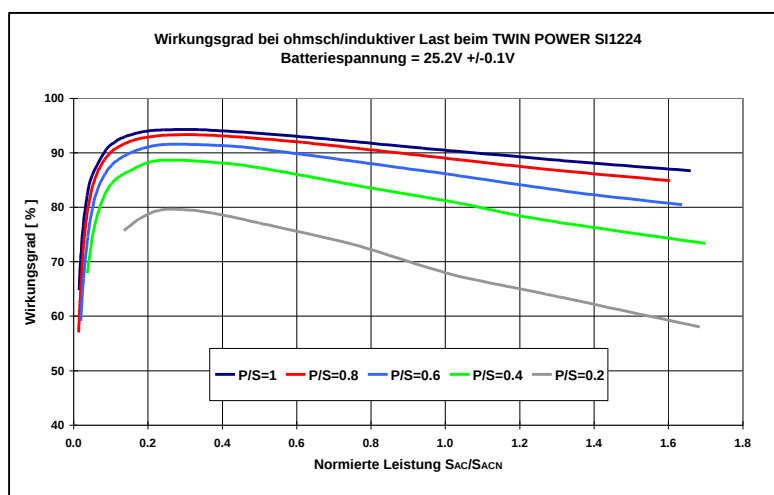


Bild 25:

Wirkungsgrad des Studer Twin Powers 1224 ($S_{ACN} = 1200VA$) Wechselrichters bei verschiedenen Werten des Leistungsfaktors $\cos \varphi = P/S$.

3.2.2 Kurvenform und Oberschwingungsgehalt

Gegenüber früheren Rechteck- oder Trapez-Wechselrichtern stellen die heutigen Sinuswechselrichter einen eindeutigen Fortschritt dar. Die Sinusform ist zwar nicht bei jedem Gerät perfekt, erreicht aber immerhin Netzqualität. Bild 26 zeigt die Ausgangsspannung eines TopClass 13/24 bei einer ohmschen Last von 300W und Bild 27 das Spektrum der Oberschwingungsspannungen bei verschiedenen Belastungen im Vergleich zu den Grenzwerten von EN61000-2-2, welche die im Netz maximal zu erwartenden Oberschwingungsspannungen definiert.

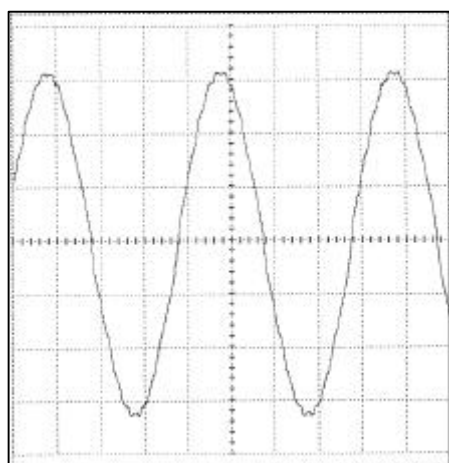


Bild 26:

Ausgangsspannung eines TC 13/24 bei einer ohmschen Last von 300W. Der Regelkreis arbeitet nicht ganz optimal, was an den Spitzen des Sinus zu erkennen ist.
Masstäbe: Vertikal 100V/Div, horizontal 5ms/Div.

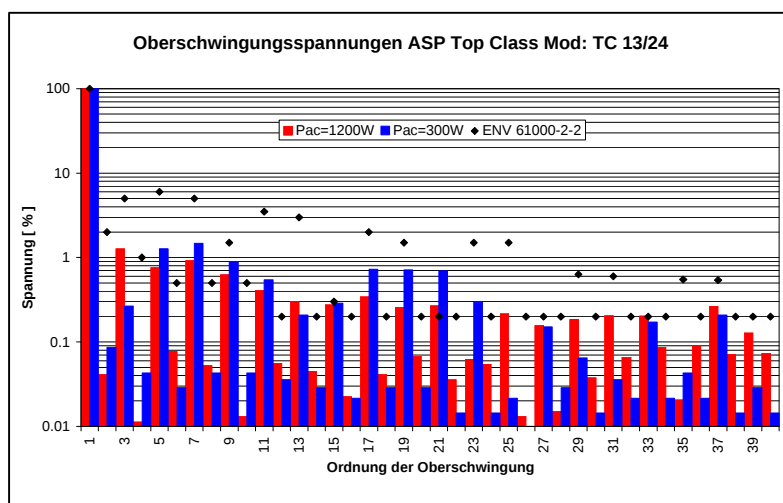


Bild 27:

Oberschwingungsspannungen eines ASP TC 13/24 bei verschiedener Belastung im Vergleich zu den Grenzwerten nach EN61000-2-2.

3.2.3 Überlastverhalten

Aufgrund der hohen Anlaufleistung vieler Verbraucher (z.B. Kühlschrank $S \approx 10 \cdot S_N$ während bis zu 0,5s, Bohrmaschine $S \approx 5 \cdot S_N$ während 0,1s, usw.) ist die kurzzeitige Überlastbarkeit eines Inselwechselrichters sehr wichtig. Bei massiver Überlastung schalteten die Wechselrichter auf Grund der Maximalstromüberwachung zum Schutz der Elektronik meist sehr schnell ab. Bei geringer Überlastung ist dagegen während einer beschränkten Zeit ein Überlastbetrieb bis zum Erreichen der maximal zulässigen Betriebstemperatur möglich.

Ein schlechtes Überlastverhalten (eine geringe kurzzeitige Überlastbarkeit bzw. thermische Belastbarkeit) kann dazu führen, dass ein überdimensioniertes Gerät mit

dem entsprechend höheren Kosten eingesetzt werden muss. Das wiederum führt auf Grund der Überdimensionierung des Wechselrichters zu zusätzlichen Verlusten.

Zwischen den zwei getesteten Geräten bestehen sehr grosse Unterschiede. Der Twin Power schaltet bei einem Überlastfaktor von zwei erst nach 10 Minuten wegen thermischer Überlastung ab. Der Top Class bleibt bei dieser Überlastung nur 47 Sekunden in Betrieb (Bild 28).

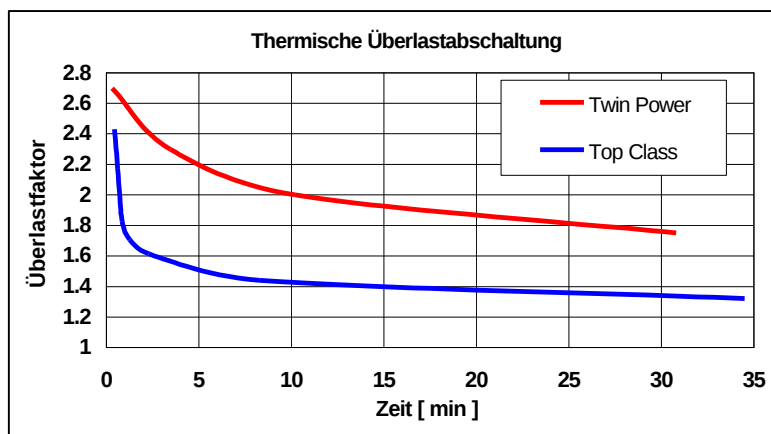


Bild 28:

Mögliche Betriebszeit im Überlastbetrieb bei ohmscher Last in Funktion der Überlastfaktors S_{AC}/S_{ACN} bei den beiden Wechselrichtern Studer TwinPower SI1224, und der TopClass 13/24.

3.2.4 Elektromagnetische Verträglichkeit

Inselwechselrichter enthalten schnelle elektronische Schalter, welche im Betrieb grosse steilflankige Ströme und Spannungen mit einem hohen Gehalt an hochfrequenten Anteilen hervorrufen. Das kann in der näheren Umgebung zu Störungen von empfindlichen elektronischen Geräten (Radio) führen, sofern nicht geeignete Gegenmassnahmen getroffen werden. Da es für Inselwechselrichter noch keine gerätespezifische Norm bezüglich der Emission leitungsgebundener hochfrequenter Störungen gibt, werden die Geräte auf der AC- und der DC-Seite im Bereich von 150kHz bis 30MHz nach den Grenzwerten der Norm EN55014 für elektrische Haushaltsgeräte geprüft.

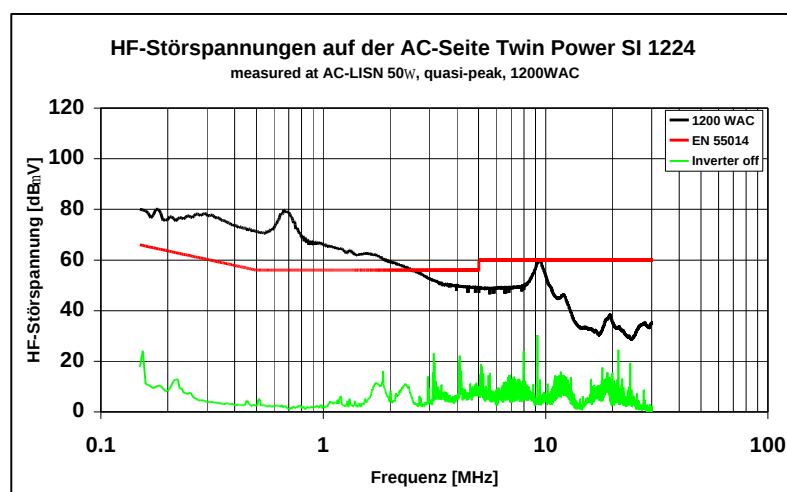


Bild 29:

HF-Störspannungen, die der Twin Power SI1224 auf der AC-Seite produziert im Vergleich zu den Grenzwerten nach EN55014. Die Emissionen liegen eindeutig über den massgebenden Grenzwerten.

Bei den Inselwechselrichtern ist eine ähnliche Situation wie vor einigen Jahren bei den Netzwechselrichtern zu beobachten. Wegen der Unsicherheit, welche Norm anzuwenden ist, gibt es einige Hersteller, die nur ungenügende oder gar keine Massnahmen zum Schutz vor unzulässigen hochfrequenten Emissionen ergreifen.

4 Weiterentwicklung der Wechselrichtertestanlage

4.1 Realisierung eines Testplatzes für Inselwechselrichter

Infolge des wachsenden Interesses an Wechselrichter für Inselanlagen hat sich die PV-Gruppe der HTA Burgdorf entschlossen, mit der Hilfe einer Schweizer Firma, die der HTA Burgdorf 8 Akkumulatoren 12V/250Ah schenkte, einen Inselwechselrichtermessplatz aufzubauen.

Aufgrund der guten Erfahrungen, die mit dem Testgenerator auf dem Dach des Elektrogebäudes der HTA Burgdorf gemacht wurde, entschloss man sich, auch bei dem Bau dieser Testeinrichtung die freie Skalierbarkeit der Anlage möglichst in keiner Weise zu beschränken. Dies hatte zur Folge, dass kein Verdrahtungsaufwand gescheut wurde und schliesslich ein Teststand entstand, der für DC-Spannungen von 12V bis 96V in 12V Schritten frei konfigurierbar ist. Als Messgeräte kommen zum Teil speziell entwickelte PC-Messschaltungen oder Geräte aus dem umfangreichen Gerätepark der HTA Burgdorf zum Einsatz. Mit diesem Messplatz ist es möglich, detaillierte Messungen und Tests an Inselwechselrichtern zu machen. Dabei werden folgende Betriebsparameter erfasst

- Erfassung der Wirkungsgradkurven bei ohmscher und ohmscher-induktiver Last
- Untersuchungen über das Oberschwingungs-, das Transienten- und das Überlastverhalten
- EMV-Messungen

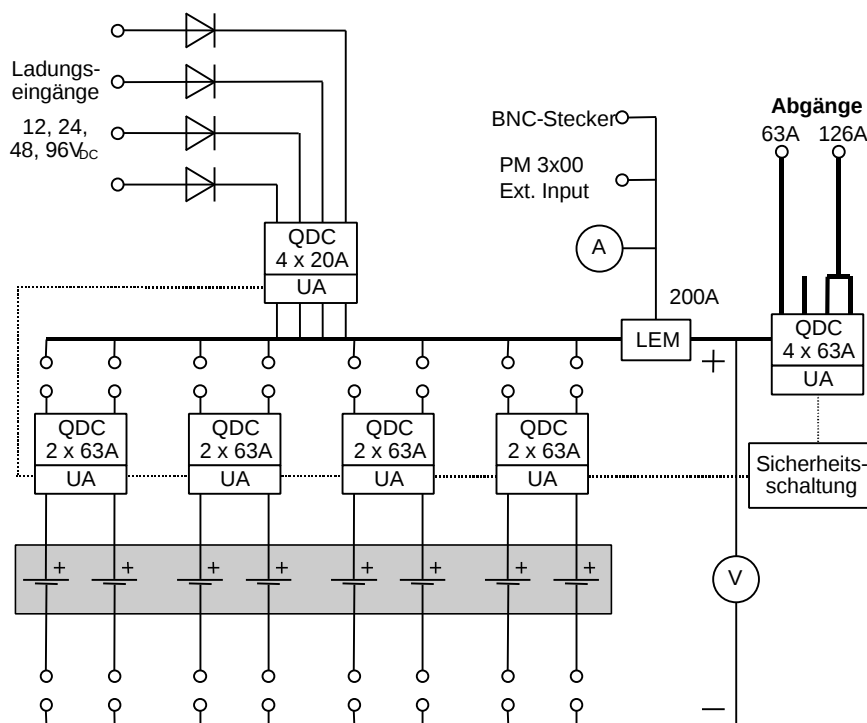


Bild 30: Blockschaltbild der Speisung des Inselwechselrichter-Messstandes.

4.2 Bau eines Solargenerator-Simulators für kleinere Wechselrichter (<3kWp)

Leider arbeitete der im Rahmen der Weiterbildungsoffensive beschaffte 10kW Solargenerator-Simulator in der Vergangenheit nicht mehr sehr zuverlässig. Immer öfter musste der Simulator während mehrere Wochen stillgelegt werden. Dies vornehmlich aufgrund von Haarrissen in den Leiterbahnen. Da der Simulator quasi den Status eines Prototypen besitzt, wurden die Reparaturzeiten nicht nur länger, sondern auch kostenintensiver. Gleichzeitig sank leider auch der Support durch den Hersteller.

Mit der kontinuierlichen Weiterentwicklung der Messsysteme (z.B. MPP-Tracking) zeigte sich zunehmend, dass der bestehende Simulator aufgrund von konzeptionell bedingten Mängeln nicht mehr in unser Messsystem passte. Unter der Berücksichtigung der oben aufgeführten Faktoren entschied man sich dann zu dem Bau eines eigenen Simulators.

Der erste Simulator, der entwickelt und gebaut wurde, ist ein Gerät für kleinere Leistungen bis 3kWp. Er wird über Power-Supply-Amplifier-Netzgeräte gespiesen, besteht aus einer einfachen Diodenkette und arbeitet annähernd linear. Die Leistung, die dem Wechselrichter zugeführt werden soll, ist über die Netzgeräte steuerbar. Mit diesem Simulator können Wechselrichter mit einer Leerlaufspannung von bis zu 150V und einem maximalen Strom von 25A betrieben werden.

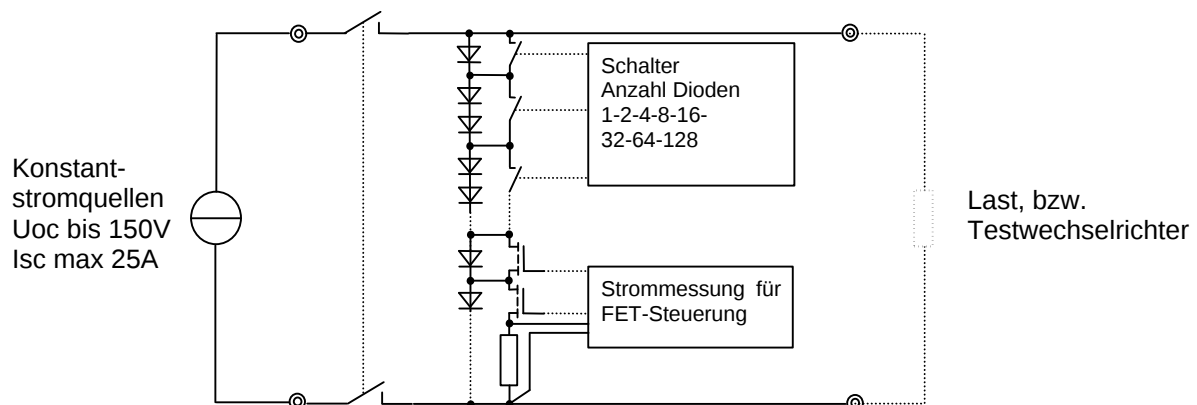


Bild 31: Prinzipschaltbild des Diodenkettens-Solargenerator-Simulators.

Die charakteristischen Merkmale dieses Simulators sind:

- Binär abgestufte Diodengruppen zur Einstellung beliebiger Leerlaufspannungen.
- Zusätzliche Dioden zur Regelung der Solargeneratorspannung.
- Diodenmessung und sofortige Korrektur der Solargeneratorspannung.
- Verzögerte Korrektur infolge der Erwärmung der Diodengehäuse.
- Temperaturmessung des Kühlluftstromes und Korrektur der Solargeneratorspannung infolge der Erwärmung der Kühlkörper.

4.3 Bau eines Solargenerator-Simulators für Wechselrichter bis 25kWp

Um die Möglichkeiten des Testlabors noch weiter auszubauen und zu verbessern, laufen zur Zeit die Arbeiten für die Realisierung eines Solargenerator-Simulators mit einer Leerlaufspannung von bis zu 750V und einem maximalen Strom von ca. 40A was einer MPP-Leistung von ca. 25kW entspricht. Als Vorarbeit wurde bereits ein kleinerer Prototyp (750V=, 8A, 5kW) entwickelt und gebaut.

Der Simulator kann sowohl manuell als auch vom Computer gesteuert werden und besitzt verschiedene Kennlinien mit unterschiedlichen Füllfaktoren. Er arbeitet nach dem Prinzip der gesteuerten Stromquelle.

Die Speisung der Last (Wechselrichter) erfolgt über eine vollständig analog geregelte spannungsgesteuerte Stromquelle (10 Blöcke parallel). Die verschiedenen Formen der Kennlinien (mit unterschiedlichen Füllfaktoren) werden durch geschicktes Zusammenschalten von mehreren Kleinsignaldioden im Regelkreis erzeugt. Die Dioden werden von maximal 100 μ A durchflossen, somit erwärmen sie sich kaum und die Ausgangskennlinie bleibt konstant.

Jeder Block besteht aus 10 parallel geschalteten Elementarstromquellen mit je einer MOSFET-Leistungsstufe (IQ750). Die gesamte Anlage wird ab einer Gleichstrommaschine gespeist. Weil die Power MOSFET im linearen Bereich betrieben werden, ist die maximale Verlustleistung wesentlich tiefer als dies in den Datenblätter angegeben ist. Das erfordert eine Leistungsbegrenzung der Schaltung bei der Annäherung an den Kurzschluss.

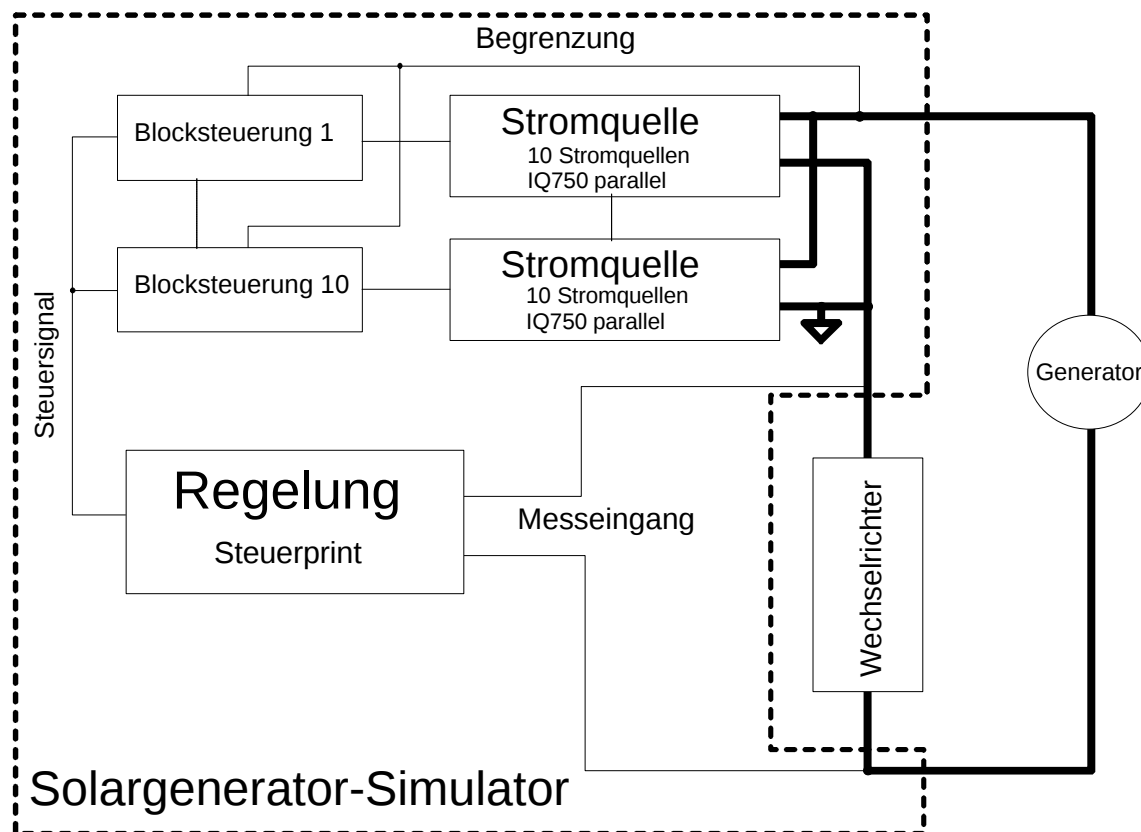


Bild 32: Blockschaltbild des 25kWp Solargenerator-Simulators

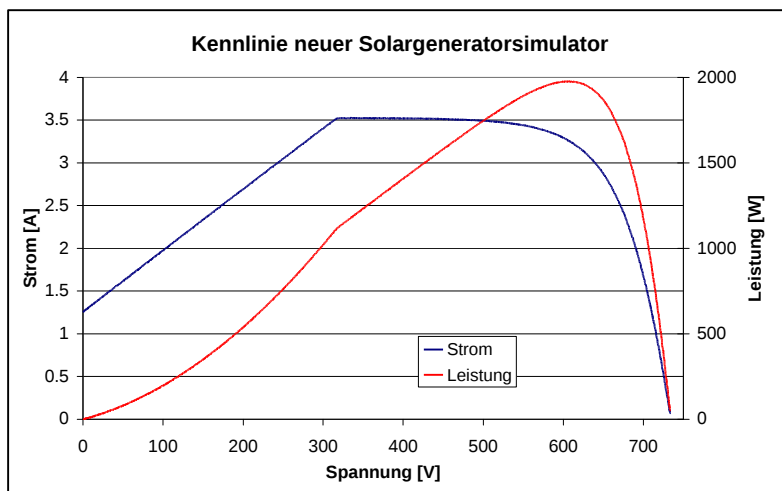


Bild 33:

Kennlinie des neuen Simulators. Im Kurzschluss fällt die gesamte Eingangsspannung über der Stromquelle ab. Zum Schutz der Power MOSFETs vor zu grossen Verlustleistungen, wurde eine Leistungsbegrenzung bei Annäherung an den Kurzschluss entwickelt.

Die Leistungsbegrenzung hat auf die Wechselrichtertests keinen Einfluss, da ein fehlerfrei funktionierender Wechselrichter nie in diesem Bereich arbeitet. Bedingt durch den analogen Aufbau des Simulators und des bestmöglich auf die Bedürfnisse des Teststandes angepassten Regelkreises ist dieses Gerät geradezu optimal geeignet für die Untersuchungen des MPP-Trackings. Damit der Fortschritt durch den neuen Simulator auch klar ersichtlich wird, ist in Bild 34 noch die charakteristische Kennlinie des alten Simulators dargestellt.

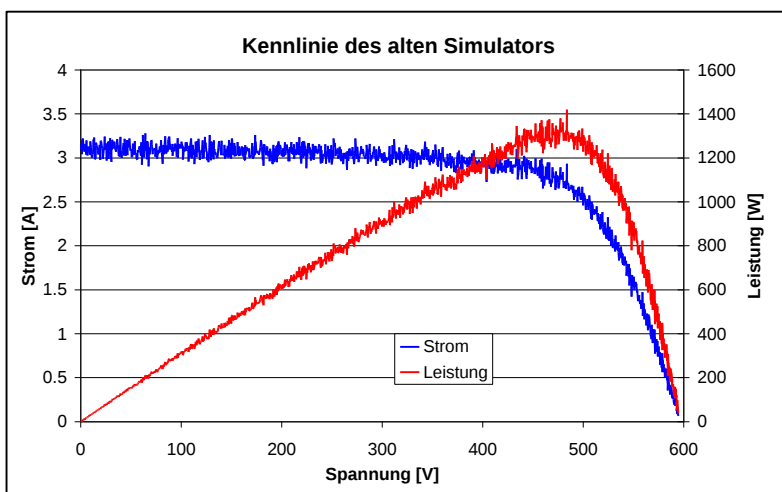


Bild 34:

Kennlinie des alten Simulators. Das Gerät besitzt eine getaktete Endstufe. Die eigene PWM Frequenz ist deutlich am Ausgang zu erkennen. Bedingt durch die grossen Störungen auf dem Strom ist das Gerät nicht geeignet für die MPP - Tracking-Wirkungsgradmessung.

4.4 Entwicklung einer Netznachbildung für die Gleichstrom-seite für EMV-Messungen

Die Messungen der HF-Emissionen von Photovoltaikwechselrichtern auf der Gleichstromseite erfolgten bisher meist durch die Messung der HF-Störspannungen. Diese Messmethode ist jedoch anfällig auf eingestrahlte oder von der DC-Quelle selbst erzeugte Störspannungen.

Eine Möglichkeit, welche sich speziell auch für Feldmessungen eignet, ist die Messung des HF-Störstromes. Diese Messmöglichkeit ist im informativen Anhang der EN 50081 als alternative Methode vorgeschlagen, und setzt einen definierten HF-mässigen Abschluss mit 150Ω gegen Bezugserde voraus. Netzwerke, welche einen solchen Abschluss aufweisen, befinden sich in der Norm EN 61000-4-6. Diese Norm enthält primär Schaltungen, die für das Einkoppeln von HF-Störspannungen für Immunitätsmessungen im Bereich von 150kHz-80MHz vorgesehen sind. Sie sind jedoch auch als Netznachbildung verwendbar.

Im Rahmen einer Zusammenarbeit mit der Firma Schaffner Elektronik AG wurde ein derartiges DC-(Ent-)Koppelnetzwerk entwickelt, das auch als DC-Netznachbildung genutzt werden kann, sofern der HF-Messsignaleingang mit einem 50Ω -Widerstand abgeschlossen wird (siehe EN 61000-4-6 Bild D.3). Diese DC-Netznachbildung weist folgende Nenndaten auf :

Betriebsspannung :	1000V DC gegen Erde und von + nach –
Prüfspannung :	2700V DC
Nennstrom :	100A
Definierter HF-Abschluss :	$150\Omega \pm 20\Omega$ bei 0,15–140MHz

Die Kenndaten des (Ent-)Koppelnetzwerk liegen deutlich über den Minimalanforderungen aus der EN 61000-4-6. Detailliertere Angaben befinden sich in [16]. Diese DC-Netznachbildung stellt eine wesentliche Verbesserung des vorhandenen Messplatzes für die Messung leitungsgebundener HF-Emissionen von PV-Wechselrichtern dar. Tests können nun schneller durchgeführt werden und die Reproduzierbarkeit der Messungen ist wesentlich besser.

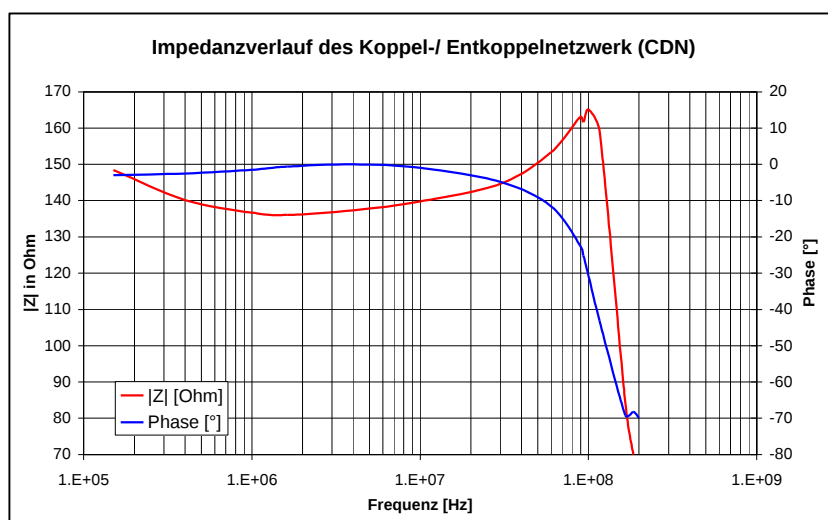


Bild 35:

Impedanzverlauf des 150Ω (Ent-)Koppelnetzwerkes. Die Grenzwerte gemäss Norm EN 61000-4-6 werden im Frequenzbereich 150 kHz – 80 MHz eingehalten.

5 Ergänzende Untersuchungen zum Selbstlaufverhalten von Photovoltaik-Wechselrichtern

5.1 Selbstlaufproblematik und mögliche Testschaltungen

Viele Wechselrichter für netzgekoppelte Photovoltaikanlagen sind selbstgeführt und haben deshalb eine gewisse konzeptbedingte Neigung zu Selbstlauf. Im Rahmen seiner Untersuchungen an Photovoltaikwechselrichtern hat das Photovoltaik-Labor der HTA Burgdorf deshalb immer auch Tests auf Inselbildung durchgeführt und an der Weiterentwicklung der dazu verwendeten Testschaltungen mitgewirkt. Bereits bei den ersten auf dem Markt erschienenen Wechselrichtern genügte ein blosser Unterbruch der Verbindung zum Netz nicht, um einen Selbstlauf von mehr als 5 s Dauer auszulösen. Für einen derartigen Selbstlauf in einem abgetrennten Teil des Netzes nach einem Netzausfall war immer mindestens eine angepasste Last notwendig, welche die vom Wechselrichter produzierte Wirkleistung aufnahm. Bild 36 zeigt die für solche einfachen Selbstlauftests verwendete Schaltung.

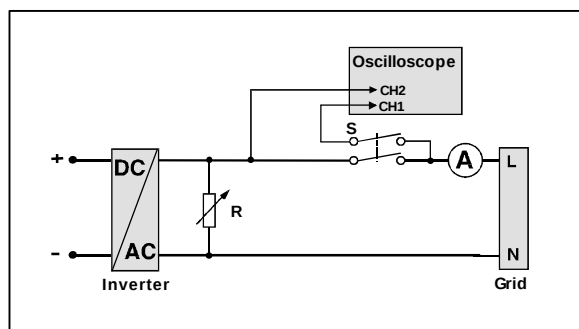


Bild 36:

Erste Testschaltung für Inselbetriebstests mit angepasster Last. Bevor die Schalter geöffnet werden, wird der Widerstand R so eingestellt, dass der Strom durch das Ampèremeter A minimal wird. Kanal CH1 wird benutzt, um den genauen Schaltzeitpunkt festzustellen.

Für die Detektion des Selbstlauf wurde und wird bei vielen Geräten immer noch das Frequenzschiebeverfahren angewendet. Dabei verschiebt sich die Selbstlauf-frequenz des Gerätes bei einem Unterbruch der Verbindung zum Netz nach oben oder nach unten, so dass sie sich in kurzer Zeit ausserhalb des in Westeuropa zulässigen Frequenzfensters von etwa 49,8 Hz bis 50,2 Hz befindet. Wird durch den meist eingebauten Mikroprozessor des Wechselrichters die Frequenz laufend überwacht, kann notfalls sehr leicht eine Abschaltung ausgelöst werden.

Obwohl in der Literatur noch nicht über in der Praxis vorgekommene Probleme mit Inselbetrieb von Photovoltaikanlagen berichtet wurde, herrscht besonders in Deutschland aus prinzipiellen Überlegungen grosse Angst vor solchen Inselbetriebs-zuständen in abgetrennten Teilen des Netzes und das Frequenzschiebeverfahren wird als ungenügend erachtet, da befürchtet wird, dass eventuell vorhandene Motoren die Netzfrequenz stabilisieren könnten. Deshalb wurden schon sehr früh andere Überwachungsverfahren verlangt (kontinuierliche dreiphasige Unter- und Überspannungsüberwachung auch bei einphasigen Wechselrichtern). Wegen des zusätzlichen Aufwandes für den dreiphasigen Anschluss und auf Grund der Idee, dass im Verteilnetz die Netzimpedanz am Verknüpfungspunkt primär durch den Verteil-transformator bestimmt wird, wurde die Idee der kontinuierlichen Netzimpedanz-überwachung durch die ENS (zwei voneinander unabhängige Einrichtungen zur Netzüberwachung mit zugeordneten allpoligen Schaltern in Reihe) entwickelt, welche den Wechselrichter bei Impedanzsprüngen $> 0,5\Omega$ (nach neuesten Vorstellungen) abschaltet.

Die für den Selbstlauftest verwendeten Testschaltungen wurden im Laufe der Zeit immer weiter verfeinert, um neuere Ideen (Anpassung auch der Blindleistung durch zusätzliche L- und C-Lasten, Netzsimulationsschwingkreis, Test der ENS nach deutschen Vorschriften) zu integrieren. Bereits am Ende des vorherigen Projektes [14] lag eine Testschaltung vor, mit der in unserem Labor Wechselrichter nach deutschen und schweizerischen Vorstellungen untersucht werden konnten. Im Laufe dieses Folgeprojektes wurde an internationalen Konferenzen auch gezeigt, dass die ursprünglich recht komplizierte ENS-Testschaltung nach früheren deutschen Normenvorschlägen durch Äquivalenzumwandlungen stark vereinfacht werden kann [6, 7]. Die am PV-Labor der HTA Burgdorf entwickelte Schaltung (siehe Bild 37) wurde in einen nationalen deutschen Normentwurf (DIN VDE 126) [8] und sogar in internationale Normentwürfe [11, 12] übernommen.

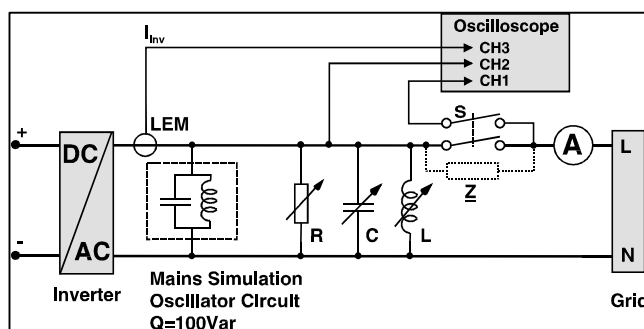


Bild 37:

Erweiterte und verbesserte Schaltung für Inselbetriebstests, wie sie in diesem Projekt verwendet wurde. R, L und C werden so abgeglichen, bis das Ampèremeter A einen minimalen Strom anzeigt. Für Tests nach den aktuellen Schweizer Vorschriften ist $Z = \infty$, für Tests nach den gegenwärtig aktuellen deutschen Vorschriften für den ENS-Test ist $Z = 0,5\Omega$.

Im Laufe dieses Projektes wurde zudem festgestellt, dass bei einigen Wechselrichtern bei einem Unterbruch der Verbindung zum Netz unter Last (ohne angepasste Last) eine relativ hohe transiente Überspannung auftreten kann, welche andere, parallel dazu angeschlossene Verbraucher gefährden kann. Deshalb wurden alle in diesem Projekt getesteten Wechselrichter neben dem Selbstlauftest mit angepasster Last in der Schaltung nach Bild 37 auch diesem Netzabschalttest unter Last unterzogen.

In japanischen Vorschriften für die Durchführung von Inselbetriebstests wird auch die Verwendung eines Motors verlangt. Durch Ergänzung der Schaltung nach Bild 37 mit einem Motor entsteht die Schaltung in Bild 38. Sie würde eine denkbare universelle Testschaltung für Inselbetriebstests darstellen [6]. Die Art und die Grösse des zu verwendenden Motors müsste natürlich genau spezifiziert werden. Für Länder ohne vorgeschriebene Netzimpedanzüberwachung wäre $Z = \infty$. Für Länder mit vorgeschriebener Netzimpedanzüberwachung entspräche Z dem Wert des geforderten Netzimpedanzsprungs.

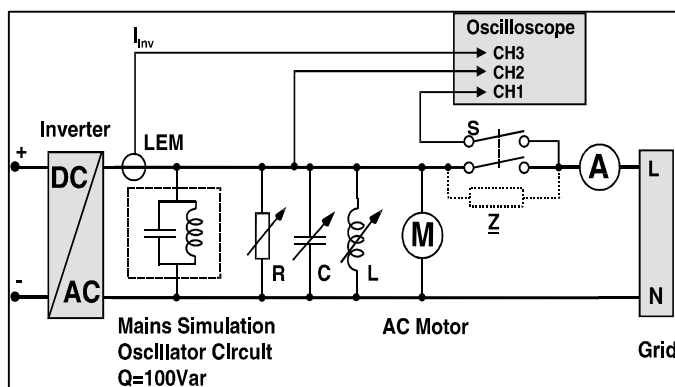


Bild 38:

In [6] vorgeschlagene universelle Testschaltung für Inselbetriebstests, die allen bekannten Vorschriften angepasst werden kann. Je nach Land können einzelne Elemente weggelassen oder wenn nötig anders dimensioniert werden. In den USA wird beispielsweise auch ein Test mit einer relativ hohen Blindleistungsaufnahme ($>> 100\text{Var}$) durch den parallel geschalteten Resonanzkreis diskutiert, um eine relativ hohe Güte ($Q = 5$) der angeschlossenen Last zu erreichen [13].

Neben den Routinetests von Wechselrichtern im Rahmen dieses Projektes in der Schaltung gemäss Bild 37 wurden auch noch weiterführende Untersuchungen der Problematik des Inselbetriebs durchgeführt. Zunächst wurde die Funktion der ENS an einigen deutschen Wechselrichtern näher betrachtet. Im Rahmen einer Semesterarbeit wurde der Inselbetrieb von Wechselrichtern in Netzen mit Motoren (im abgetrennten Teil des Netzes) näher untersucht. Ferner wurde in Zusammenarbeit mit der Firma Alpha Real in einem Feldversuch an einer Anlage mit sehr vielen kleinen (Modul- und String-) Wechselrichtern getestet, ob die Wahrscheinlichkeit eines Inselbetriebs bei einer solchen Anlage höher ist.

5.2 Messprinzip von zwei Wechselrichtern mit ENS

Um einen Einblick in die Funktion von Wechselrichtern mit Netzimpedanzüberwachung zu gewinnen, wurde untersucht, wie der SWR 700 von SMA und der SPN 1000 von Siemens die Netzüberwachung realisieren. Bild 39 und Bild 40 zeigen die entsprechenden Ergebnisse.

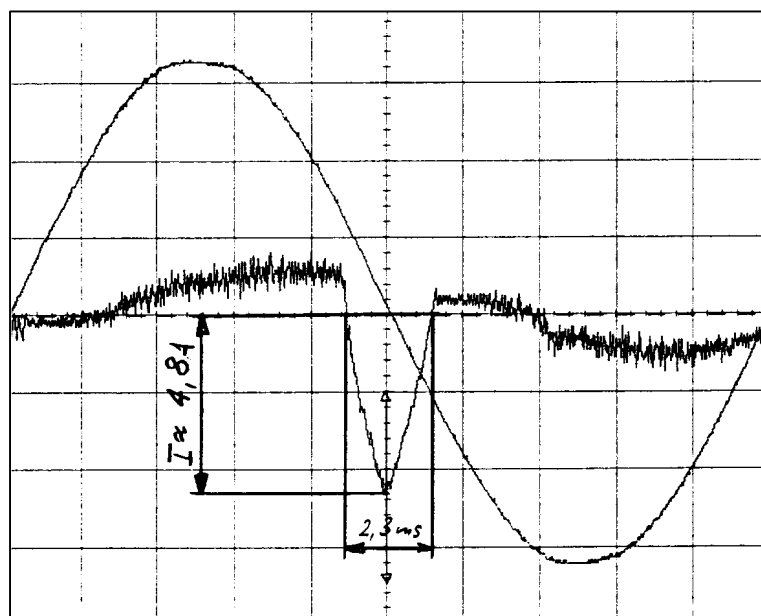


Bild 39:

Netzimpedanzmessung bei einem SMA SWR700, $P_{AC} \approx 130W$

Kurve 1:

Ausgangsspannung des SWR700
(100V/div)

Kurve 2:

Ausgangsstrom des SWR700
(2A/div)

Horizontal: 2ms/div

Zur Messung der Netzimpedanz wird bei diesem Gerät ein Stromimpuls in Form einer Sinushalbperiode verwendet. Die Dauer dieser Sinushalbperiode ist wesentlich kürzer als die Dauer einer Halbperiode des Netzes. Das in dieser Halbperiode enthaltene Frequenzgemisch liegt deshalb zum grössten Teil deutlich über der Netzfrequenz. Deshalb wird hier nicht die (noch einigermaßen definierte) Netzimpedanz bei 50 Hz gemessen, sondern es wird die Netzimpedanz bei einer nicht genau definierten, jedenfalls aber deutlich höheren Frequenz gemessen. Bei derartigen Frequenzen ist aber die Netzimpedanz in der Praxis weit weniger genau definiert als bei 50Hz (Beispiele möglicher Störeinflüsse: Unterschiedlicher Induktivitätsbelag je nach Art der Leitung, benachbarte Blindstrom-Kompensationsanlagen).

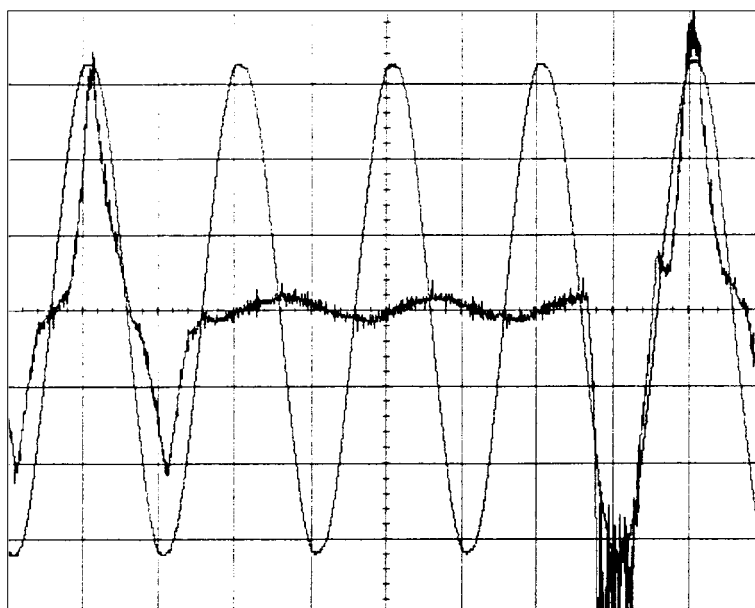


Bild 40:
Netzimpedanzmessung bei einem Siemens SPN1000

Kurve 1:
Ausgangsspannung des
SWR700 (100V/div)

Kurve 2:
Ausgangsstrom des
SWR700 (2A/div)

Horizontal: 10ms/div

Bei diesem Gerät wird ein anderes Prinzip als beim SWR700 verwendet. Die Einspeisung von Strom (und Leistung) wird alle 2,5 s für 50 ms unterbrochen. Mit der gespeicherten Energie wird darauf ein starker Impulsstrom mit gegen ca. 10 A Scheitelwert zur Messung der Netzimpedanz erzeugt, der auch einen gewissen hochfrequenten Anteil enthält. Um eine gewisse Immunität gegen Störungen auf dem Netz zu erhalten, erfolgt alle 2,5 s eine Messung (siehe Bild 41). Dies erlaubt bei einem infolge einer Störung zu gross gemessenen Impedanzwert die Durchführung einer Kontrollmessung vor dem endgültigen Abschalten.

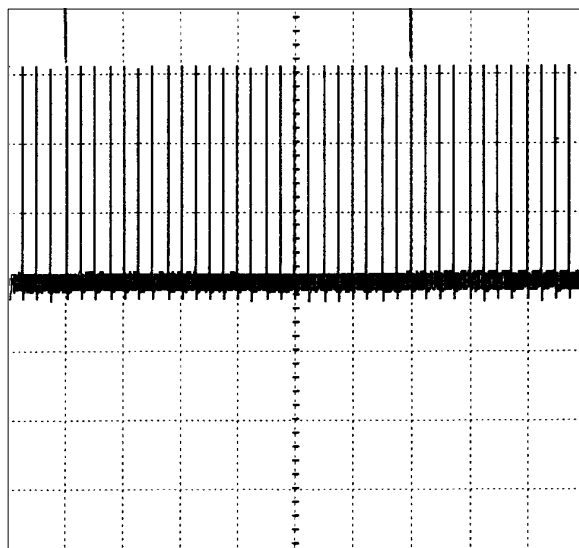


Bild 41:
Netzimpedanzmessung bei einem Siemens SPN1000

In diesem Diagramm beträgt der Zeitmassstab 10s / Div . Deshalb ist hier nur noch ein Nadelpuls pro Messzyklus sichtbar.

Die permanente Netzimpedanzmessung mit ENS ist sicher ein neuer und innovativer Ansatz zur Beherrschung des Selbstlaufproblems. Sie funktionierte bei diesen zwei Geräten im Laborversuch einwandfrei. Auch ein gleichzeitiger Parallelbetrieb dieser zwei Wechselrichter (und eines dritten, leihweise erhaltenen SWR 700) war im Labor ohne Störungen möglich.



Im praktischen Betrieb im Netz hat die kontinuierliche Netzimpedanzmessung jedoch auch einige Probleme zur Folge, die weiter untersucht und verbessert werden sollten:

- Wenn der Betriebsstrom des Wechselrichters zur Netzimpedanzmessung verwendet wird, ist ein bestimmter Minimalstrom (oder eine entsprechende Minimalleistung) erforderlich, um ein detektierbares Impedanzsignal zu erhalten. Deshalb wird in der aktuellen deutschen Testvorschrift [8] nur ein Test bei Nennleistung und irgendwo im unteren und mittleren Drittel der Nenneingangsleistung vorgeschrieben. Wenn jedoch der Inselbetrieb ein gravierendes Sicherheitsproblem darstellt, ist dies auch bei anderen Leistungsbereichen der Fall und er sollte möglichst in allen Leistungsbereichen verhindert werden.
- Kontinuierliche Stromänderungen von Wechselrichtern zur Messung der Netzimpedanz erzeugen zusätzliche Störungen und Spannungsschwankungen auf dem Netz und reduzieren somit die Netzqualität. Um derartige Netzstörungen möglichst gering zu halten und um tatsächlich die Netzimpedanz bei 50Hz zu messen, sollten derartige Stromtestpulse Netzfrequenz aufweisen, wie dies beispielsweise in der externen ENS von UfE realisiert ist.
- An Orten mit schlechten Netzverhältnissen oder häufigen Spannungsschwankungen kann ein stabiler Betrieb eines Wechselrichters mit ENS beeinträchtigt oder sogar unmöglich sein.
- Wird eine grosse Zahl von Wechselrichtern mit ENS am gleichen Netzzweig nahe beieinander betrieben, können sich ihre Testsignale gegenseitig stören, was zumindest sporadisch zu falschen Impedanzmesswerten führt, sodass kein stabiler Betrieb möglich ist.
- In Städten mit sehr grossen Transformatoren können die in einem abgetrennten Teil des Netzes vorhandenen Lastimpedanzen durchaus auch unter $0,5\Omega$ liegen, sodass eine sichere Detektion eines Inselbetriebs nicht möglich wäre. Natürlich wäre dies erst ein Problem, wenn eine sehr grosse Anzahl netzgekoppelter Photovoltaikanlagen in diesem Teil des Netzes vorhanden wäre.

Gespräche mit Praktikern (Installateuren von Photovoltaikanlagen) in der Schweiz, aber manchmal auch in Deutschland haben gezeigt, dass in der Praxis an kritischen Orten die ENS oft ausgeschaltet oder zumindest unempfindlicher gemacht wird, um einen ungestörten Betrieb des Wechselrichters zu erreichen. Die gegenwärtig in Deutschland praktizierte Form der Netzimpedanzüberwachung zur Verhinderung des unbeabsichtigten Inselbetriebs scheint somit noch nicht restlos ausgereift zu sein.

5.3 Inselbildung bei Photovoltaikwechselrichtern im Parallelbetrieb mit Motoren

In den in Japan verwendeten Testschaltungen für Inselbetriebstests sind auch Motoren vorgesehen. Trotz intensiven Bemühungen und Gesprächen mit Vertretern aus Japan an verschiedenen Konferenzen war es nicht möglich, klare Angaben über den in den Tests zu verwendenden Motor zu erhalten. Deshalb wurde beschlossen, im Wintersemester 1998/1999 im Rahmen einer Semesterarbeit eigene Messungen in Schaltungen mit und ohne Motoren durchzuführen.

Verwendete Wechselrichter (alle einphasig, $U_N = 230V$):

- Top Class TC4000/Grid II (4000W), Herkunft: Schweiz
- Modulwechselrichter Solcolino (230W), Herkunft: Schweiz
- 2 Modulwechselrichter OKE4-100 (100W) im Parallelbetrieb, Herkunft: Niederlande

Alle diese Wechselrichter arbeiten nach dem Frequenzschiebepverfahren und versuchen den Selbstlauf durch eine Verschiebung der Frequenz zu erkennen.

5.3.1 Tests mit einphasig angeschlossenen Motoren in einphasiger Testschaltung

Aus Kostengründen mussten zwei im Maschinenlabor nicht mehr benötigte Motoren verwendet werden. Die Motoren wurden bei den Tests im Leerlauf betrieben.

- a) **Universalmotor** (Einphasen-Kollektormotoren) $U_N = 220V$, $P_N = 150W$
- b) **Asynchronmotor mit Phasenkondensator** für Einphasenbetrieb
 $U_N = 220V$, $I_N = 2,5A$, 0,33 PS
(mit angeschlossener Riemenscheibe, welche als kleines Schwungrad wirkt)

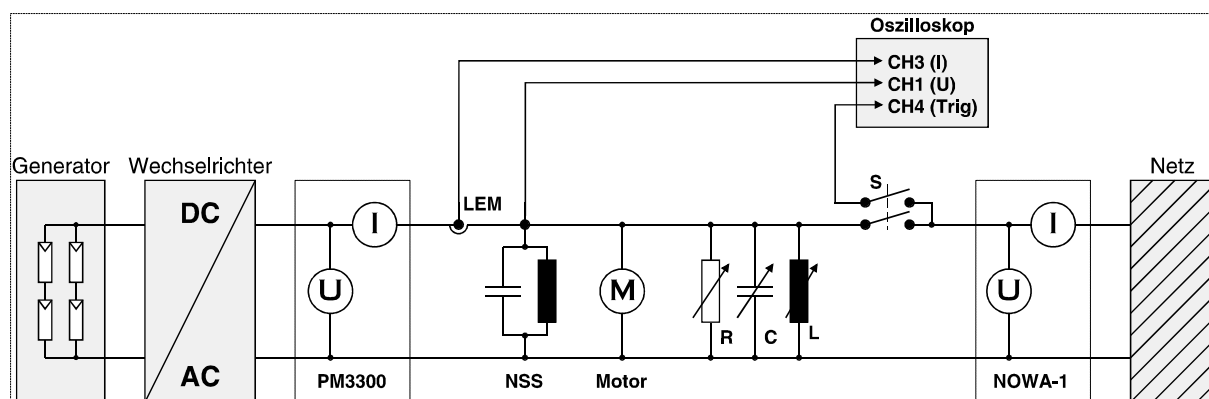


Bild 42:

Verwendete Schaltung für die einphasigen Tests auf Inselbildung mit Wechselrichtern und Motoren [9]. Auf der Wechselrichter- und der Netzseite ist je ein Präzisionswattmeter angeschlossen, welches auch die Messung von Oberschwingungsströmen gestattet. Die Motoren arbeiten im Leerlauf. Vor dem Öffnen des Schalters werden R, L und C so abgeglichen, dass der Strom (resp. P und Q) in der Netzzuleitung minimal ist (angepasste Last).

Ohne angeschlossene Motoren trat beim Betrieb mit genau angepasster Last nur bei den beiden parallel geschalteten Geräten OKE4-100 ein unzulässiger Selbstlauf > 5s auf. Bei nicht angepasster Last wurde kein Selbstlauf beobachtet.



5.3.1.1 Inselbetriebsverhalten mit angeschlossenem Universalmotor

Der Anschluss des Universalmotors hatte nur einen relativ geringen Einfluss auf die Testergebnisse. Universalmotoren, welche in vielen elektrischen Haushaltsgeräten vorkommen (z.B. Bohrmaschinen, Staubsauger, Haartrockner usw.) dürften somit bezüglich Selbstlauf unkritisch sein.

5.3.1.2 Inselbetriebsverhalten mit angeschlossenem Asynchronmotor mit Phasenkondensator

Der Anschluss eines Asynchronmotors mit Phasenkondensator verlängerte dagegen die Zeit bis zur Erkennung des Selbstlaufs bei genau angepasster Last eindeutig. Der Einfluss des Motors ist am stärksten, wenn der Wechselrichter nur gerade die Leerlaufleistung des Motors liefert. Bei Wechselrichterleistungen im Bereich der Motorleistungen traten unzulässig lange Inselbetriebszeiten auf.

Beim Top Class 4000 stieg die Dauer des Inselbetriebs von ca. 2s bei $P_{WR} = 1,18kW$ auf 18s bei $P_{WR} = 119W$, d.h. in diesem Fall ist die zulässige Abschaltzeit von 5s eindeutig überschritten.

Beim Modul-Wechselrichter Solcolino trat bei angepasster Last bei $P_{WR} = 229W$ wiederholt ein dauernder Inselbetrieb auf, der nur durch einen manuellen Eingriff beendet werden konnte. War dagegen die Anpassung nicht exakt (z.B. P und Q in der Netzzuleitung ca. 40W resp. 40Var), trat unter sonst gleichen Bedingungen kein Selbstlauf mehr auf.

Auch bei den beiden OKE4-100 im Parallelbetrieb trat mit Motor bei angepasster Last dauernder Inselbetrieb auf.

Die Versuche im Labor zeigen somit, dass bei genau angepasster Last und bei einphasig angeschlossenen Asynchronmotoren mit Phasenkondensatoren unzulässig lange Inselbetriebszustände möglich sind. Derartige Motoren sind beinahe in jedem Haushalt vorhanden. Die Selbstlauftests sollten deshalb eventuell durch Einschluss eines derartigen Motors verschärft werden. Allerdings ist die erforderliche genaue Erfüllung der Anpassbedingung im Einzelfall ziemlich unwahrscheinlich.

5.3.2 Leistungsübertragung zwischen den Phasen von Asynchronmotoren

Besonders in Deutschland wird befürchtet, dass über angeschlossene dreiphasige Motoren ein Leistungstransfer zwischen den Phasen auftreten kann. Ist dies der Fall, so wird die Erfüllung der Anpassbedingung bei einem Netzausfall wesentlich wahrscheinlicher. Vor dem Test mit einem Wechselrichter wurde untersucht, ob ein derartiger Leistungstransfer überhaupt möglich ist.

Verwendete Motoren:

- Asynchronmotor mit $U_N = 380V$, $I_N = 2,3A$, 1 PS. Die Messungen erfolgten im Leerlauf (Leistungsaufnahme ca. 165W oder ca. 55W pro Phase)
- Asynchronmotor mit $U_N = 380V$, $I_N = 5,2A$, 2,2kW. Die Messungen erfolgten im Leerlauf

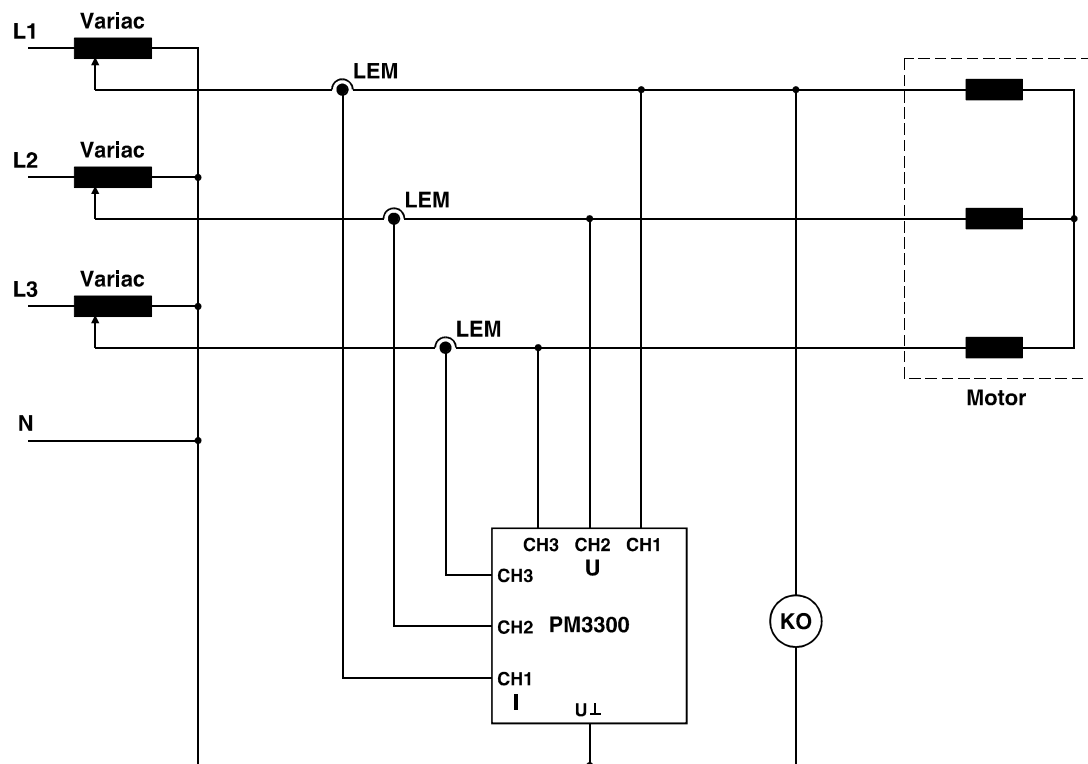


Bild 43:

Für die Untersuchung des Leistungstransfers zwischen den Phasen verwendete Schaltung mit drei Variacs und einem dreiphasigen Präzisions-Wattmeter [9]. Es wurden nicht nur Messungen mit dem Motor in Sternschaltung (wie eingezeichnet), sondern auch in Dreieckschaltung durchgeführt.

Die Messungen zeigten, dass durch Erhöhen der Spannung in einer Phase (wie dies bei Einspeisung von Leistung durch einen Wechselrichter auftritt) tatsächlich Leistung in die anderen Phasen übertragen werden kann, und zwar sowohl bei Sternschaltung als auch bei Dreieckschaltung des Motors. Eine Leistungsübertragung zwischen den Phasen eines Asynchronmotors ist deshalb im Prinzip möglich.

Durch Erhöhen der Spannung um ca. 10% in einer Phase konnte die in die Phase im Leerlauf des Motors eingespeiste Leistung etwa verdreifacht werden. Bei dieser unsymmetrischen Einspeisung treten im Motor natürlich höhere Verluste auf. Ein grosser Teil dieser zusätzlich eingespeisten Leistung wird dabei jedoch in die anderen Phasen übertragen (Verringerung der Leistungsaufnahme oder gar Leistungsabgabe in der entsprechenden Phase). Wird die Spannung entsprechend korrigiert, ist das Verhalten bei Dreieckschaltung und Sternschaltung des Motors gleich.

Da bei der Leistungsübertragung zwischen den Phasen die Ströme im Motor stark unsymmetrisch werden, könnte dieser Fall durch eine geeignete Symmetrieüberwachung des Asynchronmotors, welche auch bereits bei Strömen unterhalb des Nennstromes wirksam ist, ausgeschlossen werden.

5.3.3 Inselbildung bei *einphasigem Phasenunterbruch* bei einem einphasigen Wechselrichter mit dreiphasig angeschlossenen Asynchronmotor

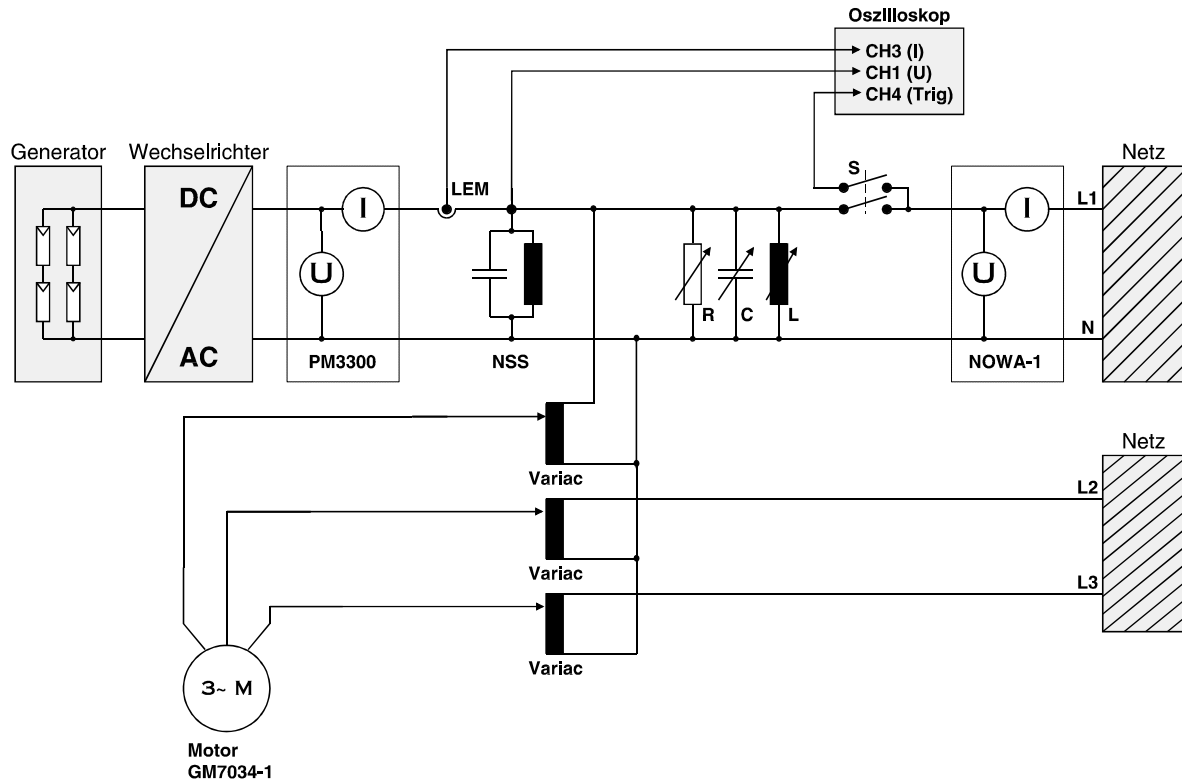


Bild 44:

Verwendete Schaltung für den Test auf Inselbildung mit einem einphasigen Wechselrichter und einem Dreiphasen-Asynchronmotor [9]. Auf der Wechselrichter- und der Netzseite ist je ein Präzisionswattmeter angeschlossen, welches auch die Messung von Oberschwingungsströmen gestattet. Der Motor arbeitet im Leerlauf. In dieser Schaltung ist eine Inselbildung auch bei einer nicht sehr genauen Anpassung der Last möglich.

Wegen der möglichen Leistungsübertragung zwischen den Phasen des Asynchronmotors kann bei einem einphasigen Unterbruch der Phase, in welche die Einspeisung erfolgt, in der Schaltung gemäss Bild 44 eine Inselbildung auftreten, auch wenn keine genaue Anpassung der Last vorhanden ist, d.h. die Inselbildung ist viel wahrscheinlicher. Die Spannung und die Frequenz in der vom Netz getrennten Phase muss dabei bei einer Inselbildung noch innerhalb des Toleranzbandes liegen, denn sonst würde sofort eine Wechselrichter-Abschaltung über das Spannungs- oder Frequenzkriterium erfolgen.

Messungen mit zwei verschiedenen dreiphasigen Motoren von 750W und 2,2kW zeigten, dass in der Schaltung nach Bild 44 tatsächlich nicht nur bei genauer Anpassung der Last, sondern in einem viel weiteren Leistungsbereich ein stabiler Inselbetrieb erfolgt. Mit einem Wechselrichter Top Class 4000 konnten bei verschiedenen Wechselrichterleistungen bis etwa 1,4kW stabile Inselbetriebe mit Fehlanpassungen bis zu 17% der Nennleistung des Asynchronmotors erreicht werden. Das Eintreten dieser relativ largen Abgleichbedingung ist damit in der Praxis viel wahrscheinlicher.



Dies ist möglicherweise der Fall, der einigen Experten in Deutschland so sehr Sorgen macht. Ein Wechselrichter mit Netzimpedanzüberwachung mittels ENS würde diesen Fall sehr wahrscheinlich erkennen und abschalten (aus Zeitgründen nicht untersucht).

Viele Asynchronmotoren können aber bei bestimmten Belastungen noch zweiphasig weiterlaufen. Ist dieser Fall nicht durch entsprechende Schutzmassnahmen am Motor ausgeschlossen, ist bei einem zweiphasigen Weiterlaufen des Motors in der Schaltung gemäss Bild 44 aber selbst bei abgeschaltetem Wechselrichter noch eine Spannung in der vom Netz abgetrennten Phase vorhanden, die immer noch Netzfrequenz, aber eine mehr oder wenig verzerrte Kurvenform und zu geringe Spannung hat. In diesem Fall, also bei ausgeschaltetem Wechselrichter, aber noch auf zwei Phasen laufendem Motor, arbeitet die abgetrennte Phase spannungsmässig ausserhalb des erlaubten Toleranzbandes, was zu Schäden bei eventuell weiteren an der betroffenen Phase angeschlossenen Verbrauchern führen kann.

Eine Netzimpedanzüberwachung mit ENS könnte somit zwar den Wechselrichter abschalten, aber das Auftreten unzulässiger Spannungen in der unterbrochenen Phase nicht verhindern!

Durch eine geeignete Symmetrieüberwachung des Asynchronmotors, welche auch bereits bei Strömen unterhalb des Nennstromes wirksam ist, könnte der mögliche Leistungsbereich für die Erfüllung der Abgleichbedingung wieder verringert werden und damit die Wahrscheinlichkeit einer Inselbildung bei einem einphasigen Unterbruch verkleinert werden.

Der oben beschriebene Fall (nur einphasiger Netzunterbruch) dürfte in der Praxis recht selten sein. Eine vom EVU veranlasste Abschaltung erfolgt bekanntlich immer dreiphasig. Es ist nicht klar, ob der beschriebene Fall häufig genug ist, dass sich spezielle Schutzmassnahmen dagegen aufdrängen. Bevor weitere Arbeiten zur genaueren Untersuchung dieses Problems in Angriff genommen werden, wäre es wichtig, die Ansichten verschiedener EVU's und Sicherheitsexperten zu dieser Problematik zu kennen.

5.4 Selbstlauffests an Systemen mit mehreren Wechselrichtern

In Zusammenarbeit mit der Firma Alpha Real AG wurde bei einer Anlage auf dem Rechenzentrum der UBS in Altstetten eine Testreihe durchgeführt, die zum Ziel hatte, das Selbstlaufverhalten von bis zu 18 parallelen Netzwechselrichtern verschiedener Hersteller im Verbund zu untersuchen. Die Tests wurden mit dem Selbstlauffestgerät der HTA Burgdorf unter angepasster Last durchgeführt. Das heisst, innerhalb des abgetrennten Netzbereichs wurde der Wirk- und Blindleistungsbedarf der Verbraucher von den Wechselrichtern gedeckt. Das Schema der Testschaltung befindet sich in Kapitel 3.1.3.

Die Resultate waren sehr erfreulich. Es konnte kein Selbstlauf festgestellt werden. Die Wechselrichter schalteten immer innerhalb der vorgeschriebenen Zeit ab. Die verwendeten Wechselrichter arbeiteten mit einer Ausnahme (SWR700) alle nach dem Frequenzshift-Verfahren. Die Ausgangsfrequenz eines derartigen Wechselrichters verändert sich bei einem Netzausfall so lange, bis die interne Detektionsschaltung infolge zu grosser Abweichung der Netzfrequenz den Wechselrichter abschaltet.

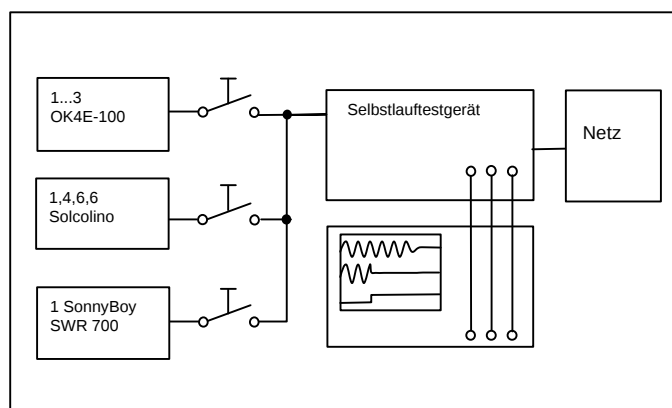


Bild 45:

Testschaltung für Selbstlauffests mit mehreren Netzwechselrichtern. Je nach Anforderung konnte die Anzahl Solcolino-Wechselrichter in den Schritten 1, 4, 6, 6 variiert werden. Die Einstellungen für den Betrieb bei angepasster Last, sowie die Abschaltung des Netzes erfolgen am Selbstlauf-Testgerät.

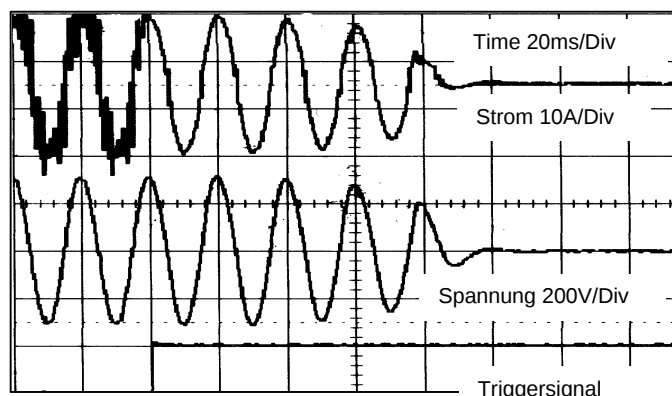


Bild 46:

Abschaltverhalten von 18 parallelen Netzwechselrichtern (17 Solcolino und ein SunnyBoy SWR 700) bei einer AC-Leistung von 2,2 kW und angepasster Last. Nach dem Trennvorgang vom Netz dauert es ca. 100ms, bis die Wechselrichter den Netzausfall detektieren und sich abschalten.

Fazit:

Die Feldversuche haben gezeigt, dass bei Anlagen mit mehreren parallelen Wechselrichtern zumindest bei den verwendeten Geräten die Wahrscheinlichkeit eines Inselbetriebs mit angepasster Last nicht ansteigt. Insbesondere konnte auch keine Spontananpassung durch (zeitlich gestaffeltes) Abschalten nur eines Teils der Wechselrichter und Weiterbetrieb der restlichen Wechselrichter mit einer nur auf einen Teil der Wechselrichter-Gesamtleistung angepassten Last beobachtet werden.



6 Schlussbemerkungen

Das Projekt „Qualitätssicherung von Wechselrichtern“ ist mit dem Vorliegen dieses Berichtes abgeschlossen. Die Untersuchungen an fünf in der Schweiz und zum Teil auch im EU-Raum weit verbreiteten Netzverbundwechselrichtern und die erstmalige Untersuchung von zwei Inselwechselrichtern ergaben wichtige und interessante Ergebnisse.

Wie die Messungen belegen, ist es den Herstellern nicht nur gelungen, die Wechselrichter zuverlässiger zu machen, sondern diese auch gezielt weiter zu entwickeln. Insbesondere beim Wirkungsgrad sind immer noch gewisse Steigerungen erkennbar. Bei erfahrenen Herstellern sind wegen des bereits hohen Entwicklungsstandes die bei neueren Geräten erzielten Fortschritte natürlich nicht mehr so markant wie früher. Andererseits ist auch zu beobachten, dass Hersteller, welche wiederholt technische Probleme mit ihren Geräten hatten, auf dem Markt nicht mehr stark in Erscheinung treten.

Um die Wechselrichtertests immer nach dem neuesten Stand der Technik durchführen zu können und um die dazu erforderlichen Messmöglichkeiten zur Verfügung zu haben, musste die Infrastruktur des Photovoltaiklabors der HTA Burgdorf während des Projektes laufend den sich wandelnden Bedürfnissen angepasst und ausgebaut werden. Wenn der im Bau befindliche Solargenerator-Simulator im Herbst 2000 wie geplant in Betrieb genommen werden kann, wird dieses Labor über eine sehr gute Infrastruktur zum Test von PV-Wechselrichtern verfügen, die eine wesentliche zeitliche Beschleunigung der Tests erlauben sollte.

7 Verdankungen

Wir danken den ehemaligen Assistenten an der HTA Burgdorf, den Herren Ch. Liebi, Ch. Beutler und L. Borgna. Sie waren massgeblich am Auf- und Ausbau der Wechselrichtertestanlage und an einigen in diesem Bericht beschriebenen Tests beteiligt. Weiter danken wir auch den ehemaligen Studenten, welche in Semester- und Diplomarbeiten an der Planung und Erweiterung unserer Messinfrastruktur mitgewirkt oder wichtige Detailprobleme untersucht haben.

Wir danken ferner der Firma ASP, die uns 8 12V/250Ah Akkumulatoren für den Aufbau des Inselwechselrichtermessplatzes spendete. Dank gebührt ausserdem allen Wechselrichterherstellern, die uns ihre Wechselrichter unentgeltlich zu Testzwecken zur Verfügung stellten.

Der Aufbau der Testanlage und die im Laufe dieses und früherer Projekte durchgeführten Wechselrichtertests wurden vom Bundesamt für Energie (BFE) finanziert. Ohne diese sehr umfangreiche Unterstützung wäre die Erstellung der Testanlage nicht möglich gewesen. Die Photovoltaik-Aktivitäten der HTA Burgdorf wurden auch von den Industriellen Betrieben Burgdorf (IBB) und dem Elektrizitätswerk der Stadt Bern (EWB) unterstützt.

All diesen Firmen und Institutionen sei an dieser Stelle für ihre wertvolle Unterstützung herzlich gedankt.



8 Literatur

- [1] H. Häberlin: „Das neue 60kWp-Testzentrum der Ingenieurschule Burgdorf“. SEV-Bulletin 22/94
- [2] H. Häberlin und F. Käser: „Das neue 60kWp-Testzentrum der Ingenieurschule Burgdorf“. Referate des Photovoltaik-Seminars Fribourg, 4./5. April 1995
- [3] H. Häberlin, F. Käser Ch. Liebi und Ch. Beutler: „Resultate von neuen Leistungs- und Zuverlässigkeitstests von Wechselrichtern für Netzverbundanlagen“. 11. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Staffelstein/BRD1996
- [4] H. Häberlin, F. Käser Ch. Liebi und Ch. Beutler: „Resultate von neuen Leistungs- und Zuverlässigkeitstests von Wechselrichtern für Netzverbundanlagen“. SEV-Bulletin 10/96
- [5] H. Häberlin, Ch. Liebi and Ch. Beutler: “Test Results of some new Inverters and latest Reliability Data of the most popular Inverters in Switzerland” Proc. 14th EU PV Conf., Barcelona, 1997
- [6] H. Häberlin und J. Graf: „Islanding of Grid-connected PV Inverters: Test Circuits and some Test Results“. 2nd World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Vienna, Austria, 1998.
- [7] H. Häberlin, J. Graf and Ch. Beutler: „Islanding of Grid-connected PV Inverters: Test Circuits and some Test Results“. IEA-PVPS-Task V: Workshop about Grid-Interconnection of PV Power Systems, Zurich, 1997.
- [8] DIN VDE 126 (April 1999): „Selbstständige Freischaltstelle für Photovoltaikanlagen einer Nennleistung $\leq 4,6\text{kVA}$ und einphasiger Paralleleinspeisung über Wechselrichter in das Netz der öffentlichen Versorgung.“
- [9] B. Müller und A. Steiner: „Inselbildung bei PV-Wechselrichtern in Netzen mit und ohne Motoren“ Wintersemester 1998/1999, Photovoltaiklabor HTA Burgdorf (*Interner Bericht*).
- [10] M. Real, R. Schmid, L. Tanner: „Zuverlässigkeit von Messverfahren zur Erkennung von Inselbildung“. Schlussbericht PSEL-Projekt 129, November 1999.
- [11] „International standard testing procedure – Islanding prevention measures for power conditioners used in grid connected photovoltaic (PV) power generation systems“. IEC-Normentwurf 82/215/NP, September 1998.
- [12] „Utility interactive fail safe protective interface for PV line-commutated converters - Design qualification and type approval“. IEC 82/234/NP, December 1999.
- [13] G.A. Kern, R.H. Bonn, J.Ginn and S. Gonzales: „Results of Sandia National Laboratories Grid-Tied Inverter Testing“. 2nd World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Vienna, Austria, 1998.
- [14] Ch. Liebi, H. Häberlin und Ch. Beutler: „Aufbau einer Testanlage für PV-Wechselrichter bis 60kW“. Schlussbericht DIS 2744, ENET Nr. 9400561, Januar 1997.
- [15] C. Renken H. Häberlin: „Langzeitverhalten von netzgekoppelten Photovoltaikanlagen“ Schlussbericht DIS 19490 / 59074 November 2000.
- [16] P. Haussener, M. Walther: Semesterarbeit „Koppelnetzwerk / Entkoppelnetzwerk (SDN) 150Ω für EMV-Messungen (1000V/100A)“ Sommersemester 1997/1998, Photovoltaiklabor HTA Burgdorf (*Interner Bericht*).
- [17] Schweizerischer Elektrotechnischer Verein: „Provisorische Sicherheitsvorschriften für Wechselrichter für photovoltaische Stromerzeugungsanlagen bis 3,3 kVA einphasig resp. 10 kVA dreiphasig“. 1. Ausgabe, März 1993. Erhältlich beim SEV, Luppmenstr 1, 8320 Fehraltorf.



INHALTSVERZEICHNIS ANHANG

1	NETZVERBUNDWECHSELRICHTER.....	A-2
1.1	EINGANGSKONTROLLE UND BETRIEB BEI LEISTUNGSÜBERANGEBOT	A-4
1.2	EMV-VERHALTEN AUF DER AC-SEITE	A-5
1.3	EMV-VERHALTEN AUF DER DC-SEITE	A-7
1.4	EINSCHALTLEISTUNG.....	A-9
1.5	NENNSPANNUNGSBEREICH	A-10
1.6	OBERSCHWINGUNGSSTRÖME	A-11
1.7	WIRKUNGSGRAD.....	A-13
1.8	MPT-VERHALTEN	A-14
1.9	RUNDSTEUERSIGNAL - EMPFINDLICHKEIT	A-15
1.10	SELBSTLAUFTEST	A-17
2	TESTRESULTATE NETZVERBUNDWECHSELRICHTER.....	A-18
2.1	CONVERT 4000	A-19
2.2	SWR 1500	A-22
2.3	TOP CLASS SPARK.....	A-25
2.4	SOLCOLINO.....	A-28
2.5	OK4E-100	A-31
3	INSELWECHSELRICHTER	A-35
3.1	WIRKUNGSGRAD BEI OHMSCHER LAST	A-35
3.2	WIRKUNGSGRAD MIT OHMSCHER/INDUKTIVER LAST	A-36
3.3	OBERSCHWINGUNGSSPANNUNGEN	A-37
3.4	EMV-VERHALTEN AUF DER AC-SEITE	A-39
3.5	EMV-VERHALTEN AUF DER DC-SEITE	A-40
3.6	ÜBERLASTVERHALTEN.....	A-41
3.7	TRANSIENTES VERHALTEN	A-42
4	TESTRESULTATE INSELWECHSELRICHTER	A-43
4.1	TWIN POWER SI1224.....	A-43
4.2	ASP TOPCLASS 13/24	A-47

1 Netzverbundwechselrichter

Um ein einheitliches Prüfverfahren für alle Netzverbund-Wechselrichter zu gewährleisten, wurden alle an der HTA Burgdorf durchführbaren Messungen in dem untenstehenden Wechselrichter Reporting Format zusammengefasst.

- Eingangskontrolle und Betrieb bei Leistungsüberangebot
- EMV-Verhalten
- Einschaltleistung und Nennspannungsbereich
- Oberschwingungsströme
- Wirkungsgrad
- Maximum Power Tracking Verhalten
- Rundsteuersignal-Empfindlichkeit
- Selbstlauftest

Jeder Wechselrichter wird anhand dieses Reporting Formates getestet. Da für jeden Wechselrichter die gleichen Messungen mit den gleichen Einrichtungen durchgeführt werden, ist der Vergleich verschiedener Wechselrichter ohne Probleme möglich.

Die Reihenfolge der Messungen ist im Normalfall beliebig. Sind aber bei einem Wechselrichter zusätzliche Entstörmassnahmen zur Einhaltung der EMV-Normen notwendig, dürfen weitere Messungen (z.B. Wirkungsgradmessungen) gemäss dem Messablauf in Bild 1 erst **nach Entstörung** des Wechselrichters durchgeführt werden. Diese Massnahme gewährleistet einen fairen Vergleich der verschiedenen Wechselrichter. Die ausführlichen Messaufbauten mit den verwendeten Messgeräten werden in diesem Kapitel erläutert.

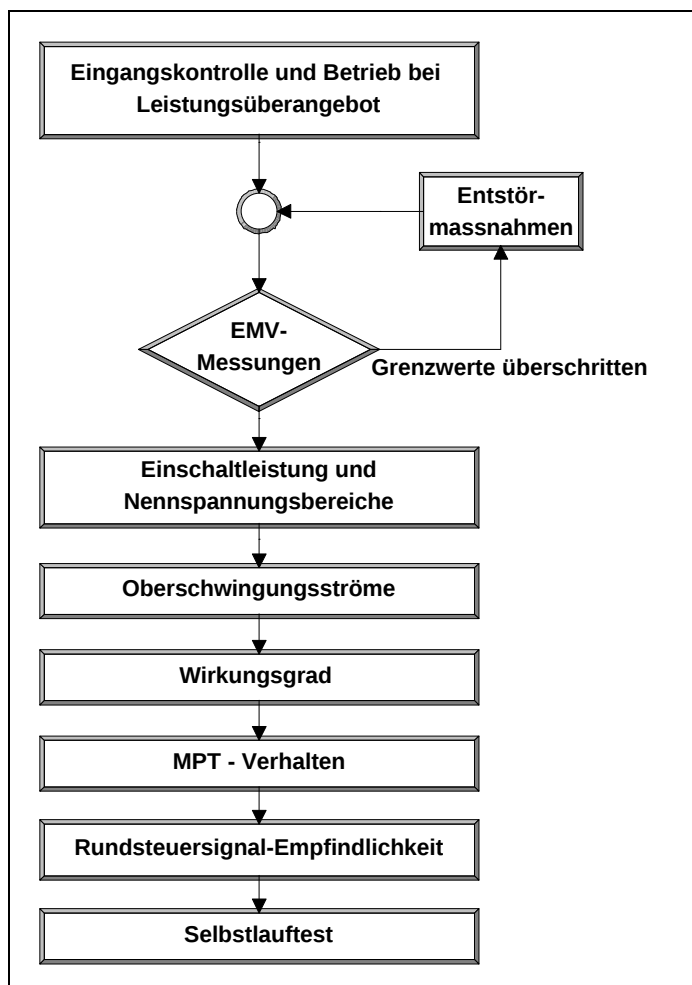


Bild 1:

Ablauf einer kompletten Wechselrichter-messung. Alle Messungen, ausser der Eingangskontrolle und dem Betrieb bei Leistungsüberangebot, dürfen erst nach allfälligen Entstörmassnahmen durchgeführt werden. Dieses Vorgehen gewährleistet einen fairen Vergleich der Wechselrichter untereinander.



Technische Daten:

Hersteller: ?
Nennleistung P_{nac}: ? kW
Max. Eingangsleistung P_{dc}: ? kW
Nennspannung U_{dc}: ? V
Eingangsspannungsbereich: ?...? V
Ausgangsspannungsbereich: ?...? V
Transformator: ?
Einspeisung: ?-phasig
ENS: ?

Eingangskontrolle und Betrieb bei Leistungsüberangebot:

Funktionstest: Dauerbetrieb an Generator mit ? W_p
Leistungsüberangebot: ?

EMV-Verhalten auf der AC-Seite:

P_{ac} = ? kW ☐ ++ ☐ + ☐ 0 ☐ - ☐ --

EMV-Verhalten auf der DC-Seite:

P_{ac} = ? kW ☐ ++ ☐ + ☐ 0 ☐ - ☐ --

Bemerkungen:

Einschaltleistung und Nennspannungsbereiche:

Einschaltleistung: P_{dc} = ? W
Unterspannung: U_{ac} = ? V
Überspannung: U_{ac} = ? V

Oberschwingungsströme:

Verwendete Norm: ☒ EN61000-3-2
1. P_{ac} = ? kW ☐ ++ ☐ + ☐ 0 ☐ - ☐ --
2. P_{ac} = ? kW ☐ ++ ☐ + ☐ 0 ☐ - ☐ --
3. P_{ac} = ? kW ☐ ++ ☐ + ☐ 0 ☐ - ☐ --

Wirkungsgrad:

Wirkungsgrad bei 5% P_{nac}: ? %
10% P_{nac}: ? %
20% P_{nac}: ? %
30% P_{nac}: ? %
50% P_{nac}: ? %
100% P_{nac}: ? %
Europäischer Wirkungsgrad: ? %
Max. Wirkungsgrad % bei % von P_{nac}

MPT-Verhalten:

1. U_{ac} = 220 V P_{ac} = ? kW ☐ ++ ☐ + ☐ 0 ☐ - ☐ --
2. U_{ac} = 230 V P_{ac} = ? kW ☐ ++ ☐ + ☐ 0 ☐ - ☐ --
3. U_{ac} = 240 V P_{ac} = ? kW ☐ ++ ☐ + ☐ 0 ☐ - ☐ --

Selbstlauftest:

- ☐ Test nach Schweizer Vorschrift (inkl. Netzsimulationsschwingkreis)
☐ Test nach BRD-Vorschlag (Messung mit vereinfachter HTA-Testschaltung)

Messungen bei :

1. P_{ac} = ? kW Abschalttdauer = ? s
2. P_{ac} = ? kW Abschalttdauer = ? s
3. P_{ac} = ? kW Abschalttdauer = ? s
4. P_{ac} = ? kW Abschalttdauer = ? s

Testergebnis: ☐ ++ ☐ + ☐ 0 ☐ - ☐ --

Tabelle 1: Wechselrichter Reporting Format (ohne Messdiagramme).

1.1 Eingangskontrolle und Betrieb bei Leistungsüberangebot

1.1.1 Messaufbau

Für diese Messung werden folgende Messgeräte und Betriebsmittel benötigt:

- Power Analyzer PM 3000A oder PM 3300 von Voltech
- Solargenerator-Simulator

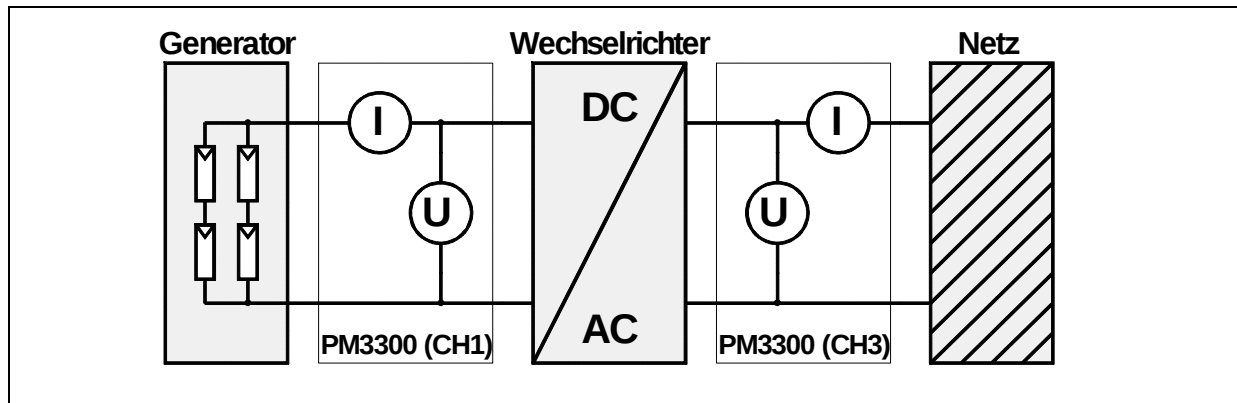


Bild 2: Messaufbau für Eingangskontrolle und Betrieb bei Leistungsüberangebot.

1.1.2 Beschreibung der Messung

In dieser Messung wird die korrekte Funktion des Wechselrichters sowohl bei DC-Nennleistung als auch bei Leistungsüberangebot P_{MPP} von 140% der DC-Nennleistung P_{NDC} kontrolliert. **Der Wechselrichter nimmt bei diesem Test diese angebotene Leistung P_{MPP} natürlich nicht voll auf.** Die maximal zulässige Nennleistung des Solargenerators ist die Summe der Spitzenleistungen aller Module des Solargenerators bei Standard Test Conditions (STC), die an den betroffenen Wechselrichter angeschlossen werden darf. Gemäss dem SEV [17] hat die Messung dabei nach dem in Bild 3 dargestellten Ablauf zu erfolgen.

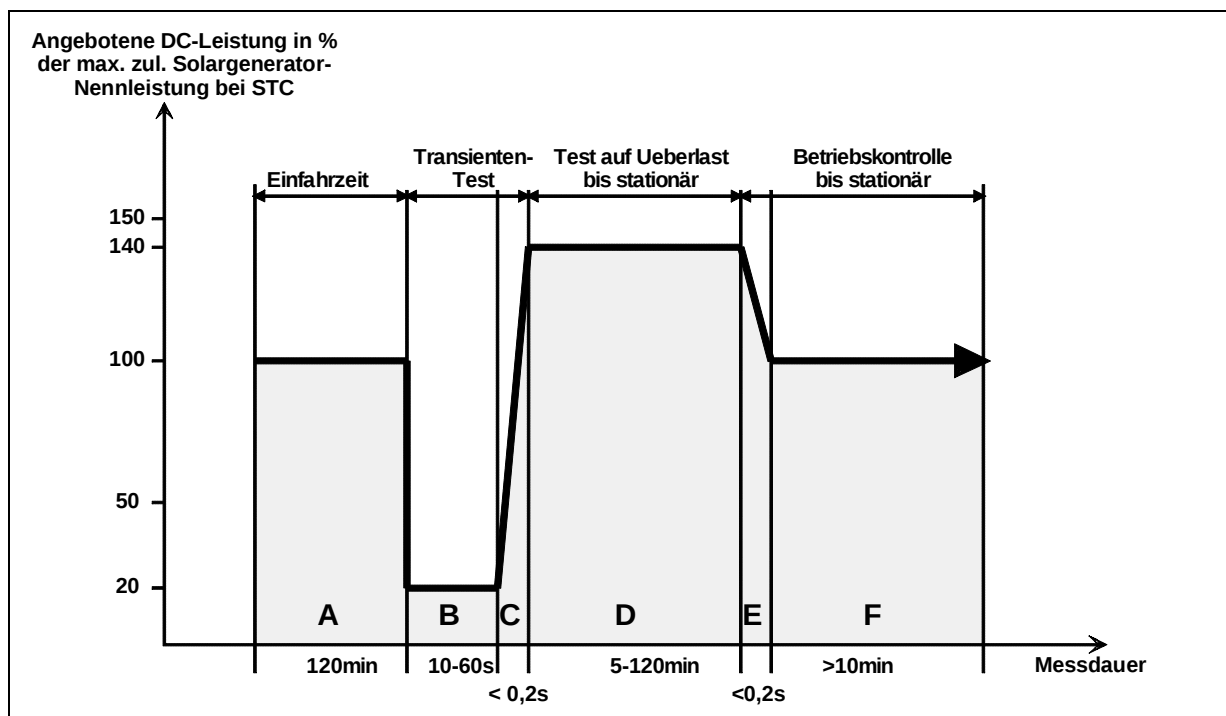


Bild 3: Testablauf für Eingangskontrolle und Betrieb bei DC-seitigem Leistungsüberangebot $P_{MPP} > P_{NDC}$.

1.2 EMV-Verhalten auf der AC-Seite

1.2.1 Messaufbau

Für die EMV-Messungen auf der AC-Seite werden folgende Messgeräte und Betriebsmittel benötigt:

- Spectrum Analyzer Advantest R3261A
- Messempfänger ESH 2 von Rohde & Schwarz
- Netznachbildung ESH2-Z5 von Rohde & Schwarz
- 150Ω (Ent-) Koppelnetzwerk
- Zusatzfilter

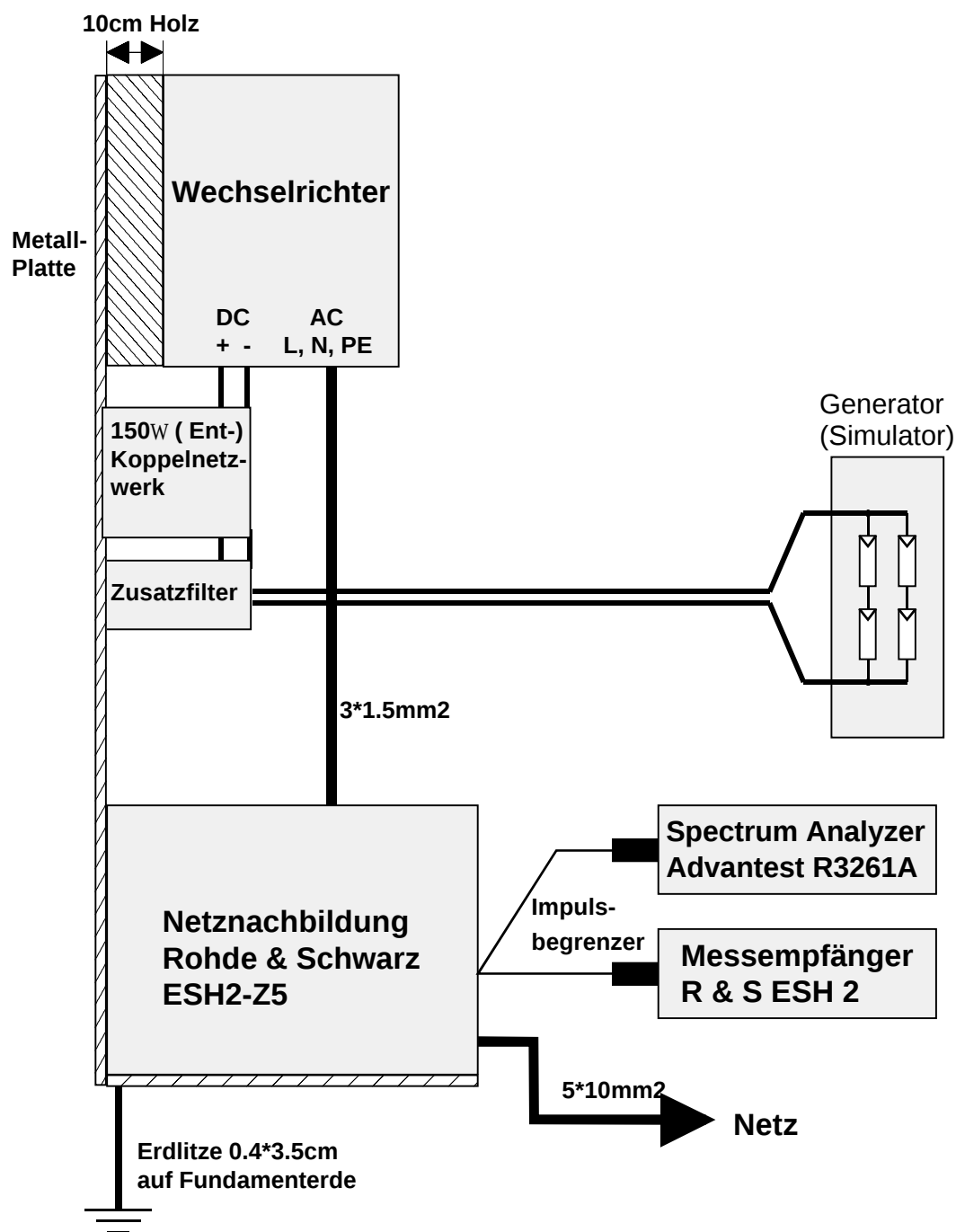


Bild 4: Messaufbau für die EMV-Messungen auf der AC-Seite.

1.2.2 Grenzwerte

Auf den Netzanschlussleitungen dürfen die mit einer 50-Ω-Netznachbildung gemessenen Funkstörspannungen im Bereich 150 kHz - 30 MHz die in Bild 5 angegebenen **Grenzwerte nach EN 55014 resp. EN 50081-1** nicht überschreiten.

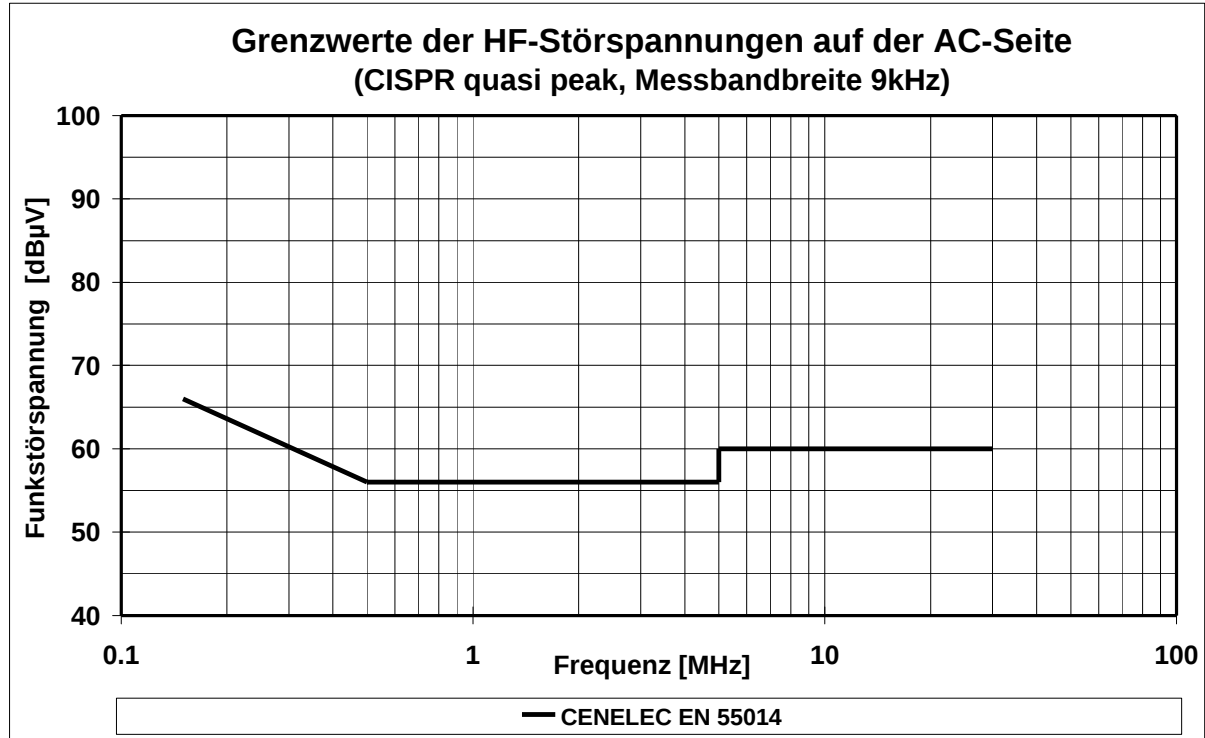


Bild 5: Grenzwerte der HF-Störspannungen auf der AC-Seite gemäss EN 55014 resp. EN 50081-1.

1.2.3 Beschreibung der Messung

Photovoltaik-Wechselrichter enthalten schnelle elektronische Schalter, die zur Erzielung eines hohen Wirkungsgrades mit möglichst steilen Schaltflanken betrieben werden. Steiflankige grosse Ströme und Spannungen haben aber einen hohen Gehalt an hochfrequenten Anteilen, die ohne entsprechende Gegenmassnahmen in der näheren Umgebung den Radioempfang und andere elektronische Geräte stören können. Bei netzgekoppelten Photovoltaikanlagen stellen sowohl die Verkabelung des Solargenerators als auch die Netzanschlussleitungen ausgedehnte strahlungsfähige Gebilde dar, die für diese Störungen als Sendeantenne wirken. Da ihre internen Schaltfrequenzen meist deutlich unter 100 kHz liegen, verursachen Photovoltaik-Wechselrichter im Bereich über 30 MHz in der Regel keine nennenswerten Störungen.

In der Praxis werden die europäische EMV-Norm für Haushaltsgeräte (EN 55014) resp. für Geräte in Wohngebieten (EN50081-1) angewendet.

Die Einhaltung der in dieser Norm enthaltenen Grenzwerte kann bei geringer Distanz (< 10 m) zwischen Störquelle und Störopfer noch nicht jede Störung des Radioempfangs verhindern. Anders als die meisten elektrischen Kleingeräte sind netzgekoppelte Photovoltaikanlagen vom Morgen bis zum Abend ununterbrochen in Betrieb. Für den problemlosen Einsatz in Wohngebieten ist es deshalb sinnvoll, noch etwas tiefere Grenzwerte anzustreben.

Ausreichende Dämpfung der emittierten hochfrequenten Störspannungen ist auch ein sehr taugliches Mittel, um die Immunität der Wechselrichter gegen transiente Überspannungen und damit die Zuverlässigkeit der Geräte zu erhöhen.

1.3 EMV-Verhalten auf der DC-Seite

1.3.1 Messaufbau

Für die EMV-Messungen auf der DC-Seite werden folgende Messgeräte und Betriebsmittel benötigt:

- Spectrum Analyzer Advantest R3261A
- Messempfänger ESH 2 von Rohde & Schwarz
- Netznachbildung ESH2-Z5 von Rohde & Schwarz
- 1500V / 30dB - Tastkopf ESH2-Z3 von Rohde & Schwarz
- 150Ω (Ent-) Koppelnetzwerk
- Zusatzfilter

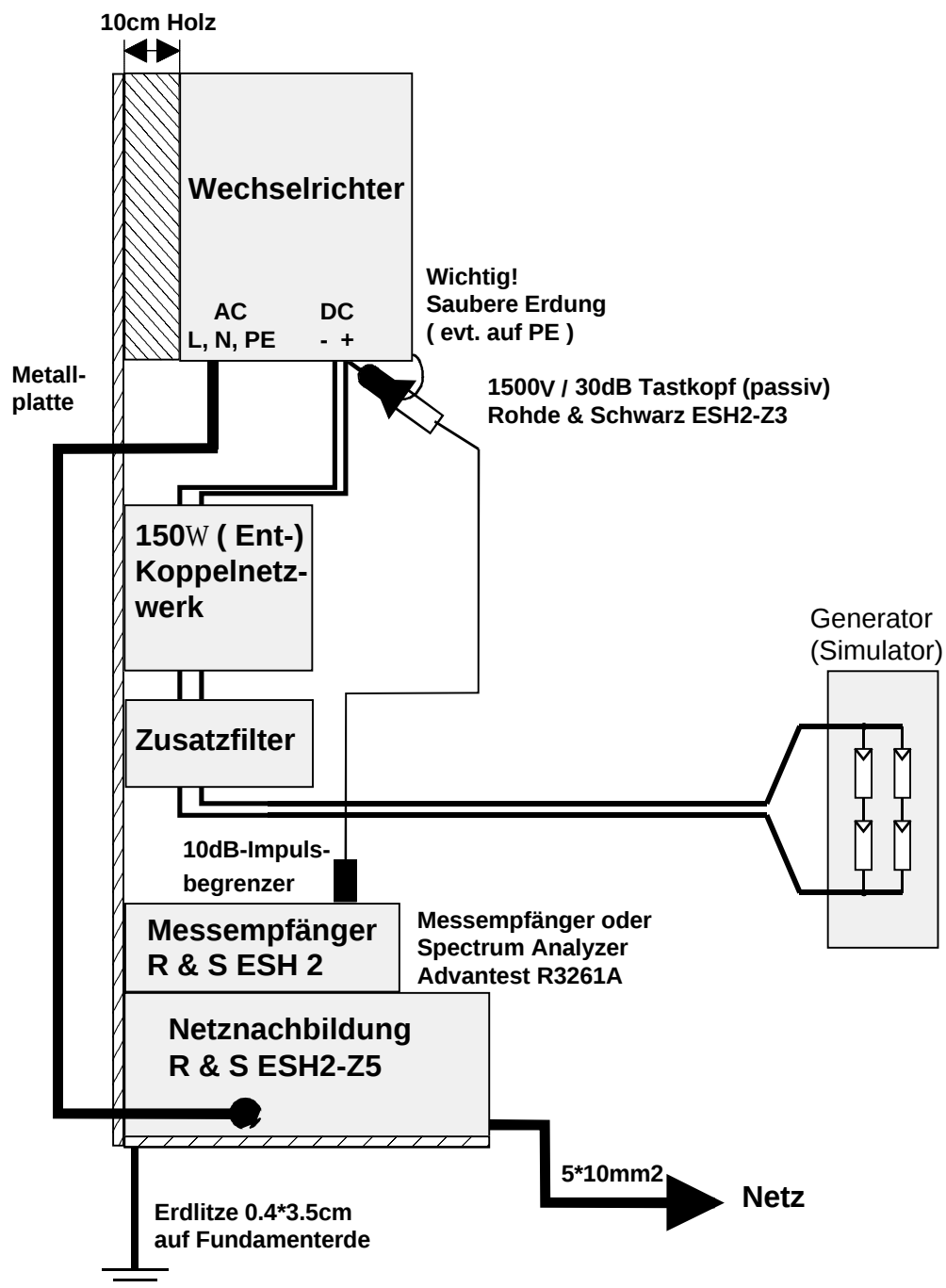


Bild 6: Messaufbau für die EMV-Messungen auf der DC-Seite.

1.3.2 Grenzwerte

Für die übrigen Leitungen (DC-Anschlüsse) dürfen die mit einer hochohmigen Sonde von mindestens 1500Ω gemessenen HF-Störspannungen die in Bild 7 angegebenen Grenzwerte nach **EN 55014** nicht überschreiten.

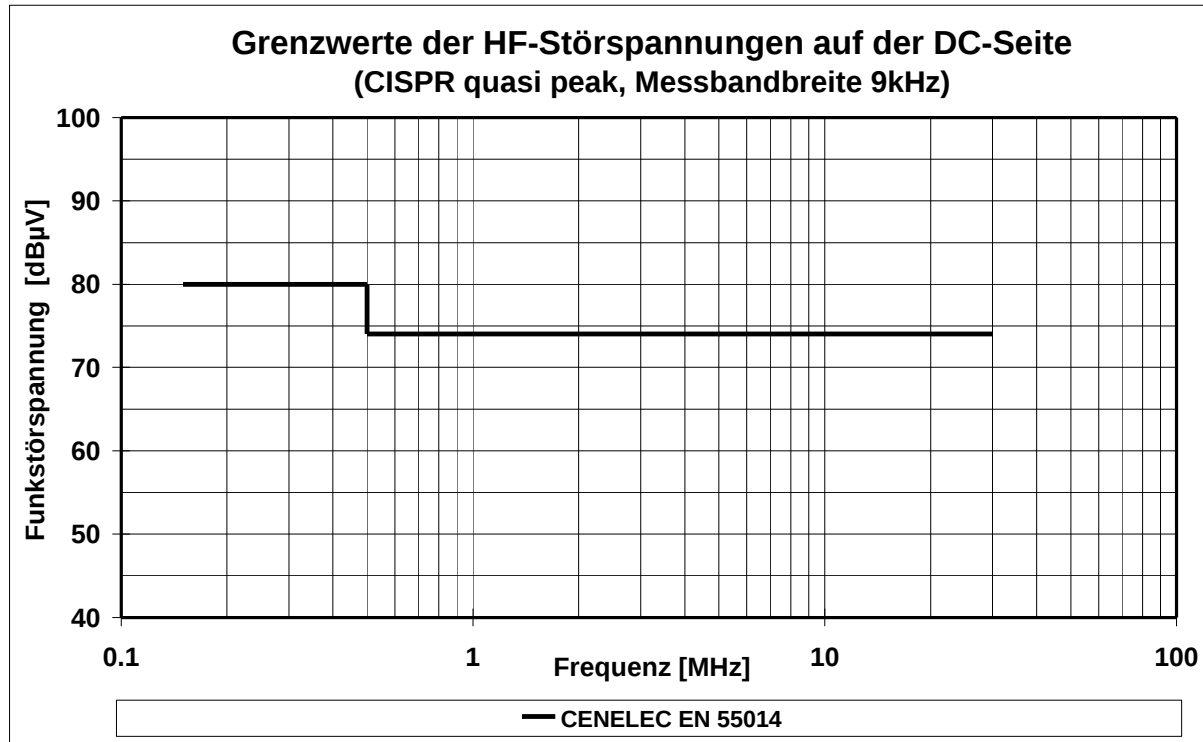


Bild 7: Grenzwerte der HF-Störspannungen auf der DC-Seite gemäss EN 55014 *)

1.3.3 Beschreibung der Messung

Die HF-Störspannungen werden mit einer 1500Ω - Sonde gemessen. Bei dieser Messung ist an den DC-Leitungen keine Netznachbildung vorgeschrieben. Damit hat man bei Photovoltaik-Wechselrichtern möglicherweise Probleme mit der Reproduzierbarkeit der Messungen.

Für realistische EMV-Messungen sollten immer typische Verhältnisse angestrebt werden. Der Photovoltaik-Wechselrichter sollte also von einem Solargenerator (oder Solargenerator-Simulator) gespeist werden. Es ist anzunehmen, dass die ziemlich ausgedehnte gleichstromseitige Verkabelung eines Solargenerators die auf der Gleichstromseite gemessenen Funkstörspannungen in einem gewissen Ausmass beeinflusst, was die Vergleichbarkeit von Messresultaten von verschiedenen Prüfstellen möglicherweise erschwert.

Die Grenzwerte nach Bild 7 sind für relativ kurze Lastanschlussleitungen von höchstens einigen Metern ausgelegt. Die gleichstromseitige Verkabelung von Solaranlagen ist aber recht ausgedehnt. Ihre Ausdehnung kann im Kurzwellenbereich durchaus in den Bereich von Viertel- und Halbwellenstrahlern kommen. Damit kann in ungünstigen Situationen eine Solargeneratorverkabelung relativ gute Strahlungseigenschaften aufweisen, so dass in gewissen Fällen die Einhaltung der Grenzwerte von Bild 7 nicht genügt.

*) Im Rahmen des EU-Projektes PV-EMI (JOR3 CT980217, Partner: HTA Burgdorf, FhG/ISE (BRD), KEMA (NL)) wurden ausgedehnte Messungen der von realen PV-Anlagen im Betrieb emittierten Störfelder durchgeführt.

Auf Grund dieser Messungen empfiehlt die Projektgruppe für Frequenzen > 500 kHz an DC-Netznachbildungen von 150Ω bis 250Ω einen um 10 dBµV tieferen Grenzwert von 64 dBµV quasi-peak.

1.4 Einschaltleistung

1.4.1 Messaufbau

Für die Messung der Einschaltleistung werden folgende Messgeräte und Betriebsmittel benötigt:

- Power Analyzer PM 3000A oder PM 3300 von Voltech
- Solargenerator-Simulator

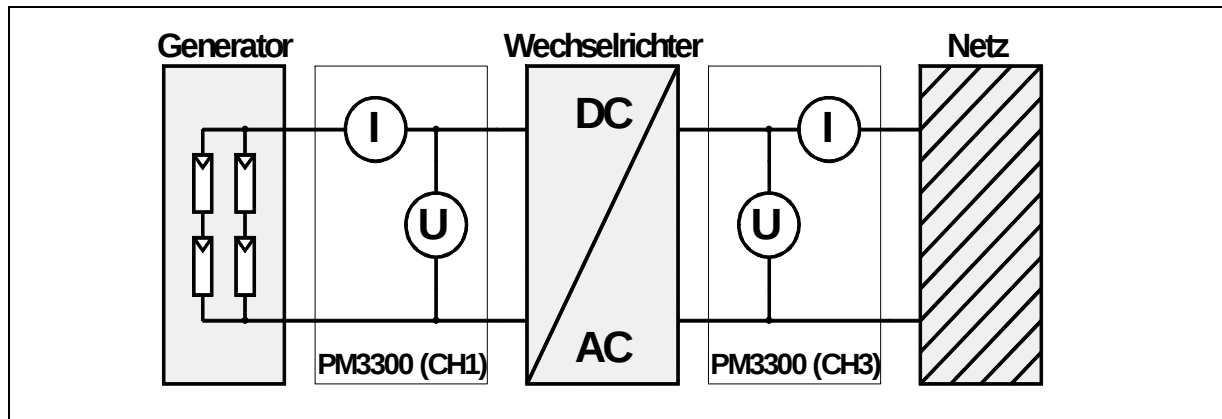


Bild 8: Messaufbau für die Messung der Einschaltleistung.

1.4.2 Beschreibung der Messung

Bei dieser Messung wird die DC-Einschaltleistung gemessen. Die DC-Einschaltleistung ist die minimale Leistung, welche der Solargenerator liefern muss, damit sich der Wechselrichter stationär einschaltet. In diesem eingeschalteten Zustand kann aber die eingespeiste AC-Leistung immer noch praktisch null sein.

1.5 Nennspannungsbereich

1.5.1 Messaufbau

Für die Messung des AC- und DC-seitigen Nennspannungsbereichs werden folgende Messgeräte und Betriebsmittel verwendet:

- Power Analyzer PM 3000A oder PM 3300 von Voltech
- Variac 230V / 0 - 250V
- Solargenerator-Simulator

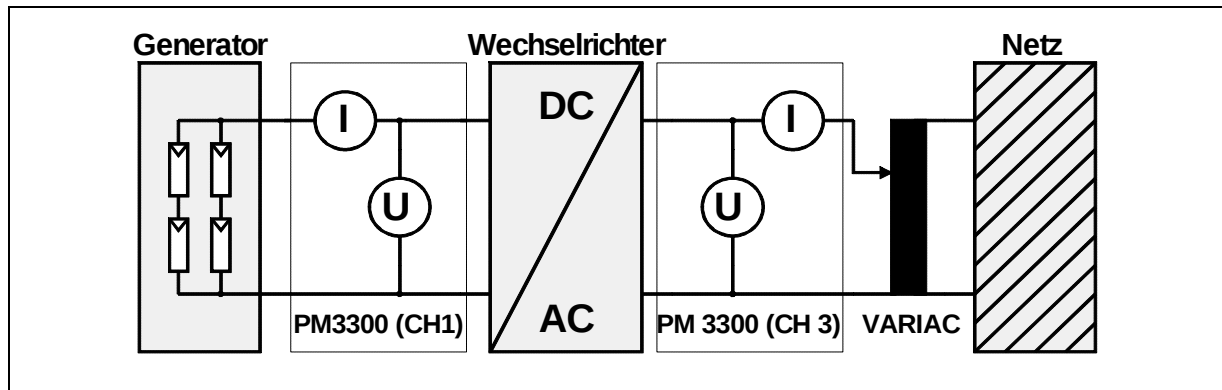


Bild 9: Messaufbau für die Messung der Über- / Unterspannung.

1.5.2 Grenzwerte

DC-Seite : DC-Spannungsbereich gemäss Angaben des Wechselrichter-Herstellers

AC-Seite : Nennspannungsbereich 230V / 400V +10%, -15%

1.5.3 Beschreibung der Messung

Der AC-seitige Nennspannungsbereich ist nach [17] der Bereich, in dem die Netzspannung an den Anschlussklemmen des Gerätes variieren kann, ohne dass die Funktion des Wechselrichters beeinträchtigt wird.

(Anzustrebender Bereich : 230V -15% ... 230V +10%, bzw. 400V -15% ... 400V +10%)

Die DC-seitige Nennspannung ist nach [17] die vom Hersteller vorgesehene mittlere Ausgangsspannung des am Wechselrichter angeschlossenen Solargenerators, wenn dieser im Punkt maximaler Leistung (MPP) betrieben wird. Da diese Spannung mit der Temperatur relativ stark variiert, ist es zweckmässiger, einen Nennspannungsbereich anzugeben.

1.6 Oberschwingungsströme

1.6.1 Messaufbau

Für die Messung der Oberschwingungsströme werden folgende Messgeräte und Betriebsmittel verwendet:

- Power Analyzer PM 3000A oder PM 3300 von Voltech
- PC mit GPIB-Schnittstellenkarte und Messsoftware
- Solargenerator-Simulator

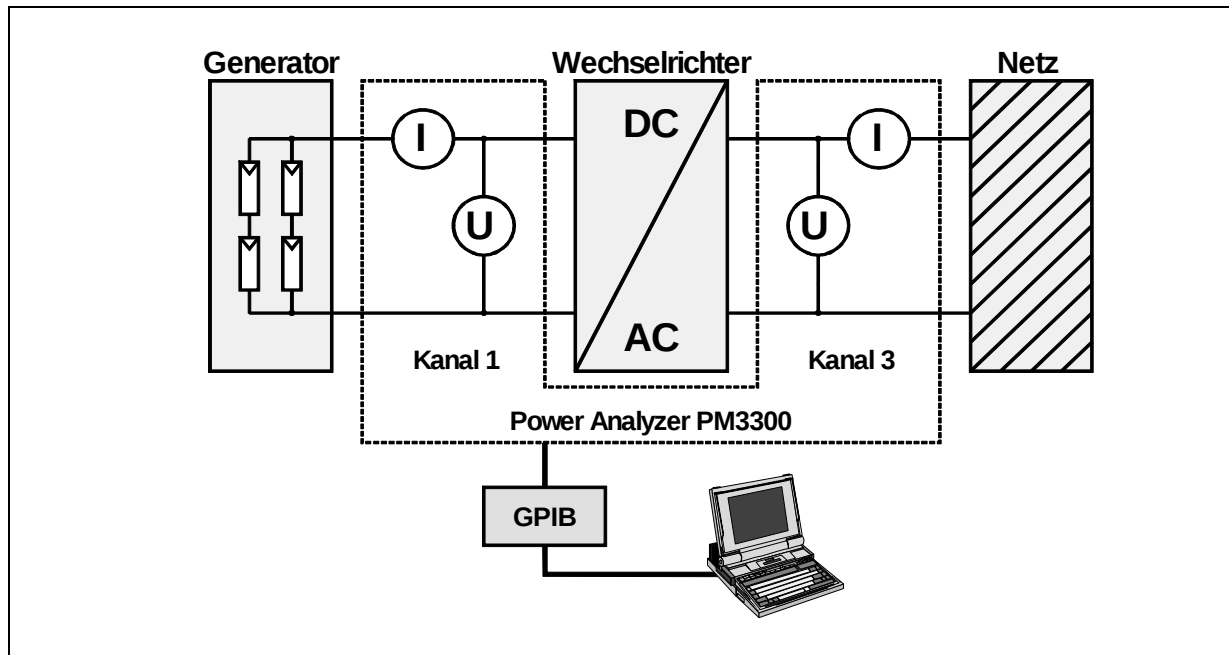


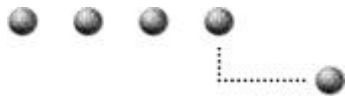
Bild 10: Messaufbau für die Messung der Oberschwingungsströme.

1.6.2 Grenzwerte

Für Wechselrichter mit Strömen bis 16 A sind die Grenzwerte nach EN 61000-3-2 (Tabelle 2) einzuhalten.

Ordnungszahl n	maximal zulässiger Oberschwingungsstrom (in Ampère)
ungeradzahlige Oberschwingungen	
3	2,30
5	1,14
7	0,77
9	0,40
11	0,33
13	0,21
$15 \leq n \leq 40$	$0,15 \cdot 15 / n$
geradzahlige Oberschwingungen	
2	1,08
4	0,43
6	0,30
$8 \leq n \leq 40$	$0,23 \cdot 8 / n$

Tabelle 2: Grenzwerte für Oberschwingungsströme nach EN 61000-3-2



Für Wechselrichter mit Strömen über 16 A (dreiphasige Wechselrichter) wird die Norm **IEC 1000-3-4** für Stromharmonische angewendet. Ist die Kurzschlussleistung S_{KV} am Verknüpfungspunkt mindestens 33mal grösser als die Nennscheinleistung S_{WR} des Wechselrichters, sind die Grenzwerte **'limits stage 1'** in Tabelle 3 zu verwenden.

Ordnungszahl n	max. zulässiger Oberschwingungsstrom I_n / I_1 (%)	Ordnungszahl n	max. zulässiger Oberschwingungsstrom I_n / I_1 (%)
3	21,6	21	$\leq 0,6$
5	10,7	23	0,9
7	7,2	25	0,8
9	3,8	27	$\leq 0,6$
11	3,1	29	0,7
13	2	31	0,7
15	0,7	≥ 33	$\leq 0,6$
17	1,2	Geradzahlige	$\leq 8/n$ oder $\leq 0,6$
19	1,1		

Tabelle 3: Grenzwerte für Oberschwingungsströme nach IEC 1000-3-4, Stage 1.

Liegt jedoch die Kurzschlussleistung S_{KV} am Verknüpfungspunkt mindestens 120mal höher als die Nennscheinleistung des dreiphasigen Wechselrichters, sind höhere Grenzwerte **'limits stage 2'** aus Tabelle 4 anwendbar.

S_{KV} / S_{WR}	Grenzwert für Klirrfaktor (%)		max. zulässiger Oberschwingungsstrom I_n / I_1 (%)			
	THD	PWHD	I_5	I_7	I_{11}	I_{13}
120	18	29	15	12	12	8
175	25	33	20	14	12	8
250	35	39	30	18	13	8
350	48	46	40	25	15	10
450	58	51	50	35	20	15
> 600	70	57	60	40	25	18

Tabelle 4: Grenzwerte für Oberschwingungsströme nach IEC 1000-3-4, Stage 2. Die geradzahligten Harmonischen dürfen $16 / n$ % nicht überschreiten.

Dabei gilt :

THD (Total Harmonic Distortion) :

$$THD = \sqrt{\sum_{n=2}^{40} \left(\frac{I_n}{I_1} \right)^2}$$

PWHD (Partial Weighted Harmonic Distortion):

$$PWHD = \sqrt{\sum_{n=14}^{40} n \left(\frac{I_n}{I_1} \right)^2}$$

I_1 = Effektivwert des Grundschwingungsstroms

I_n = Effektivwert der n-ten Harmonischen

n = Ordnungszahl der Harmonischen

1.6.3 Beschreibung der Messung

Wenn ein Photovoltaik-Wechselrichter im stationären Betrieb bei allen Leistungen höchstens die in den Tabellen 2-4 angegebenen Oberschwingungsströme ins Netz einspeist, kann er überall problemlos und ohne spezielle Kontrollmessungen angeschlossen werden.

Die Messung der Oberschwingungsströme erfolgt innerhalb der Messprozedur für die Wirkungsgradmessung. In gewissen Leistungsstufen (z.B. alle 500W) wird eine Messung der Harmonischen (bis zur 25. Harmonischen) ausgelöst.

1.7 Wirkungsgrad

1.7.1 Messaufbau

Für die Wirkungsgradmessung werden folgende Messgeräte und Betriebsmittel verwendet:

- Power Analyzer PM 3000A oder PM 3300 von Voltech
- PC mit GPIB-Schnittstellenkarte und Messsoftware
- Solargenerator-Simulator

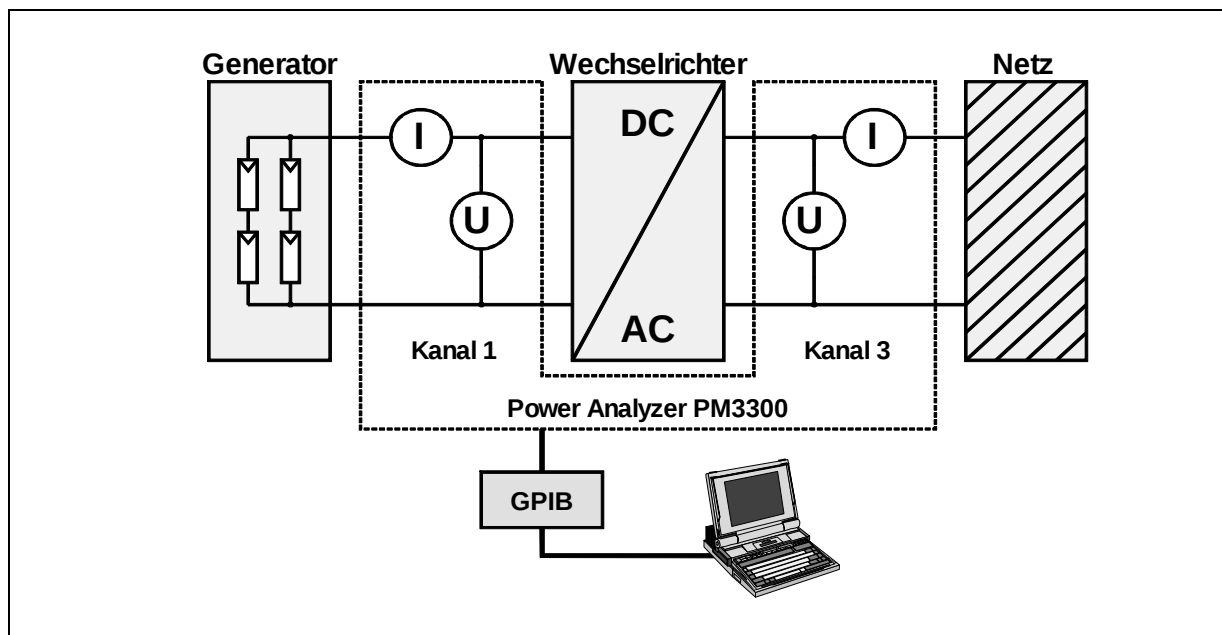


Bild 11: Messaufbau für die Wirkungsgradmessung.

1.7.2 Europäischer Wirkungsgrad

Der **Europäische Wirkungsgrad** ist ein Durchschnittswert, der zur näherungsweisen Berechnung des Energietrags bei mitteleuropäischen Strahlungsverhältnissen verwendet werden kann. Er wird nach der folgenden Formel berechnet (Indexwert = Prozent der Nennleistung) :

$$h = 0.03 h_5 + 0.06 h_{10} + 0.13 h_{20} + 0.1 h_{30} + 0.48 h_{50} + 0.2 h_{100}$$

1.7.3 Beschreibung der Messung

Um MPP-Tracking-Einflüsse auf die Wirkungsgradmessung auszuschliessen, werden die Messungen nach einem bestimmten Algorithmus durchgeführt.

In einem Messintervall von ca. 1,5 Sekunden werden die AC- und die DC-Leistung simultan gemessen und daraus der Wirkungsgrad berechnet. Innerhalb eines Zeitfensters von 30 Sekunden müssen dabei mindestens 12 Wirkungsgradpunkte vorkommen, bei welchen die DC-Leistung um weniger als 10 % geschwankt hat. Ist die Bedingung erfüllt, wird der Mittelwert dieser Messwerte abgespeichert, andernfalls werden die Messwerte verworfen.

Um die Wirkungsgradkurve zu erhalten, wird der Leistungsbereich des Wechselrichters in Leistungsschritte (z.B. 10W) eingeteilt. Jeder der abgespeicherten Mittelwerte wird dabei in eine Leistungsklasse eingeteilt. Bestehen mehrere Mittelwerte für die gleiche Leistungsklasse, so wird aus den Mittelwerten wieder ein Mittelwert gebildet. Je länger bei diesem Verfahren eine Messung dauert, desto stärker "reift" die Wirkungsgradkurve, d.h. umso weniger streuen die Messwerte.

Am besten gelingen Wirkungsgradkurven mit dem Solargenerator-Simulator. Damit können wiederholt Einstrahlungs-Tagesprofile durchfahren werden und die Wirkungsgradkurve erhält ein hohes Mass an Reife.

1.8 MPT-Verhalten

1.8.1 Messaufbau

Für die Untersuchung des statischen MPT-Verhaltens werden folgende Messgeräte und Betriebsmittel verwendet:

- Power Analyzer PM 3000A oder PM 3300 von Voltech
- Solargenerator-Kennlinienmessgerät (Eigenentwicklung der HTA Burgdorf)
- Solargenerator-Simulator
- 2poliger Umschalter

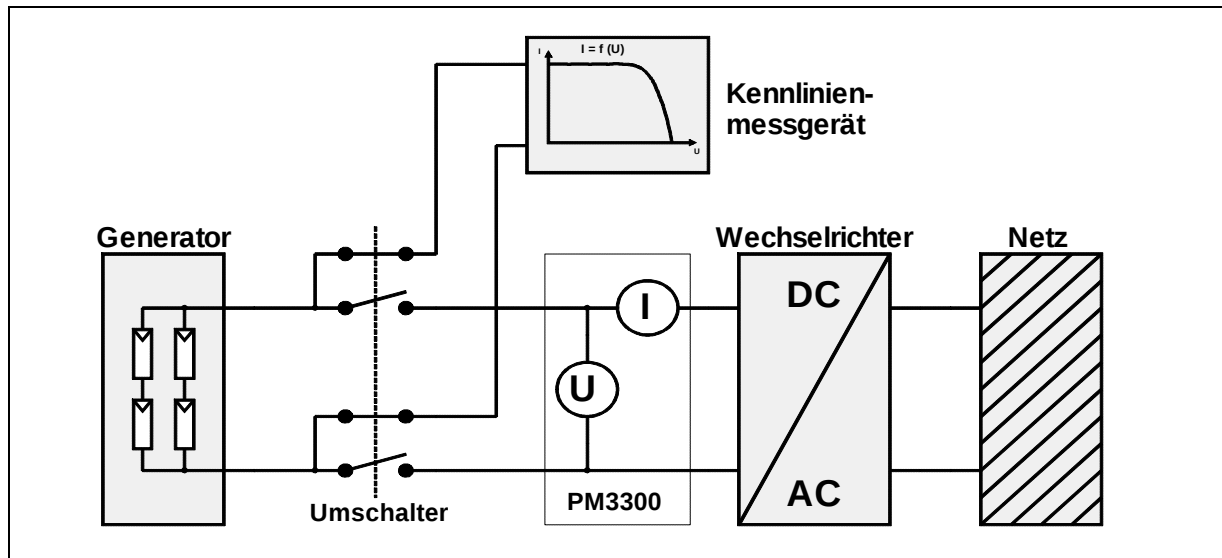


Bild 12: Messaufbau für die Untersuchung des statischen Maximum Power Tracking (MPT).

1.8.2 Beschreibung der Messung

- Durch Messung der maximalen Leistung P_{MPP} des Generators mit dem Solargenerator-Kennlinienmessgerät und anschliessender Messung der DC-Leistung P_{WR} , die der Wechselrichter dem Generator entnimmt, kann der **statische MPT-Wirkungsgrad** nach untenstehender Formel berechnet werden.

$$h_{MPT} = \frac{\int_{t_0}^{t_0+t_M} p_{WR}(t) dt}{P_{MPP} \cdot t_M} \quad t_M: \text{Dauer der Messung}$$

- Eine etwas gröbere Analyse kann durch die **visuelle Beurteilung des MPT-Verhaltens** durchgeführt werden. Mit Hilfe der Volt- und Ampèremeter des Solargeneratorsimulators, kann das Trackingverhalten beobachtet werden. Dabei können vor allem Aussagen über **Trackinggeschwindigkeit**, **Aufstartverhalten** des Wechselrichters, über das Tracking bei **erschweren Bedingungen** und über die **Leistungsbegrenzung** gemacht werden.

Weil während des Projektes keine geeigneten Simulatoren zur Verfügung standen, wurde dieser Test nicht durchgeführt. Zuverlässige Resultate sind erst mit dem neuen Simulator, der gegenwärtig im Bau ist, möglich (Inbetriebnahme ca. Oktober 2000).

1.9 Rundsteuersignal - Empfindlichkeit

1.9.1 Messaufbau

Für die Messung der Rundsteuersignal-Empfindlichkeit werden folgende Messgeräte und Betriebsmittel verwendet:

- Rundsteuersignal-Simulator (Eigenentwicklung der HTA Burgdorf)
- Netzbereichsleistungsanalysator NOWA-1 von Wandel & Goltermann
- Variac 230V / 0..250V
- Voltmeter
- Solargenerator - Simulator

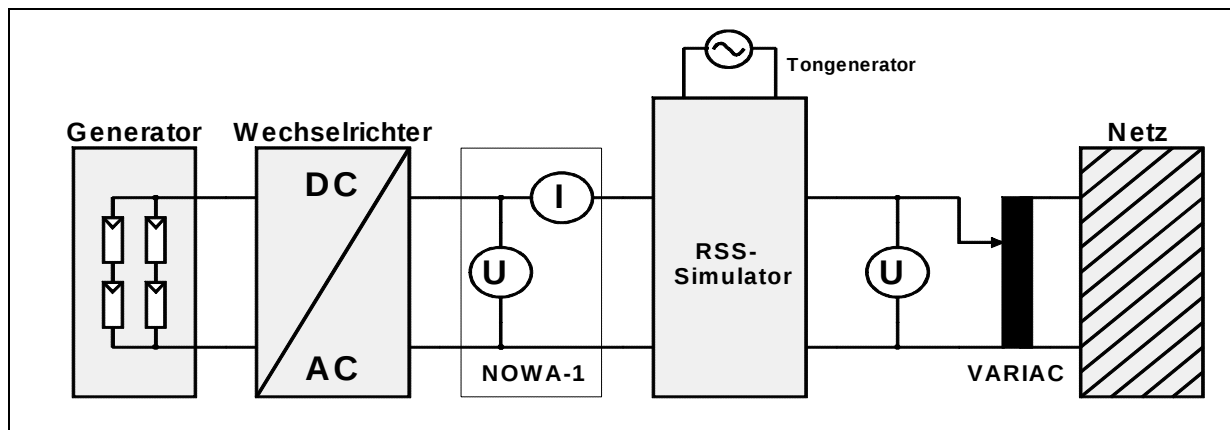


Bild 13: Messaufbau für die Messung der Rundsteuersignal-Empfindlichkeit.

1.9.2 Grenzwerte

In Bild 14 sind die in einem Niederspannungsnetz maximal zu erwartenden Rundsteuersignalpegel (Effektivwerte) angegeben.

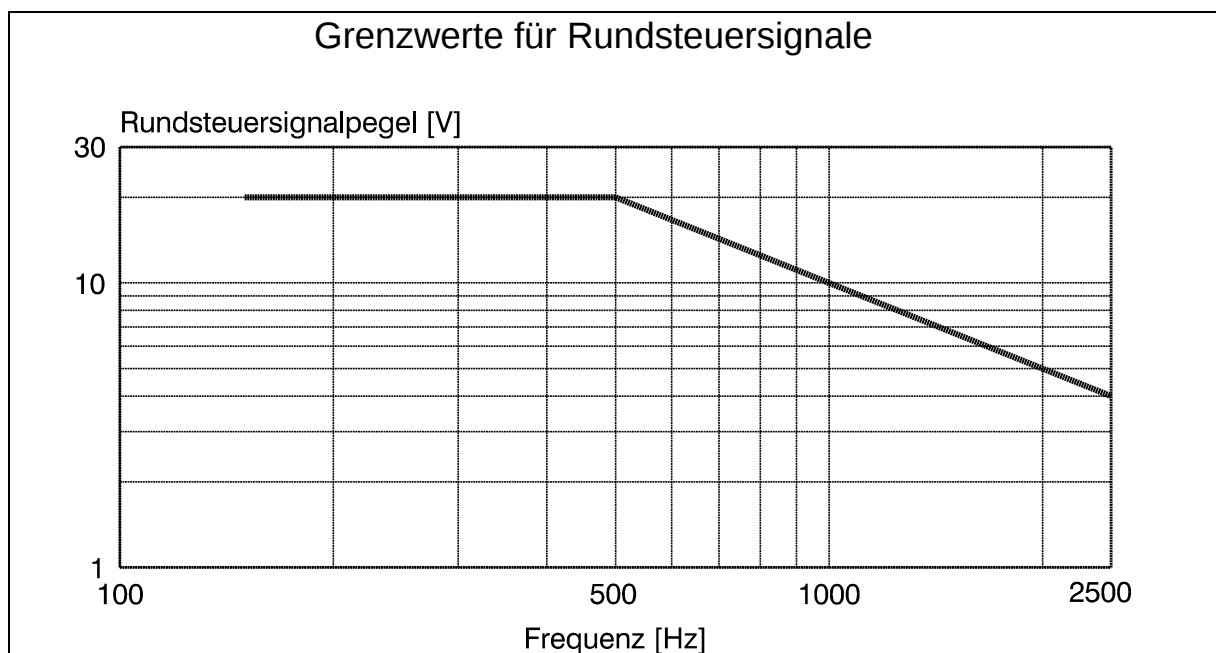
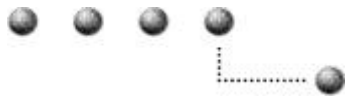


Bild 14: Maximal zu erwartende Rundsteuersignalpegel (nach SEV 3600-1).



1.9.3 Beschreibung der Messung

Die Wechselrichter werden mit dem Rundsteuersignal-Simulator mit simulierten Rundsteuersignalen bei folgenden Frequenzen getestet :

f_{RSS} [Hz]	f_{RSS} [Hz]	f_{RSS} [Hz]	f_{RSS} [Hz]
220	717	1217	1717
317	817	1317	1817
417	917	1417	1917
517	1017	1517	2017
617	1117	1617	

Tabelle 5: Messfrequenzen für Rundsteuersignal-Empfindlichkeit.

Für jeden Wechselrichter werden drei Messreihen bei unterschiedlichen Netzsspannungen (z.B. 220V, 230V und 240V) durchgeführt.

Wechselrichter sollten die Rundsteuersignal-Pegel gemäss Bild 14 ohne gravierende Ausfälle aushalten. Es ist höchstens ein kurzer Betriebsunterbruch mit automatischem Neustart zulässig, jedoch kein Unterbruch mit Hardwaredefekt oder notwendigem manuellem Neustart.

1.10 Selbstlaufftest

1.10.1 Messaufbau

Für den Selbstlaufftest werden folgende Messgeräte und Betriebsmittel verwendet :

- Selbstlaufftestgerät (Eigenentwicklung HTA Burgdorf)
- Netzsimulationsschwingkreis (Eigenentwicklung HTA Burgdorf)
- Power Analyzer PM 3300 oder PM3000A von Voltech
- Oberschwingungsanalysator NOWA-1 von Wandel & Goltermann
- Oszilloskop

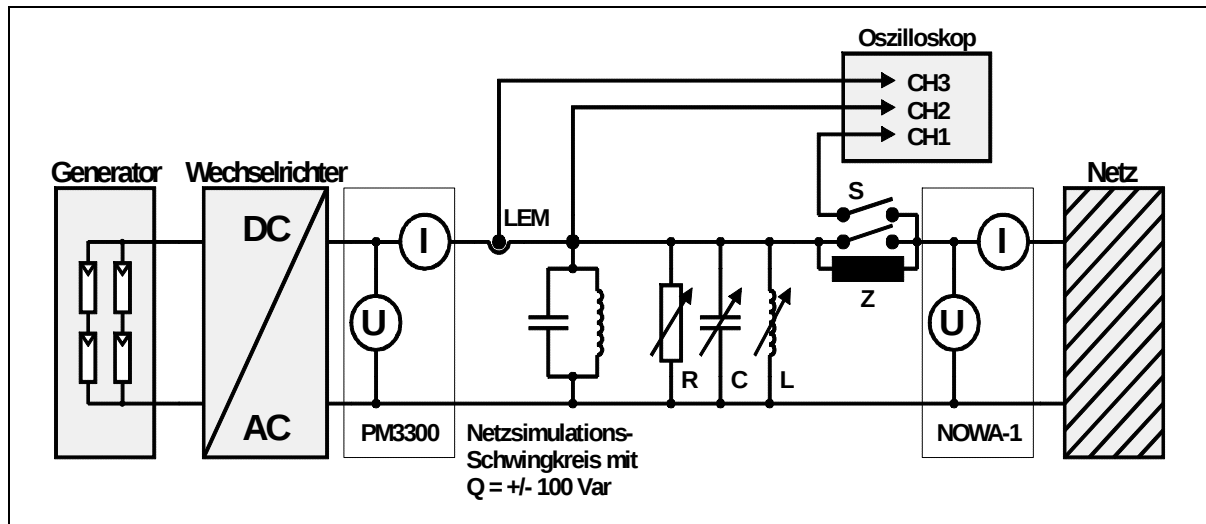


Bild 15: Messaufbau für den Selbstlaufftest.

1.10.2 Beschreibung der Messung

Die Elemente R, C und L werden so abgeglichen, dass die mit dem NOWA-1 gemessenen 50Hz-Leistungen P und Q minimal sind, danach wird der Schalter S geöffnet. CH1 dient zur Feststellung des Schaltzeitpunktes. Nach **fünf Sekunden** muss der Wechselrichterstrom (CH3) jeweils 0 sein.

- **Test nach Schweizer Vorschrift**

Für den Test nach aktueller Schweizer Vorschrift wird $Z = \infty$ gesetzt. Der Netzsimulationsschwingkreis gehört grundsätzlich nicht dazu, kann aber zur Erschwerung des Testes beibehalten werden.

- **Test nach BRD-Vorschlag**

Für die Durchführung des Selbstlaufftests wird in Deutschland neuerdings die Überwachung der Netzimpedanz und eine relativ komplizierte Testschaltung vorgeschlagen. Mit etwas Netzwerktheorie kann man diese Schaltung in eine einfachere, äquivalente Schaltung umwandeln, die viel leichter zu handhaben ist (Bild 15).

Die ENS (Einrichtung zur Netzüberwachung mit jeweils zugeordnetem Schaltorgan in Reihe) berücksichtigt einen Normenvorschlag der Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik in Köln und detektiert einen Netzausfall durch Impedanzmessungen am Netz [8]. Dabei musste sich der Wechselrichter ursprünglich bei einem Impedanzsprung von $\Delta Z_N = 0,5\Omega$, in jedem Fall aber bei einer Gesamtimpedanz von $Z_N > 1,75\Omega$, innerhalb von 5 Sekunden vom Netz freischalten. Ausserdem durfte sich der Wechselrichter nur auf Netze aufschalten, deren Impedanz $Z_N < 1,25\Omega$ betrug. Für den Test nach diesem Vorschlag wurde Z so gewählt, dass sich zusammen mit der zwischen L und N vorhandenen Netzimpedanz die für den Test erforderliche Gesamtimpedanz ergab. Gemäss den neuesten BRD-Vorschriften [8] soll dagegen nur noch der Impedanzsprung als Abschaltkriterium dienen. In diesem Fall stellt Z den gewünschten Impedanzsprung von $0,5\Omega$ dar.



2 Testresultate Netzverbundwechselrichter

In Tabelle 5 sind die wichtigsten Wechselrichterdaten und Messresultate der in diesem Projekt an der HTA Burgdorf durchgeführten Tests ersichtlich.

In den folgenden Teilabschnitten werden die ausführlichen Messresultate und die daraus gewonnenen Erkenntnisse für jeden getesteten Wechselrichter detailliert dargestellt.

Wechselrichter	S_N	U_{DC} (max)	Ein- schalt- leistung	Trans- for- mator	1: 1- phasig 3: 3- phasig	Europ. Wir- kungs- grad	Strom- Harmo- nische ($<2\text{kHz}$)	Selbst- lauf	EMV AC	EMV DC	Rund- steuer- signal- empfind- lichkeit
	kW	V	W_{DC}			%					
ASP Spark	1.35	276	15	NF	1	90.6	++	++	+ ²⁾	++	++
Solcolino	0.2	78	1.5	ohne	1	90.6	++	++	0	--	++
NKF OK4E-100	0.1	50	0.5	HF	1	90.3	++	0 ¹⁾	+	-	++
SMA SWR 1500	1.5	500	15	ohne	1	94.4	++	++	+ ²⁾	++	++
Convert4000	3.8	800	30	ohne	1	92.5	++	++	+ ²⁾	++	++

++ sehr gut, Norm mit Reserve erfüllt

+ gut, Norm erfüllt

0 befriedigend, Norm beinahe erfüllt

- mangelhaft, Norm nicht erfüllt

-- ungenügend, Norm bei weitem nicht erfüllt

¹⁾ Gelegentlicher Selbstlauf

²⁾ Leichte Überschreitung der Grenzwerte
im Bereich 150kHz-500kHz, aber gutes
Verhalten für $f > 500\text{kHz}$

Tabelle 6: Die wichtigsten Wechselrichterdaten und Messresultate der getesteten Wechselrichter.

2.1 Convert 4000

Technische Daten (Herstellerangaben):

Hersteller:	Sputnik Engineering, Nidau
Nennleistung P_{ACN} :	3,8kW
Max. Eingangsleistung P_{DC} :	4,5kW
Nennspannung: U_{DC} :	k.A.
Eingangsspannungsbereich U_{DC} :	400V ... 750V
Ausgangsspannungsbereich U_{AC} :	195V ... 253V
Transformator:	ohne
Einspeisung:	1-phasig
ENS:	vorhanden

Eingangskontrolle und Betrieb bei Leistungsüberangebot:

Funktionstest:	Betrieb während 8 Stunden bei $P_{AC} = 3,8kW$
Leistungsüberangebot:	Betrieb während 1 Stunde bei $P_{DCM} = 4,5kW$

EMV- Verhalten auf der AC-Seite:

$P_{AC} = 3,8kW$

☒ ++ ☒ + ☐ 0 ☐ - ☐ --

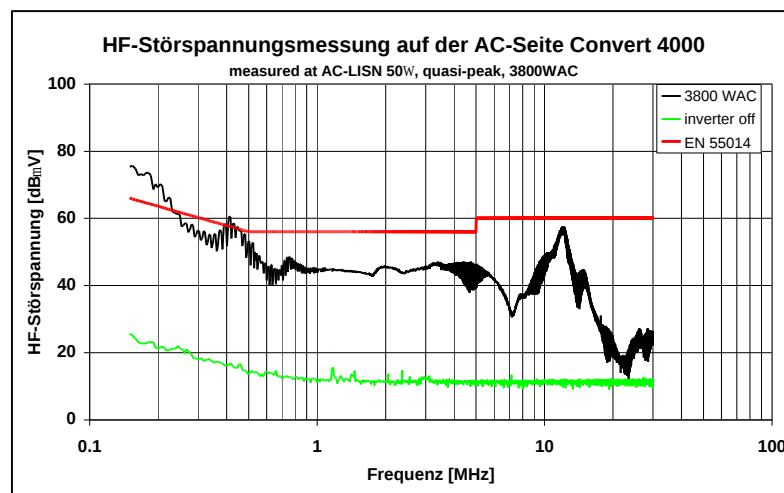


Bild 16:

HF-Störspannungen, welche ein Convert 4000 auf der AC-Seite produziert, im Vergleich zu den Grenzwerten nach EN55014.

EMV- Verhalten auf der DC-Seite:

$P_{AC} = 3,8kW$

☒ ++ ☒ + ☐ 0 ☐ - ☐ --

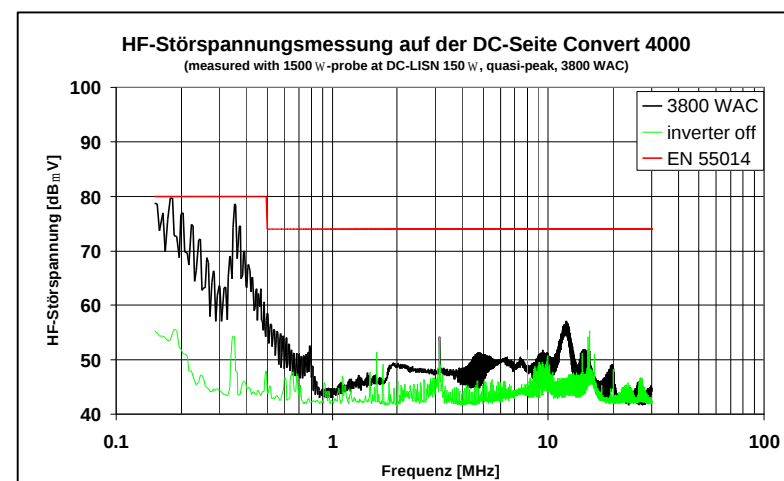


Bild 17:

HF-Störspannungen, welche ein Convert 4000 auf der DC-Seite produziert. Im Vergleich dazu die Grenzwerte nach EN 55014.



Einschaltleistung und Nennspannungsbereich:

Einschaltleistung: $P_{DC} = 30W$
Unterspannung: $U_{AC} = 194V$
Überspannung: $U_{AC} = 256V$

Oberschwingungsströme:

Verwendete Norm: EN61000-3-2

1. $P_{AC} = 3,8kW$

2. $P_{AC} = 1,9kW$

☒ ++ ☐ + ☐ 0 ☐ - ☐ --

☒ ++ ☐ + ☐ 0 ☐ - ☐ --

☐ 0 ☐ - ☐ --

☐ 0 ☐ - ☐ --

☐ 0 ☐ - ☐ --

☐ 0 ☐ - ☐ --

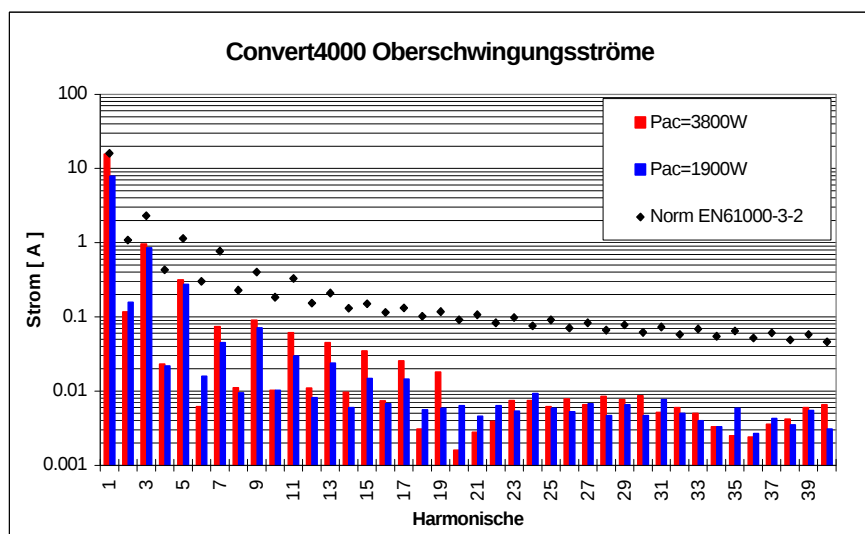


Bild 18:

Stromüberschwingungen des Convert 4000 im Vergleich zu den Grenzwerten nach EN 61000-3-2.

Wirkungsgrad:

$P_{ACN} = 3.8kW$

Wirkungsgrad bei

$U_{MPP} = 460V$

5% P_{ACN} : 84,9%

10% P_{ACN} : 89,9%

20% P_{ACN} : 91,8%

30% P_{ACN} : 92,9%

50% P_{ACN} : 93,2%

100% P_{ACN} : 92,5%

Europäischer Wirkungsgrad:

Maximaler Wirkungsgrad **93,3% bei 64% von P_{ACN}**

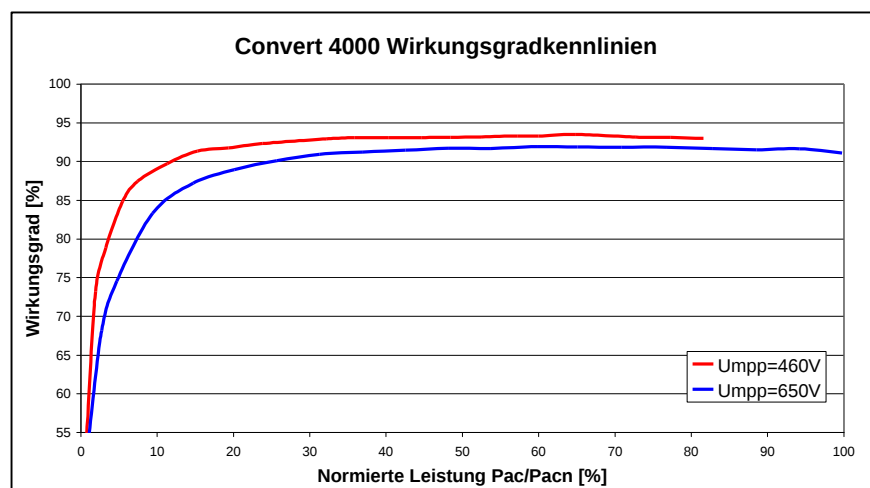
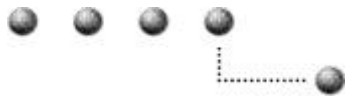


Bild 19:

Wirkungsgrad in Funktion der normierten (bezogen auf die Nennleistung $P_{ACN} = 3,8kW$) Wechselstromleistung des Convert 4000 bei verschiedenen DC-Spannungen.



MPPT-Verhalten:

Das MPPT-Verhalten konnte mit dem vorhandenen Material nicht gemessen werden.

Rundsteuersignal-Empfindlichkeit:

1. $U_{AC} = 220V$	$P_{AC} = 2kW$	☒ ++	☐ +	☐ 0	☐ -	☐ --
2. $U_{AC} = 230V$	$P_{AC} = 1,8kW$	☒ ++	☐ +	☐ 0	☐ -	☐ --
3. $U_{AC} = 240V$	$P_{AC} = 1,7kW$	☒ ++	☐ +	☐ 0	☐ -	☐ --

Selbstlauftests:

- ☒ Test nach Schweizer Vorschriften (inkl. Netzsimulationsschwingkreis)
- ☐ Test nach BRD Vorschriften (Messung mit vereinfachter Messschaltung)

Messungen bei:

1. $P_{AC} = 3,3kW$ Abschaltdauer = 120ms
2. $P_{AC} = 2kW$ Abschaltdauer = 175ms

Testergebnis:

☒ ++ ☐ + ☐ 0 ☐ - ☐ --

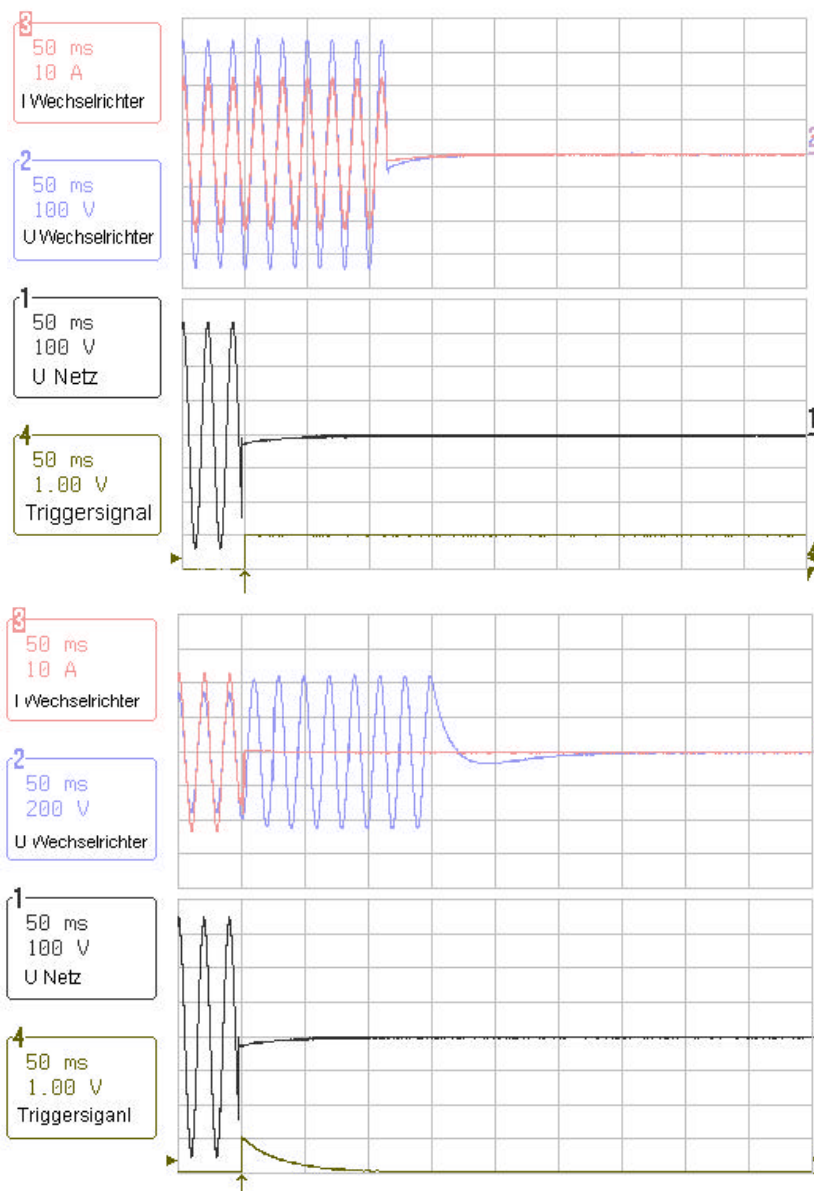


Bild 20:

Selbstlauftest bei annähernd Nennleistung ($P_{AC} = 3,3kW$) und angepasster Last. Der Convert 4000 schaltet innert ca. 150ms ab und erfüllt somit die Schweizer Vorschriften, die ein Abschalten innert 5s verlangen.

Bild 21:

Leerlaufabschaltverhalten eines Convert 4000 bei einer AC-Leistung von $P_{AC} = 3,8kW$. Die Spannung am Wechselrichter Ausgang steigt während einiger Perioden auf ca. 460V an.



2.2 SWR 1500

Technische Daten (Herstellerangaben):

Hersteller:	SMA Niestetal / BRD
Nennleistung P_{ACN} :	1.5kW
Max. Eingangsleistung P_{DC} :	k. A.
Nennspannung U_{DC} :	k. A.
Eingangsspannungsbereich U_{DC} :	125V ... 500V
Ausgangsspannungsbereich U_{AC} :	196V ... 253V
Transformator:	ohne
Einspeisung:	1-phasig
ENS:	vorhanden

Eingangskontrolle und Betrieb bei Leistungsüberangebot:

Funktionstest:	Betrieb während 8 Stunden bei $P_{AC} = 1,5kW$
Leistungsüberangebot:	Betrieb während 1 Stunde bei $P_{DCM} = 2,1kW$

EMV- Verhalten auf der AC-Seite:

$P_{AC} = 1,5kW$

☐ ++ ☒ + ☐ 0 ☐ - ☐ --

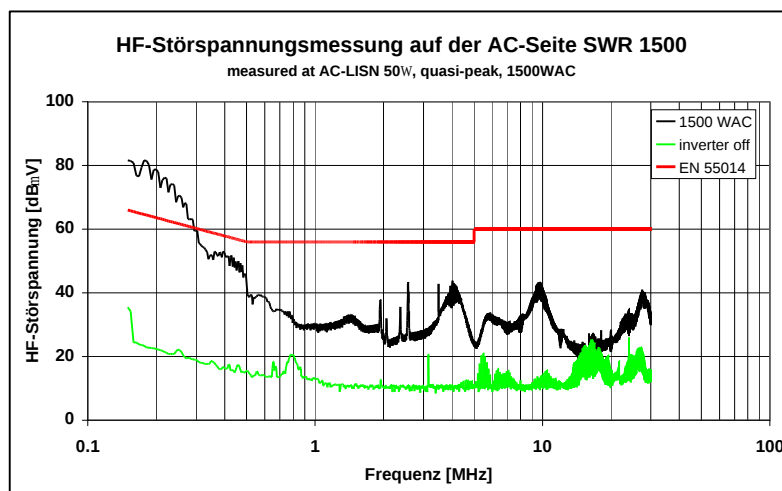


Bild 22:

HF-Störspannungen, welche ein SWR 1500 auf der AC-Seite produziert, im Vergleich zu den Grenzwerten nach EN55014.

EMV- Verhalten auf der DC-Seite:

$P_{AC} = 1,5kW$

☒ ++ ☐ + ☐ 0 ☐ - ☐ --

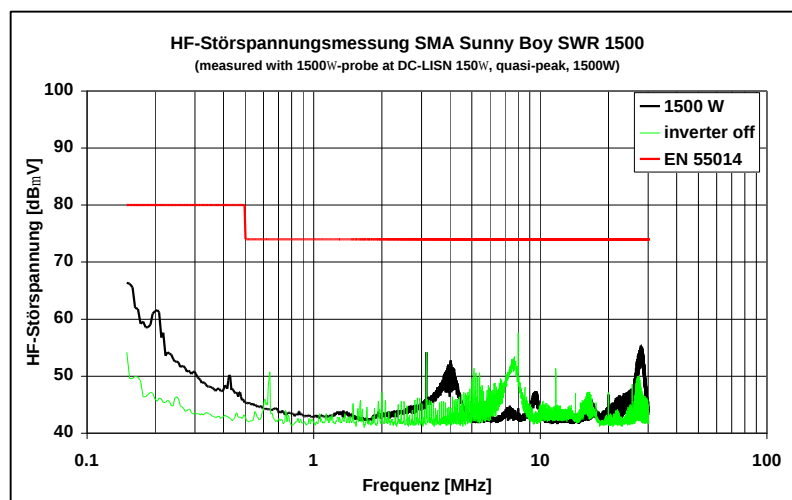
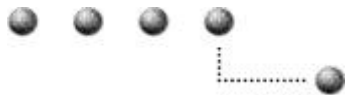


Bild 23:

HF-Störspannungen, welche ein SWR 1500 auf der DC-Seite produziert. Im Vergleich dazu die Grenzwerte nach EN 55014.



Einschaltleistung und Nennspannungsbereich:

Einschaltleistung: $P_{DC} = 15W$
 Unterspannung: $U_{AC} = 194,5V$
 Überspannung: $U_{AC} = 246,9V$

Oberschwingungsströme:

Verwendete Norm:

1. $P_{AC} = 1,5kW$
2. $P_{AC} = 0,75kW$

EN61000-3-2

☒ ++	☒ +	☐ 0	☐ -	☐ --
☒ ++	☒ +	☐ 0	☐ -	☐ --

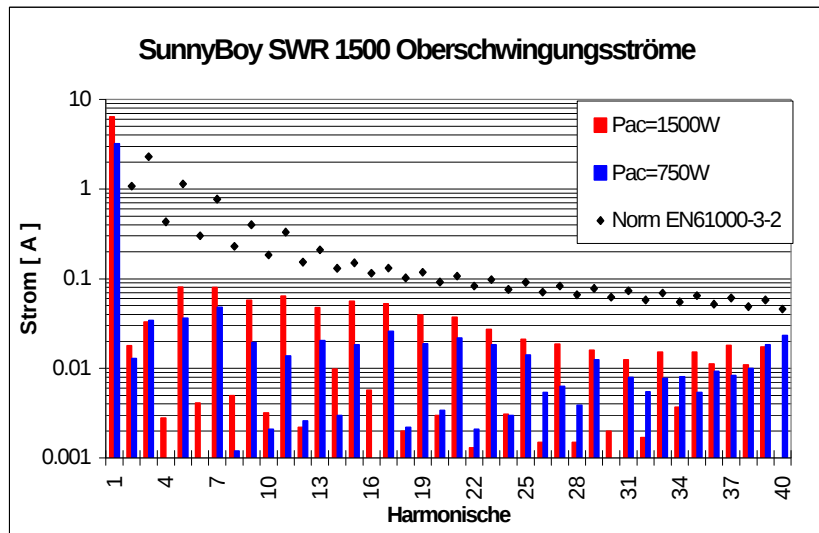


Bild 24:

Stromüberschwingungen des SMA Sunny Boy SWR 1500 im Vergleich zu den Grenzwerten nach EN 61000-3-2.

Wirkungsgrad:

$P_{ACN} = 1,5kW$
 Wirkungsgrad bei

$U_{MPP} = 420V$

5% P_{ACN} :	82%
10% P_{ACN} :	91%
20% P_{ACN} :	94%
30% P_{ACN} :	95%
50% P_{ACN} :	95.3%
100% P_{ACN} :	95%

Europäischer Wirkungsgrad:

Maximaler Wirkungsgrad **95,4%** bei **60%** von P_{ACN}

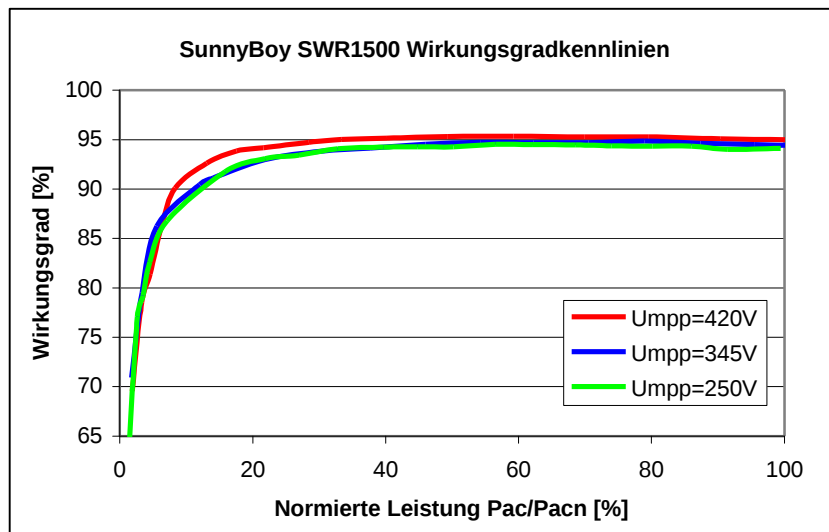
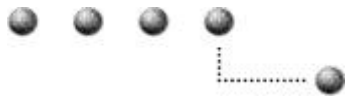


Bild 25:

Wirkungsgrad in Funktion der normierten (bezogen auf die Nennleistung $P_{ACN} = 1,5kW$) Wechselstromleistung des SMA Sunny Boy SWR 1500 bei verschiedenen DC-Spannungen.



MPPT-Verhalten:

Das MPPT-Verhalten konnte mit dem vorhandenen Material nicht gemessen werden.

Rundsteuersignal-Empfindlichkeit:

1. $U_{AC} = 220V$	$P_{AC} = 1.5kW$	☒ ++	☐ +	☐ 0	☐ -	☐ --
2. $U_{AC} = 230V$	$P_{AC} = 1.5kW$	☒ ++	☐ +	☐ 0	☐ -	☐ --
3. $U_{AC} = 240V$	$P_{AC} = 1.5kW$	☒ ++	☐ +	☐ 0	☐ -	☐ --

Selbstlauftests:

- ☒ Test nach Schweizer Vorschriften (inkl. Netzsimulationsschwingkreis)
- ☐ Test nach BRD Vorschriften (Messung mit vereinfachter Messschaltung)

Messungen bei:

- 1. $P_{AC} = 1,5kW$ Abschaltdauer = 110ms
- 2. $P_{AC} = 0,75kW$ Abschaltdauer = 100ms

Testergebnis:

☒ ++ ☐ + ☐ 0 ☐ - ☐ --

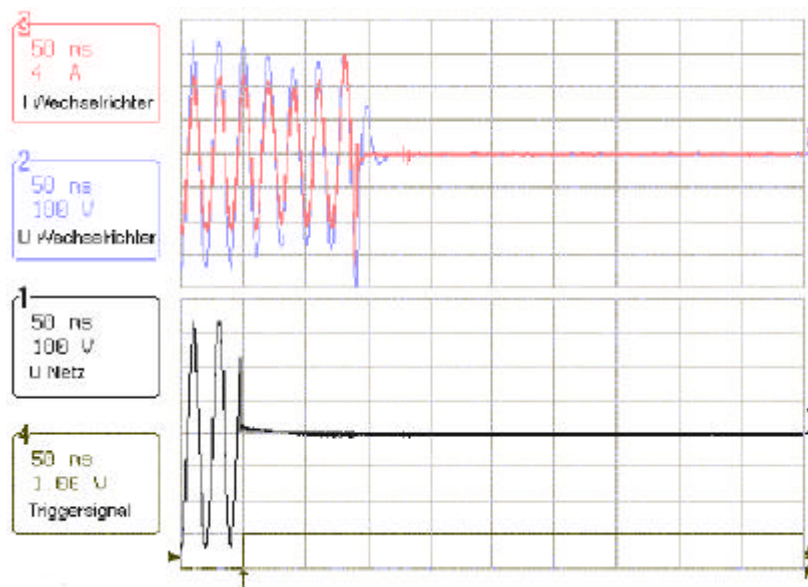


Bild 26:

Selbstlauftest bei Nennleistung ($P_{ACN} = 1,5kW$) und angepasster Last. Der SMA Sunny Boy SWR 1500 schaltet innert ca. 110ms ab und erfüllt somit die Schweizer Vorschriften, die ein Abschalten innert 5s verlangen.

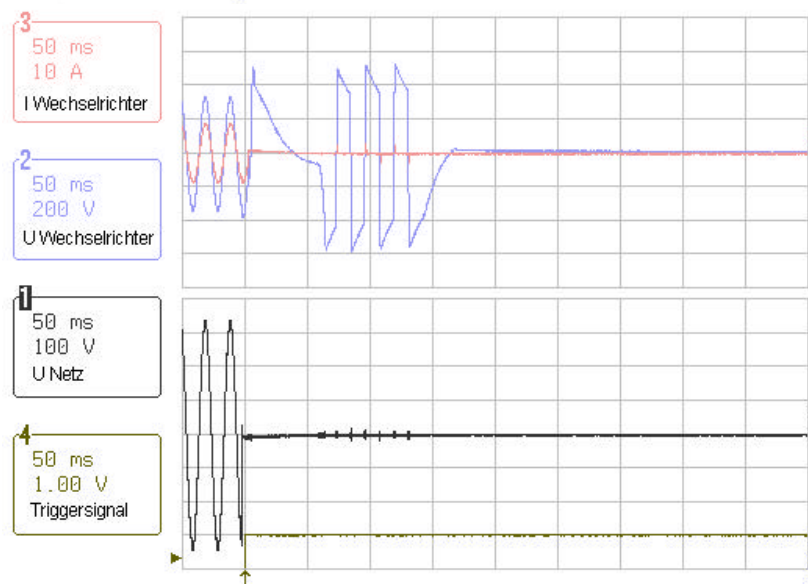


Bild 27:

Leerlaufabschaltverhalten eines SMA Sunny Boy SWR 1500 bei AC-Nennleistung ($P_{ACN} = 1,5kW$). Die Spannung am Wechselrichterausgang steigt während drei Perioden auf ca. 500V an.

2.3 Top Class Spark

Technische Daten (Herstellerangaben):

Hersteller:	ASP Advanced Solar Products AG, CH-8637 Laupen
Nennleistung P_{ACN} :	1350W
Max. Eingangsleistung P_{DC} :	1500W
Nennspannung: U_{DC} :	k.A.
Eingangsspannungsbereich:	75V ... 276V
Ausgangsspannungsbereich:	195V ... 256V
Transformator:	NF
Einspeisung:	1-phasig
ENS:	vorhanden

Eingangskontrolle und Betrieb bei Leistungsüberangebot:

Funktionstest:	Betrieb während 8 Stunden bei $P_{AC} = 1,5kW$
Leistungsüberangebot:	Betrieb während 1 Stunde bei $P_{AC} = 2,1kW$

EMV- Verhalten auf der AC-Seite:

$P_{AC} = 1,4kW$

☐ ++ ☒ + ☐ 0 ☐ - ☐ --

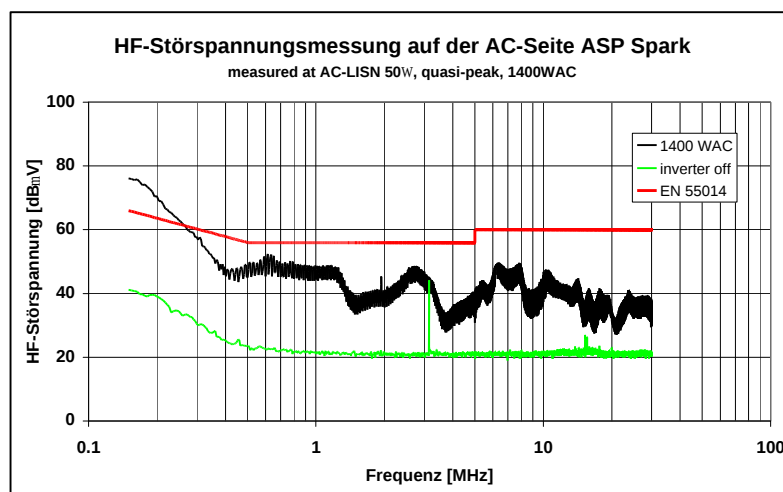


Bild 28:

HF-Störspannungen, die der Spark auf der AC-Seite produziert, im Vergleich zu den Grenzwerten nach EN55014.

EMV- Verhalten auf der DC-Seite:

$P_{AC} = 1,3kW$

☒ ++ ☐ + ☐ 0 ☐ - ☐ --

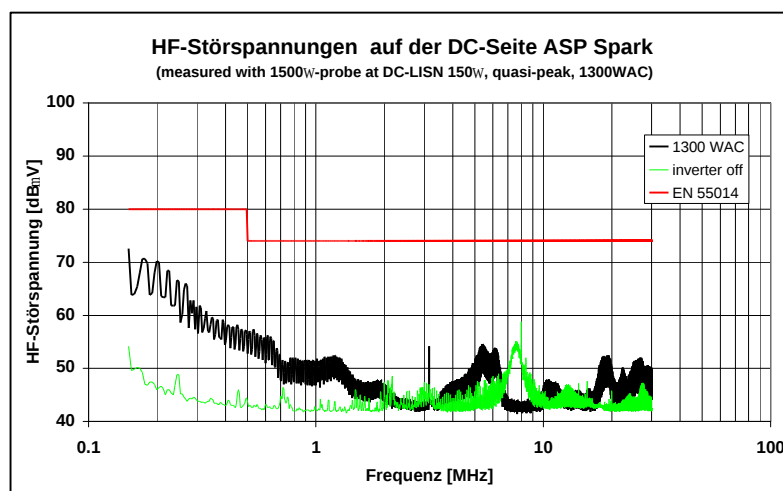
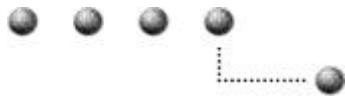


Bild 29:

HF-Störspannungen, die der Spark auf der DC-Seite produziert, im Vergleich zu den Grenzwerten nach EN55014.



Einschaltleistung und Nennspannungsbereich:

Einschaltleistung: $P_{DC} = 15W$
Unterspannung: $U_{AC} = 210V$
Überspannung: $U_{AC} = 253V$

Oberschwingungsströme:

Verwendete Norm: EN61000-3-2

- | | | | | | | |
|----|------------------|--|---------------------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 1. | $P_{AC} = 1125W$ | ☒ ++ | ☒ + | ☐ 0 | ☐ - | ☐ -- |
| 2. | $P_{AC} = 580W$ | ☒ ++ | ☒ + | ☐ 0 | ☐ - | ☐ -- |

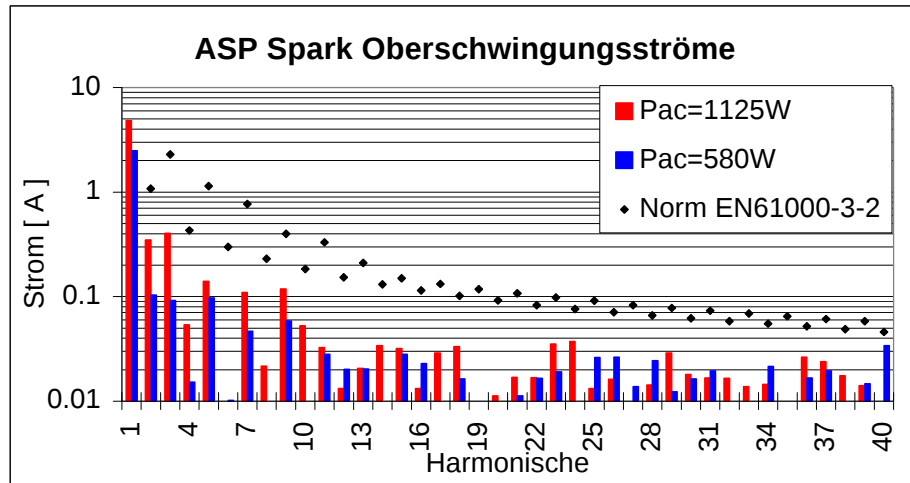


Bild 30:
Stromüberschwingungen des Spark im Vergleich zu den Grenzwerten nach EN61000-3-2.

Wirkungsgrad:

$P_{ACN} = 1350W$
Wirkungsgrad bei

$U_{MPP} = 180V$	
5% P_{ACN} :	78,6%
10% P_{ACN} :	85,8%
20% P_{ACN} :	90,0%
30% P_{ACN} :	91,5%
50% P_{ACN} :	92,0%
100% P_{ACN} :	90,6%

Europäischer Wirkungsgrad: 90,6%
Maximaler Wirkungsgrad **92,1%** bei **47%** von P_{ACN}

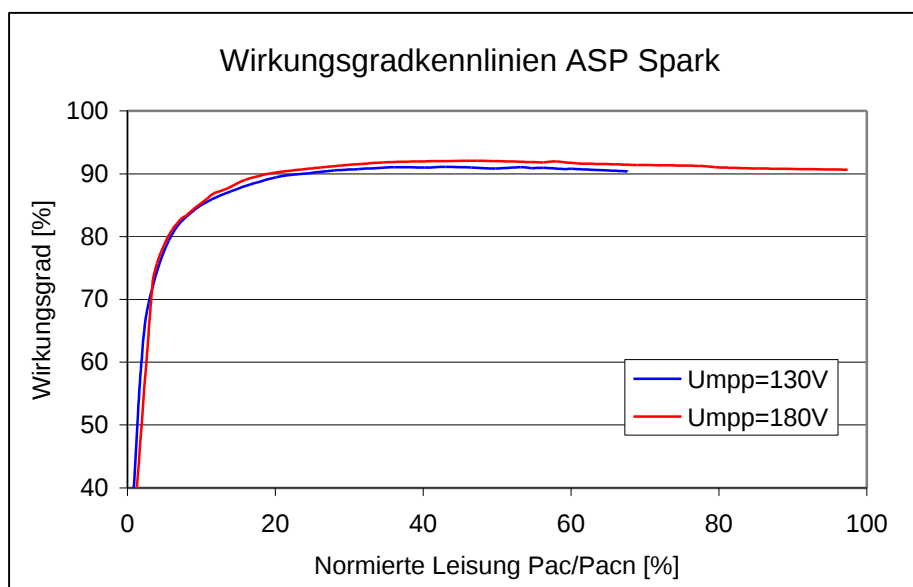
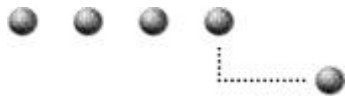


Bild 31:
Wirkungsgrad in Funktion der normierten (bezogen auf die Nennleistung von $P_{ACN}=1,35kW$) Wechselstromleistung des Spark bei verschiedenen DC-Spannungen.



MPPT-Verhalten:

Das MPPT-Verhalten konnte mit dem vorhandenen Material nicht gemessen werden.

Rundsteuersignal-Empfindlichkeit:

1. $U_{AC} = 220V$	$P_{AC} = 1kW$	☒ ++	☐ +	☐ 0	☐ -	☐ --
2. $U_{AC} = 230V$	$P_{AC} = 1kW$	☒ ++	☐ +	☐ 0	☐ -	☐ --
3. $U_{AC} = 240V$	$P_{AC} = 1kW$	☒ ++	☐ +	☐ 0	☐ -	☐ --

Selbstlauftests:

- ☒ Test nach Schweizer Vorschriften (inkl. Netzsimulationsschwingkreis)
- ☐ Test nach BRD Vorschriften (Messung mit vereinfachter Messschaltung)

Messungen bei:

- 1. $P_{AC} = 925W$ Abschaltdauer = 0,5s
- 2. $P_{AC} = 350W$ Abschaltdauer = 0,4s

Testergebnis:

☒ ++ ☐ + ☐ 0 ☐ - ☐ --

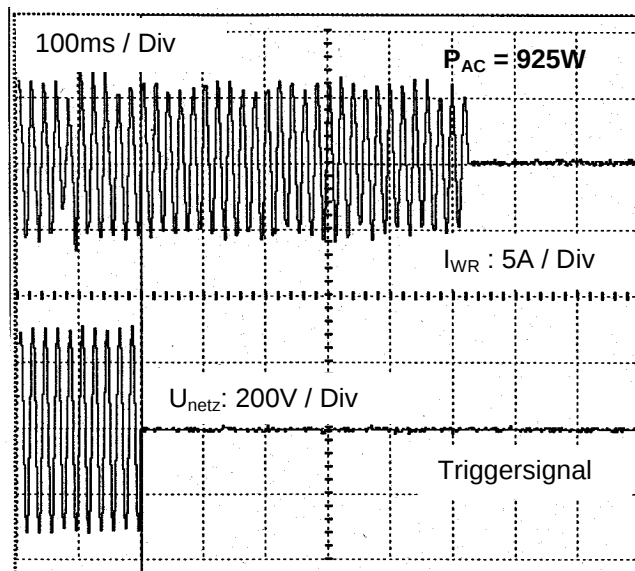


Bild 32:

Selbstlauftest bei nahezu Nennleistung ($P_{ACN} = 925W$) und angepasster Last. Der Spark schaltet innert ca. 500ms ab und erfüllt somit die Schweizer Vorschriften, die ein Abschalten innert 5s verlangen.

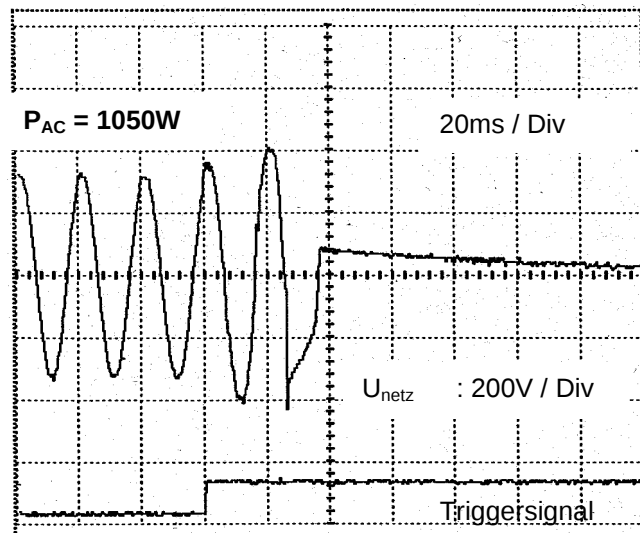


Bild 33:

Leerlaufabschaltverhalten eines Spark bei nahezu AC-Nennleistung ($P_{ACN} = 1,05kW$). Die Spannung am Wechselrichterausgang steigt kurzzeitig auf ca. 400V an.



2.4 Solcolino

Technische Daten (Herstellerangaben):

Hersteller:	Hardmeier Electronics AG, Winterthur
Nennleistung P_{DCN} :	240W
Max. Eingangsleistung P_{DC} :	k.A.
Nennspannung: U_{DC} :	72V
Eingangsspannungsbereich:	43V ... 90V
Ausgangsspannungsbereich:	207V ... 256V
Transformator:	ohne
Einspeisung:	1-phasig
ENS:	nicht vorhanden

Eingangskontrolle und Betrieb bei Leistungsüberangebot:

Funktionstest:	Betrieb während 8 Stunden bei $P_{DC} = 240W$
Leistungsüberangebot:	Betrieb während 1 Stunde bei $P_{DC} = 336W$

EMV- Verhalten auf der AC-Seite:

$P_{AC} = 200W$

☐ ++ ☐ + ☒ 0 ☐ - ☐ --

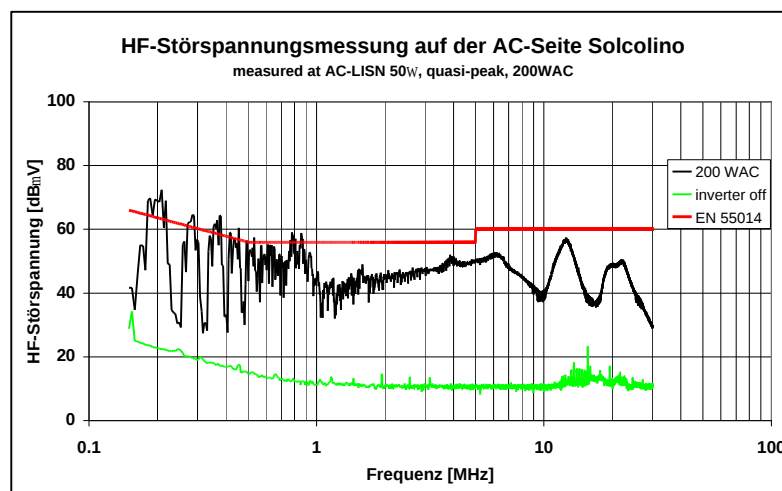


Bild 34:

HF-Störspannungen, welche ein Solcolino auf der AC-Seite produziert. Partiiell überschreitet der Wechselrichter die Grenzwerte der EN55014.

EMV- Verhalten auf der DC-Seite:

$P_{AC} = 200W$

☐ ++ ☐ + ☐ 0 ☐ - ☒ --

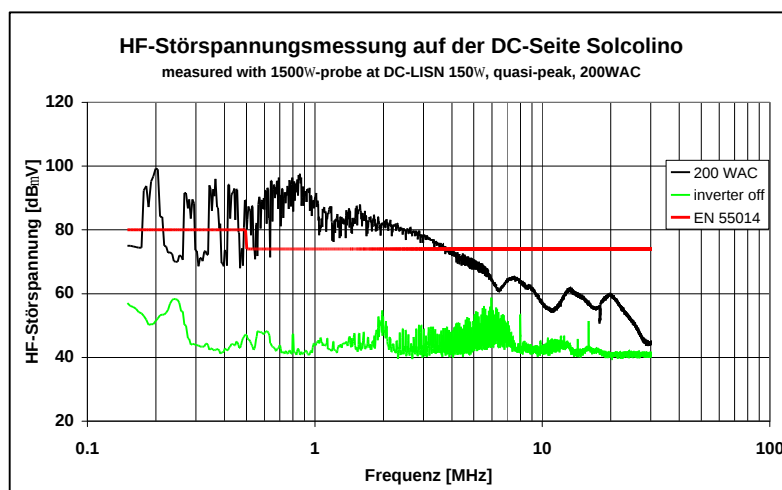
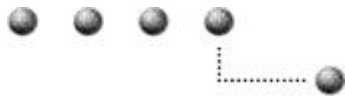


Bild 35:

HF-Störspannungen, welche ein Solcolino auf der DC-Seite produziert. Die Störspannungen überschreiten partiell die Grenzwerte der EN55014.



Einschaltleistung und Nennspannungsbereich:

Einschaltleistung: $P_{DC} = 1,5W$
 Unterspannung: $U_{AC} = 205V$
 Überspannung: $U_{AC} = 247,7V$

Oberschwingungsströme:

Verwendete Norm: EN61000-3-2
 1. $P_{AC} = 193W$ ☒ ++ ☒ + ☐ 0 ☐ - ☐ --
 2. $P_{AC} = 101W$ ☒ ++ ☒ + ☐ 0 ☐ - ☐ --

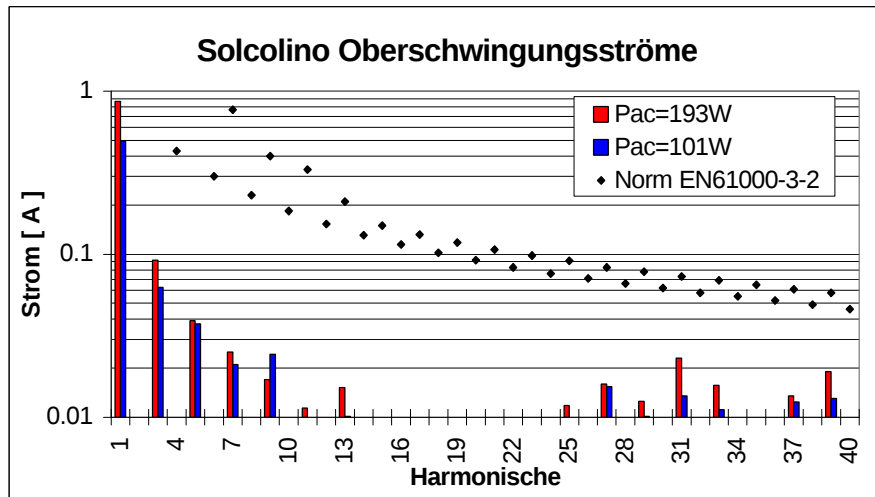


Bild 36:
Stromüberschwingungen des Solcolino im Vergleich zu den Grenzwerten nach EN61000-3-2.

Wirkungsgrad:

$P_{DCN} = 240W$
 Wirkungsgrad bei $U_{MPP} = 72V$

5% P_{DCN} :	85,9%
10% P_{DCN} :	88,5%
20% P_{DCN} :	90,5%
30% P_{DCN} :	90,9%
50% P_{DCN} :	91,1%
100% P_{DCN} :	90,8%

Europäischer Wirkungsgrad:
 Maximaler Wirkungsgrad **91,2%** bei **44%** von P_{DCN}

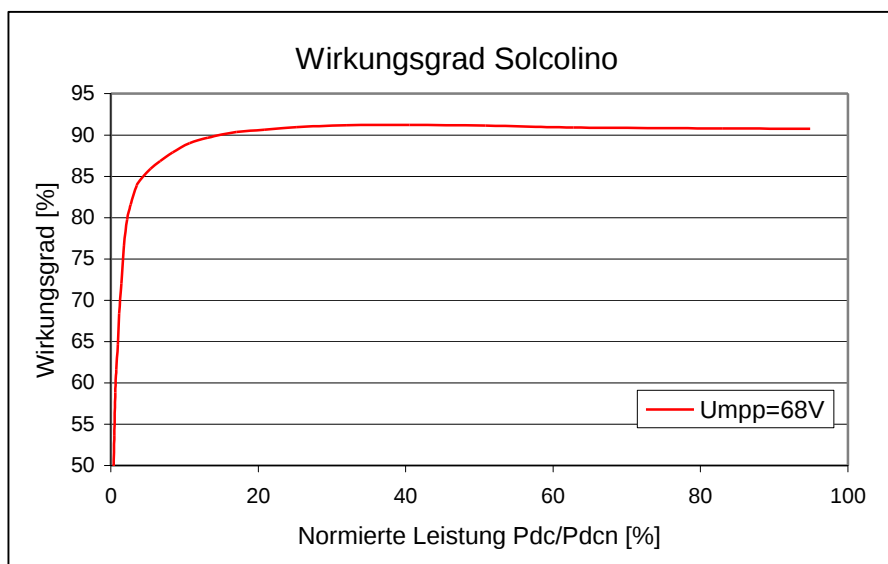
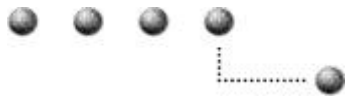


Bild 37:
Wirkungsgrad in Funktion der normierten (bezogen auf die Nennleistung $240W_{DC}$) Gleichstromleistung des einphasigen traflosen Wechselrichters Solcolino.



MPPT-Verhalten:

Das MPPT-Verhalten konnte mit dem vorhandenen Material nicht gemessen werden.

Rundsteuersignal-Empfindlichkeit:

1. $U_{AC} = 220V$	$P_{AC} = 200W$	☒ ++	☐ +	☐ 0	☐ -	☐ --
2. $U_{AC} = 230V$	$P_{AC} = 200W$	☒ ++	☐ +	☐ 0	☐ -	☐ --
3. $U_{AC} = 240V$	$P_{AC} = 200W$	☒ ++	☐ +	☐ 0	☐ -	☐ --

Selbstlauftests:

- ☒ Test nach Schweizer Vorschriften (inkl. Netzsimulationsschwingkreis)
☐ Test nach BRD Vorschriften (Messung mit vereinfachter Messschaltung)

Messungen bei:

- $P_{AC} = 200W$ Abschaltdauer = 75ms
- $P_{AC} = 100W$ Abschaltdauer = 75ms

Testergebnis:

☒ ++ ☐ + ☐ 0 ☐ - ☐ --

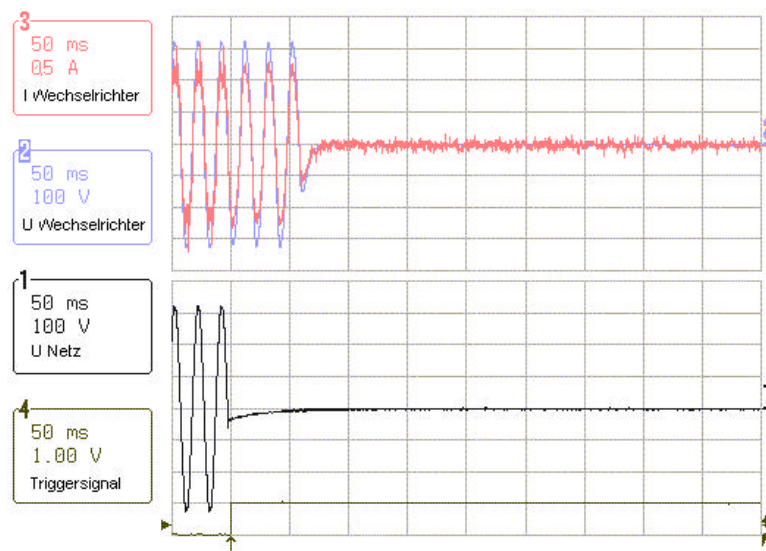


Bild 38:

Selbstlauftest bei nahezu Nennleistung ($P_{ACN} = 200W$) und angepasster Last. Der Solcolino schaltet innert ca. 75ms ab und erfüllt somit die Schweizer Vorschriften, die ein Abschalten innert 5s verlangen.

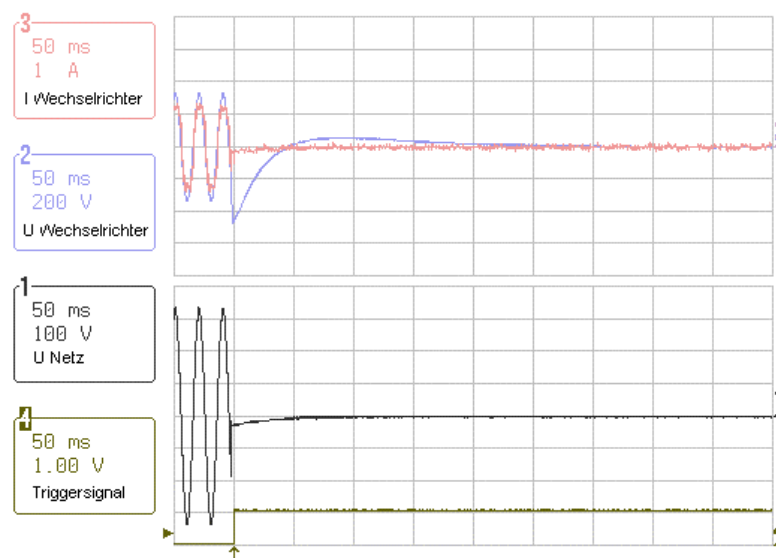


Bild 39:

Leerlaufabschaltverhalten eines Solcolino bei nahezu AC-Nennleistung ($P_{ACN} = 220W$). Die Spannung am Wechselrichter-ausgang steigt kurzzeitig auf ca. 450V an.



2.5 OK4E-100

Technische Daten (Herstellerangaben):

Hersteller:	NKF Kabel B.V. (Holland)
Nennleistung P_{DCN} :	100W
Max. Eingangsleistung P_{DC} :	k.A.
Nennspannung: U_{DC} :	k.A.
Eingangsspannungsbereich:	24V ... 50V
Ausgangsspannungsbereich:	190V ... 270V
Transformator:	HF
Einspeisung:	1-phasig
ENS:	nicht vorhanden

Eingangskontrolle und Betrieb bei Leistungsüberangebot:

Funktionstest:	Betrieb während 8 Stunden bei $P_{DC} = 100W$
Leistungsüberangebot:	Betrieb während 1 Stunde bei $P_{DC} = 140W$

EMV- Verhalten auf der AC-Seite:

$P_{DC} = 100W$

☐ ++ ☒ + ☐ 0 ☐ - ☐ --

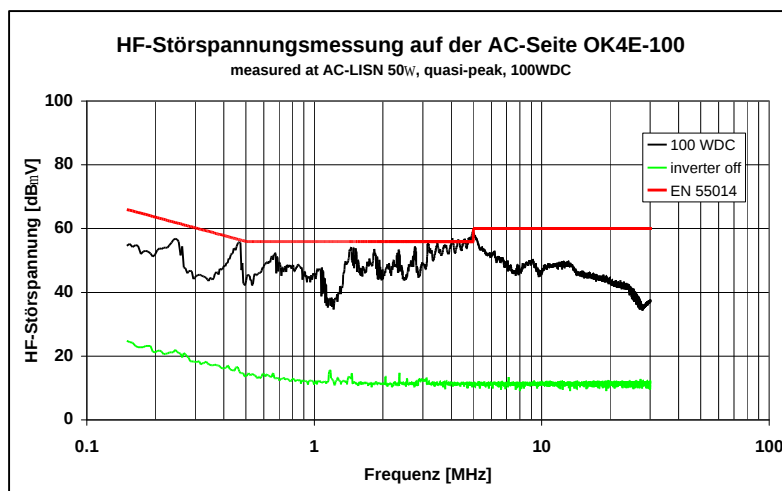


Bild 40:

HF-Störspannungen, welche ein OK4E-100 auf der AC-Seite produziert. Die Störspannungen sind im ganzen Bereich unterhalb der Grenzwerte der EN55014.

EMV- Verhalten auf der DC-Seite:

$P_{DC} = 100W$

☐ ++ ☐ + ☐ 0 ☒ - ☐ --

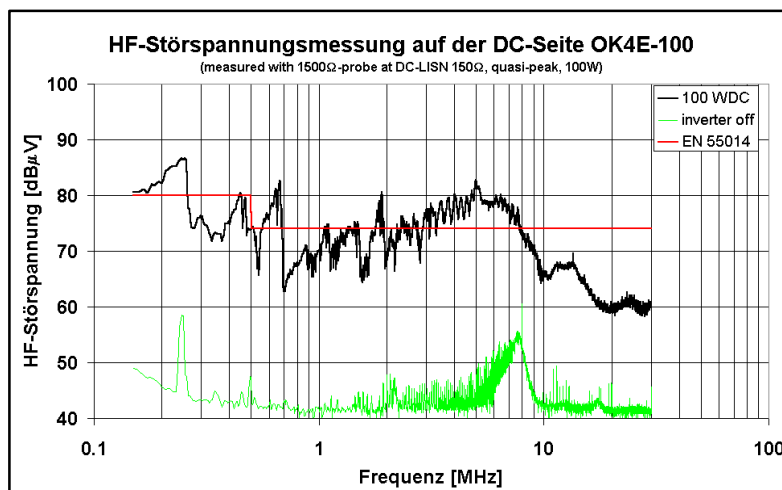
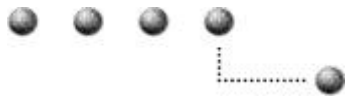


Bild 41:

HF-Störspannungen, welche ein OK4E-100 auf der DC-Seite produziert. Partiiell überschreitet der Wechselrichter die Grenzwerte der EN55014.



Einschaltleistung und Nennspannungsbereich:

Einschaltleistung: $P_{DC} = 0,5W$
Unterspannung: $U_{AC} = 184V$
Überspannung: $U_{AC} = 242,5V$

Oberschwingungsströme:

Verwendete Norm:

1. $P_{AC} = 88W$
2. $P_{AC} = 35W$

EN61000-3-2

☒ ++	☒ +	☐ 0	☐ -	☐ --
☒ ++	☒ +	☐ 0	☐ -	☐ --

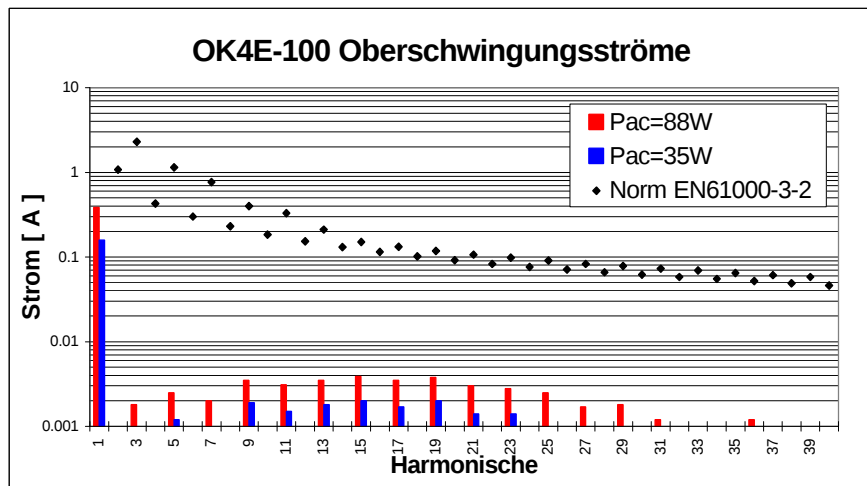


Bild 42:

Stromüberschwingungen des OK4E-100 im Vergleich zu den Grenzwerten nach EN61000-3-2

Wirkungsgrad:

$P_{DCN} = 100W$
Wirkungsgrad bei

$U_{MPP} = 29.8V$
5% P_{DCN} : 87%
10% P_{DCN} : 88,5%
20% P_{DCN} : 90,3%
30% P_{DCN} : 91,4%
50% P_{DCN} : 91,7%
100% P_{DCN} : 87,5%

Europäischer Wirkungsgrad:

Maximaler Wirkungsgrad **91,7%** bei **50%** von P_{DCN}

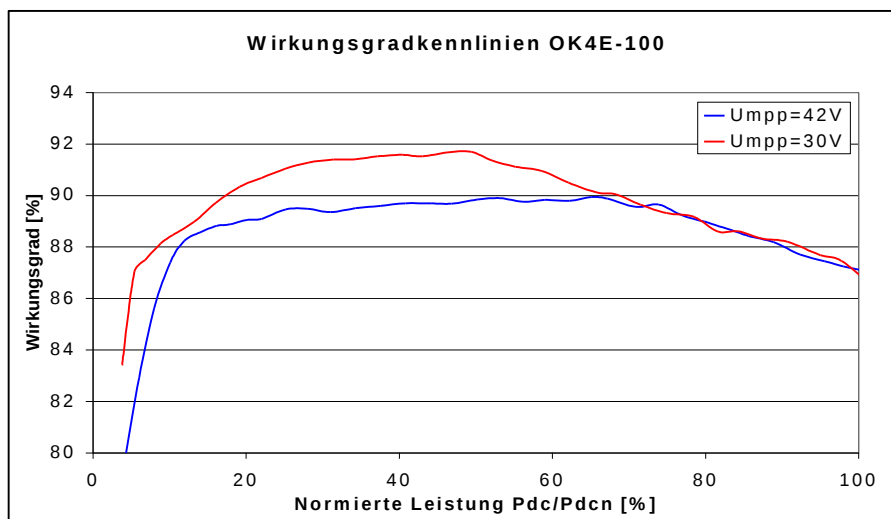
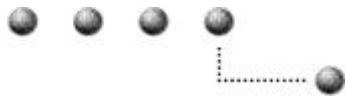


Bild 43:

Wirkungsgrad in Funktion der normierten (bezogen auf Nennleistung $100W_{DC}$) Wechselstromleistung des Modulwechselrichters OK4E-100



MPPT-Verhalten:

Das MPPT-Verhalten konnte mit dem vorhandenen Material nicht gemessen werden.

Rundsteuersignal-Empfindlichkeit:

1. $U_{AC} = 220V$	$P_{DC} = 100W$	☒ ++	☐ +	☐ 0	☐ -	☐ --
2. $U_{AC} = 230V$	$P_{DC} = 100W$	☒ ++	☐ +	☐ 0	☐ -	☐ --
3. $U_{AC} = 240V$	$P_{DC} = 100W$	☒ ++	☐ +	☐ 0	☐ -	☐ --

Selbstauftests:

- ☒ Test nach Schweizer Vorschriften (inkl. Netzsimulationsschwingkreis)
- ☐ Test nach BRD Vorschriften (Messung mit vereinfachter Messschaltung)

Messungen bei:

1. $P_{DC} = 100W$ Abschaltdauer = 100ms
2. $P_{DC} = 100W$ Abschaltdauer = Selbstlauf

Testergebnis: ☐ ++ ☐ + ☒ 0 ☐ - ☐ --

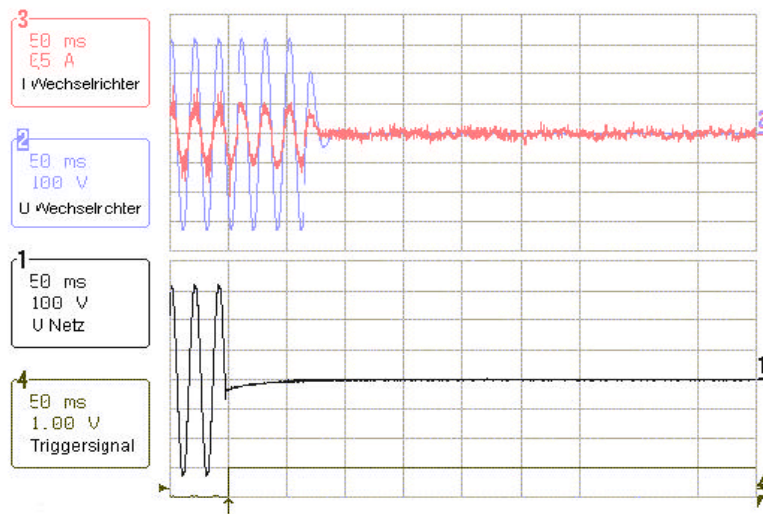


Bild 44:

Selbstauftest bei Nennleistung ($P_{DCN} = 100W$) und angepasster Last. Der OK4E-100 schaltet hier innert ca. 75ms ab. Er erfüllt in der Regel die Schweizer Vorschriften, die ein Abschalten innert 5s verlangen.

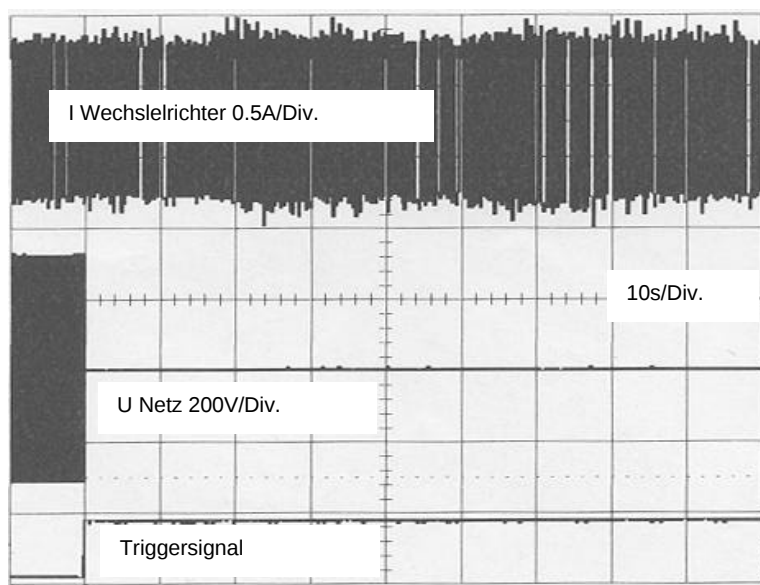


Bild 45:

Selbstauftest bei Nennleistung ($P_{DCN} = 100W$) und angepasster Last. Hier schaltet der OK4E-100 nicht ab, d.h. es tritt ein Selbstlauf auf. Derartige Selbstläufe können nicht immer, aber gelegentlich provoziert werden.

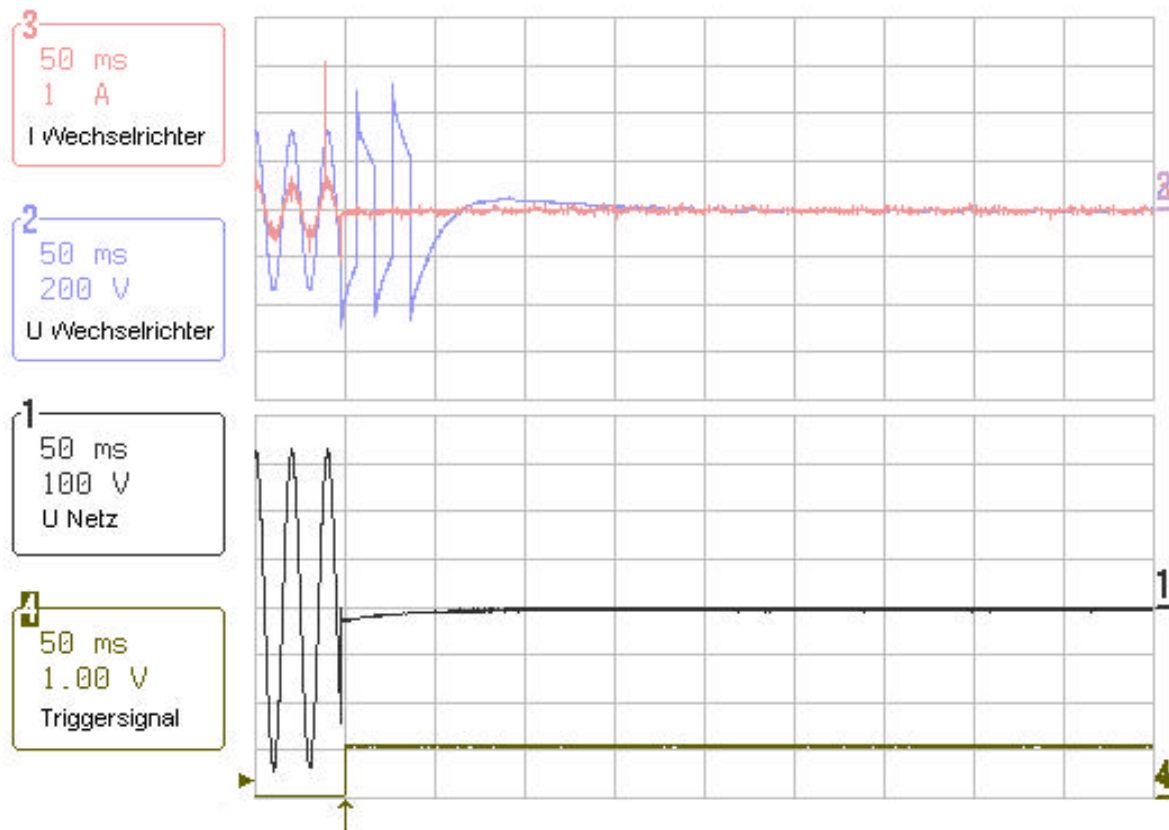


Bild 46: Leerlaufabschaltverhalten eines OK4E-100 bei DC-Nennleistung ($P_{DCN} = 100W$). Die Spannung am Wechselrichterausgang steigt kurzzeitig auf ca. 450V an.

3 Inselwechselrichter

Grundsätzliche Bemerkung:

Ein Inselwechselrichter hat die Aufgabe, ein nicht vorhandenes Wechselstromnetz möglichst gut zu ersetzen. Er erfüllt diese Aufgabe dann gut, wenn seine Ausgangsspannung auch unter Last möglichst die gleiche Qualität wie das Netz aufweist. Deshalb ist es sinnvoll, für die Beurteilung der Qualität der Ausgangsspannung die entsprechenden Normen für die Netzseite anzuwenden.

3.1 Wirkungsgrad bei ohmscher Last

3.1.1 Messaufbau

Für die Wirkungsgradmessung bei ohmscher Last werden folgende Messgeräte und Betriebsmittel verwendet:

- Power Analyzer PM3000A oder PM3300
- PC mit GPIB-Schnittstellenkarte und Messsoftware
- Akkuspeisung
- LEM-Shunt
- Verteilbox
- Verschiedene Culatti-Widerstände zwischen 4Ω und $5k\Omega$ als variable Verbraucher

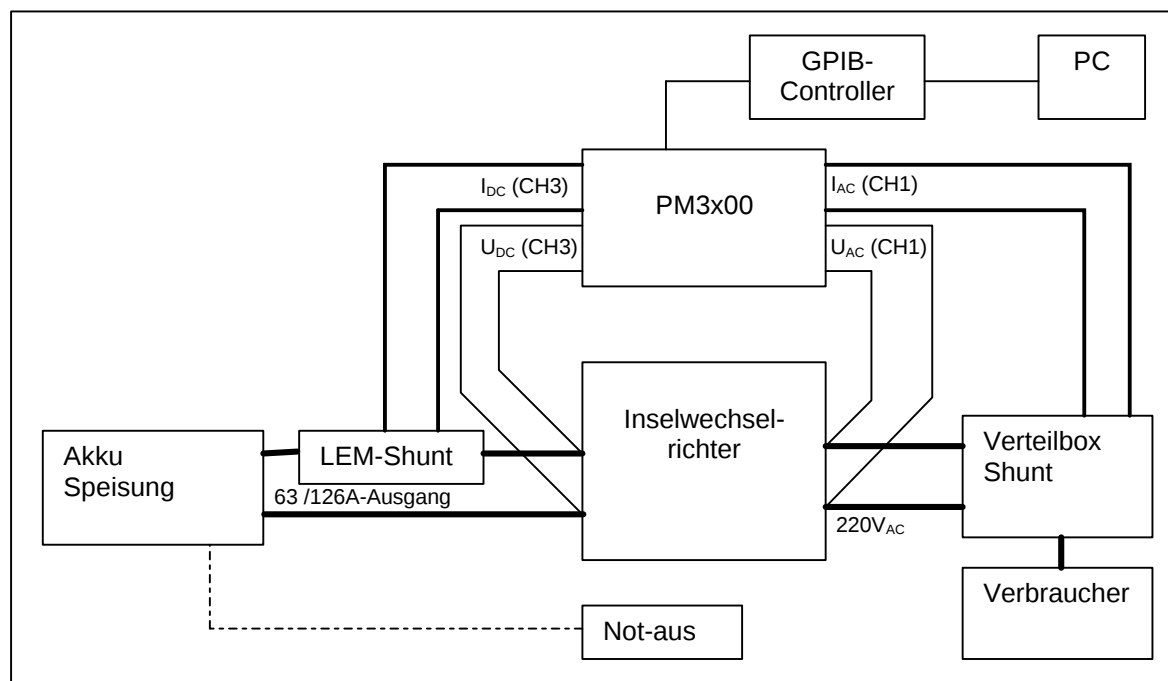


Bild 47: Messaufbau für die Wirkungsgradmessung bei ohmscher Last.

3.1.2 Beschreibung der Messung

Durch verändern der Last (Verbraucher) wird der Wechselrichter bei verschiedenen Belastungen betrieben.

3.2 Wirkungsgrad mit ohmscher/induktiver Last

3.2.1 Messaufbau

Für die Wirkungsgradmessung bei ohmscher/induktiver Last werden folgende Messgeräte und Betriebsmittel verwendet:

- Power Analyzer PM3000A oder PM3300
- PC mit GPIB-Schnittstellenkarte und Messsoftware
- Akkuspeisung
- LEM-Shunt
- Verteilbox
- Verschiedene Culatti-Widerstände zwischen 4Ω und $5k\Omega$ als variable Verbraucher
- Luftspulen
- Variac

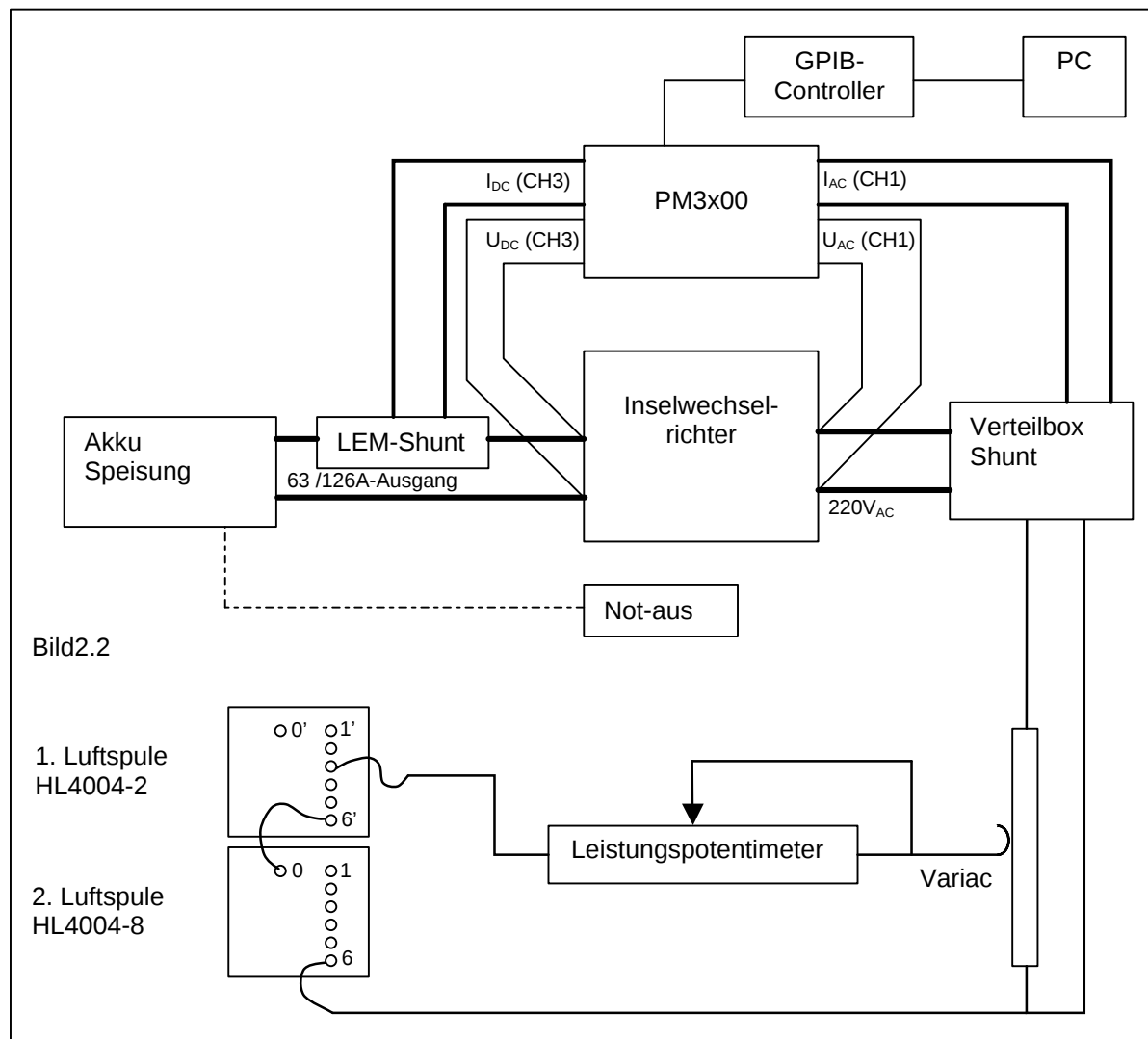


Bild 48: Messaufbau für die Wirkungsgradmessung bei ohmscher/induktiver Last.

3.3 Oberschwingungsspannungen

3.3.1 Messaufbau

Für die Messung der Oberschwingungsspannungen werden folgende Messgeräte und Betriebsmittel verwendet:

- Power Analyzer PM3000A oder PM3300
- PC mit GPIB-Schnittstellenkarte und Messsoftware
- Akkuspeisung
- LEM-Shunt
- Verteilbox
- Verschiedene Culatti-Widerstände zwischen 4Ω und $5k\Omega$ als variable Verbraucher

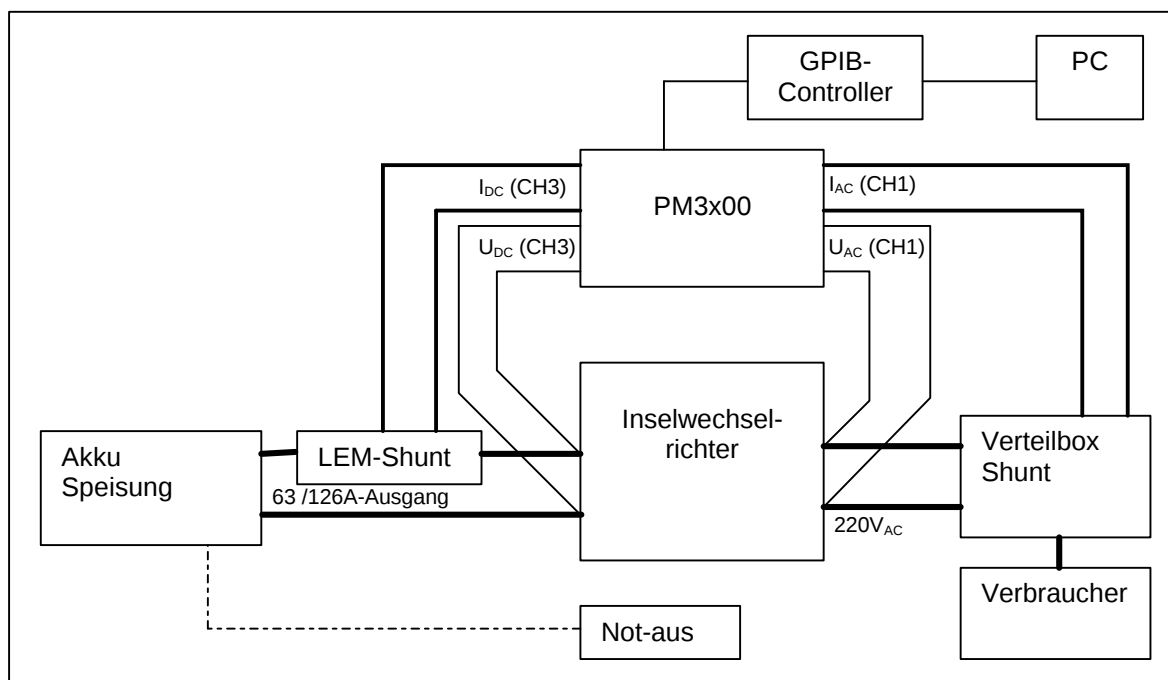


Bild 49: Messaufbau für die Messung der Oberschwingungsspannungen.



3.3.2 Grenzwerte

Ordnungszahl n	Oberschwingungsspannung [%]
ungeradzahlige Oberschwingungen (Vielfache von 3)	
3	5
6	1.5
9	1.5
15	0.3
21	0.2
>21	0.2
ungeradzahlige Oberschwingungen (keine Vielfache von 3)	
5	6
7	5
11	3.5
13	3
17	2
19	1.5
23	1.5
25	1.5
>25	$0.2 + 0.5 \cdot 25/n$
geradzahlige Oberschwingungen	
2	2
4	1
6	0.5
8	0.5
10	0.5
12	0.2
>12	0.2

Tabelle 7: Verträglichkeitspegel der Spannungsüberschwingungen nach EN61000-2-2.

3.3.3 Beschreibung der Messung

Wenn ein Wechselrichter im stationären Betrieb bei allen Leistungen höchstens die in der Tabelle 7 angegebenen Oberschwingungsspannungen erzeugt, hat die von ihm erzeugte Spannung bezüglich Oberschwingungen die gleiche Qualität wie das Netz, d.h. ein Verbraucher kann ohne Probleme angeschlossen werden.

3.4 EMV-Verhalten auf der AC-Seite

3.4.1 Messaufbau

Für die EMV-Messung auf der AC-Seite werden folgende Messgeräte und Betriebsmittel verwendet:

- Akku-Speisung
- 10dB Impulsbegrenzer ESH 3-Z2
- Ohmsche Last: Leistungswiderstand von Maxim
- Spektrum Analyzer Advantest R3261A
- Netznachbildung ESH2-Z5 von Rohde und Schwarz

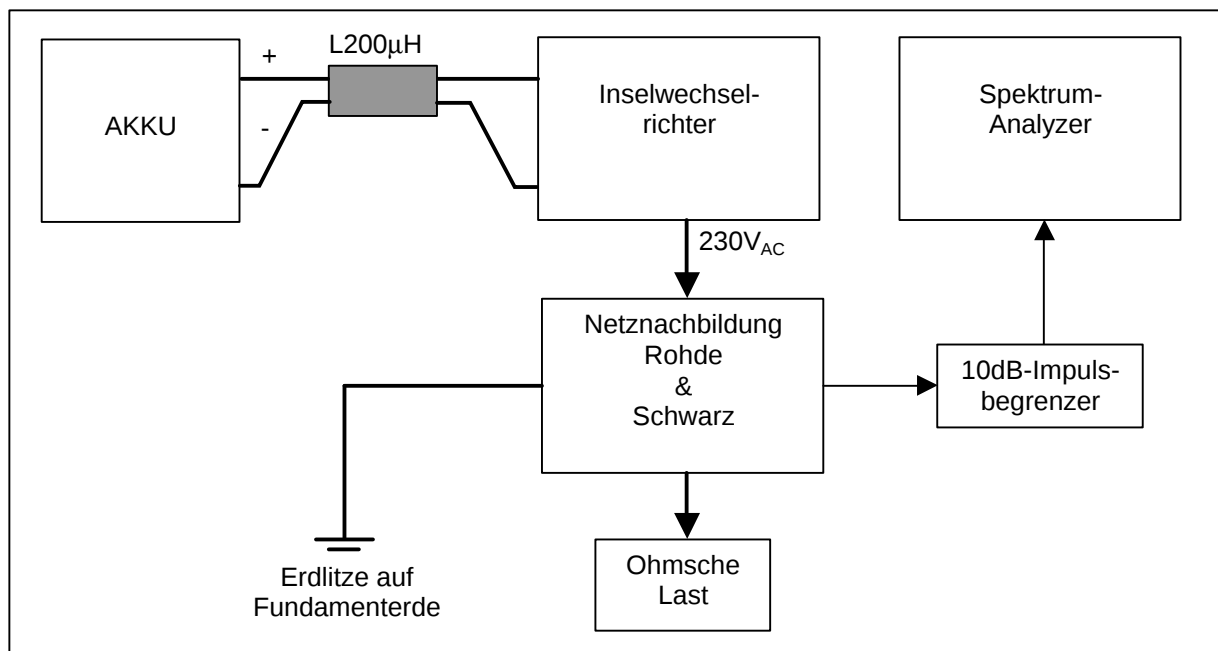


Bild 50: Messaufbau für die EMV-Messung auf der AC-Seite.

3.4.2 Beschreibung der Messung

Um bei einem Inselwechselrichter bezüglich EMV die gleiche Qualität wie das Wechselstromnetz zu erreichen, ist es sinnvoll, für AC-Seite die gleichen Normen wie für das Netz anzuwenden, d.h. die EN 55014 für Haushaltgeräte (siehe Netzverbundwechselrichter) resp. EN50081-1 (Norm für Wohnumgebung / Leichtindustrie). Die höchste Taktfrequenz eines Inselwechselrichters liegt meist unter 100 kHz, deshalb werden kaum Störungen oberhalb 30 MHz generiert. Für die Beurteilung der Gleichstromseite ist dagegen die für die DC-Seite gültige Norm und die entsprechenden Grenzwerte zu verwenden (siehe Netzverbundwechselrichter).

Für die Beurteilung des Wechselrichters werden Messungen bei Leerlauf und bei Nennlast mit ohmschen Verbrauchern durchgeführt.

3.5 EMV-Verhalten auf der DC-Seite

3.5.1 Messaufbau

Für die EMV-Messung auf der DC-Seite werden folgende Messgeräte und Betriebsmittel verwendet:

- Akku-Speisung
- 10dB Impulsbegrenzer ESH 3-Z2
- Ohmsche Last: Leistungswiderstand von Maxim
- Spektrum Analyzer Advantest R3261A
- Netznachbildung ESH2_Z5 von Rohde und Schwarz
- Passiver Tastkopf ESH 2-Z3

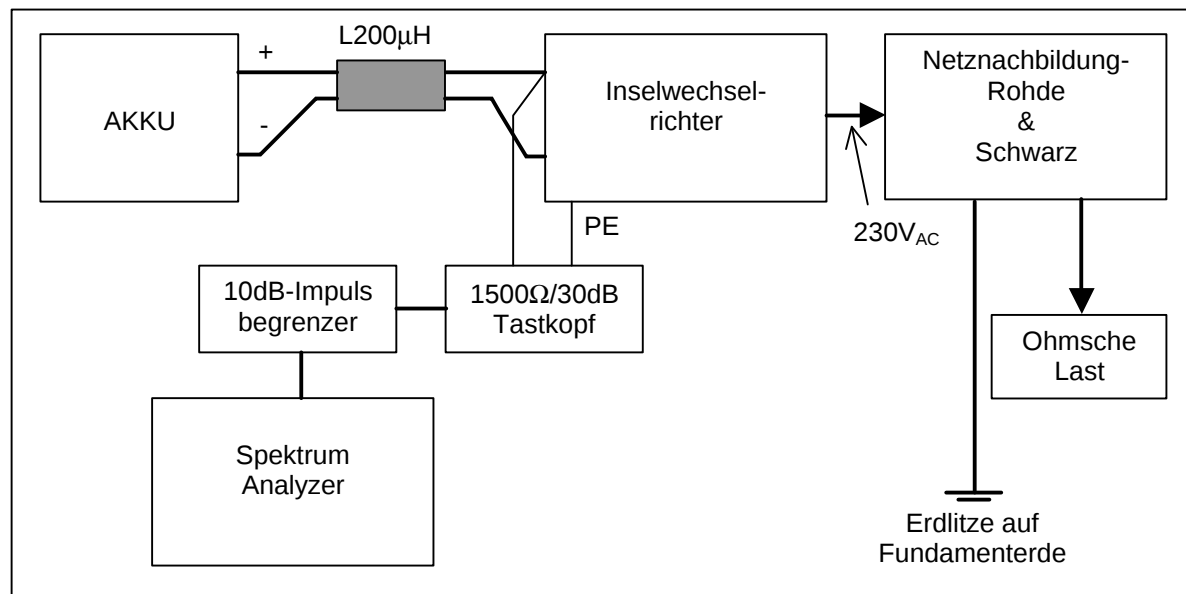


Bild 51: Messaufbau für die EMV-Messung auf der DC-Seite.

3.5.2 Grenzwerte

Es gelten die gleichen Normen (EN55014) wie bei den Netzverbund-Wechselrichtern.

3.5.3 Beschreibung der Messung

Für die Beurteilung des Wechselrichters werden Messungen bei Leerlauf und bei Nennlast mit ohmschen Verbrauchern durchgeführt.

3.6 Überlastverhalten

3.6.1 Messaufbau

Für die Messung des Überlastverhaltens werden folgende Messgeräte und Betriebsmittel verwendet:

- Power Analyzer PM3000A oder PM3300
- PC mit GPIB-Schnittstellenkarte und Messsoftware
- Akkuspeisung
- LEM-Shunt
- Verteilbox
- Verschiedene Culatti-Widerstände zwischen 4Ω und $5k\Omega$ als variable Verbraucher

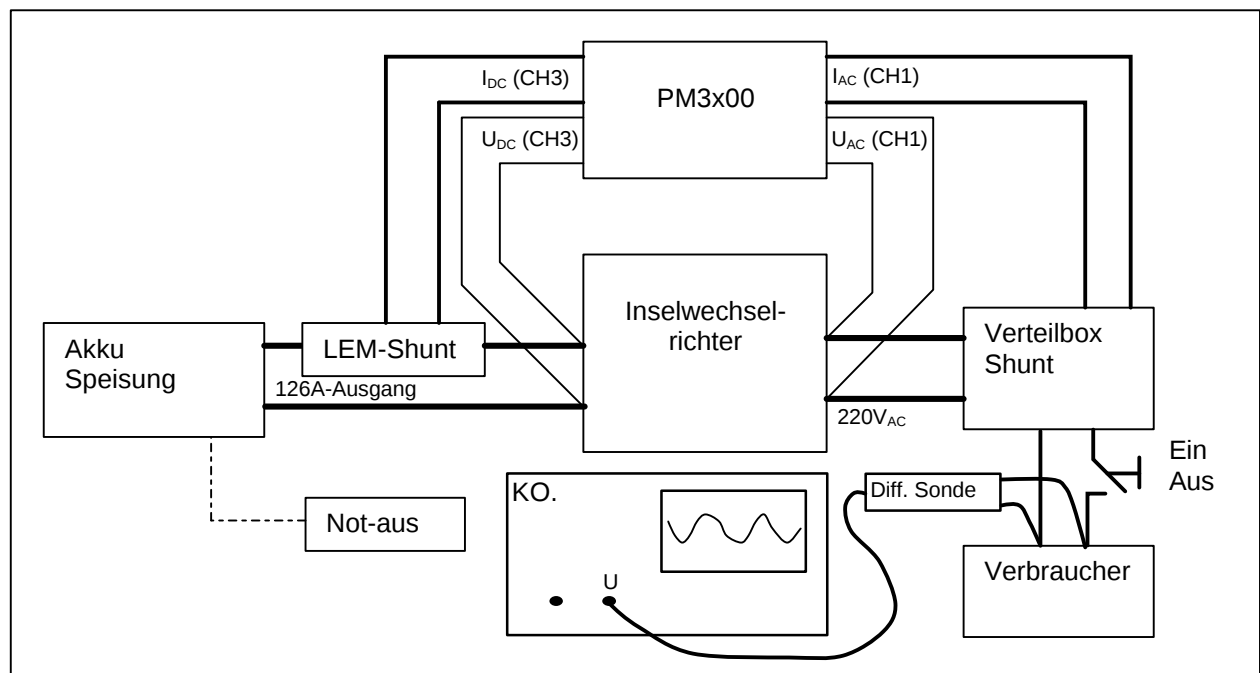


Bild 52: Messaufbau für die Messung des Überlastverhaltens.

3.6.2 Beschreibung der Messung

Es werden folgende Überlast-Verhalten untersucht:

- Einschalten eines Verbrauchers (siehe auch transientes Verhalten).
Ein Inselwechselrichter mit einem guten elektronischen Überlast-Verhalten soll auch Verbraucher speisen, die eine hohe Einschaltleistung (2,5 bis 3 mal die Nennleistung während einige Zehntel Sekunden) aufweisen.
- Kurzzeitiger Überlastbetrieb (von einigen Sekunden bis eine halbe Stunde).
Ein Inselwechselrichter mit einem guten thermischen Überlast-Verhalten soll während kurzer Zeit auch Verbraucher speisen können, die eine etwas grössere Leistung als die Nennleistung des Wechselrichters haben.

3.7 Transientes Verhalten

3.7.1 Messaufbau

Für die Messung des transienten Verhaltens werden folgende Messgeräte und Betriebsmittel verwendet:

- Akkuspeisung
- Oszilloskop (KO)
- Differentialsonde
- LEM-Wandler
- Verschiedene Culatti-Widerstände zwischen 4Ω und $5k\Omega$ als variable Verbraucher

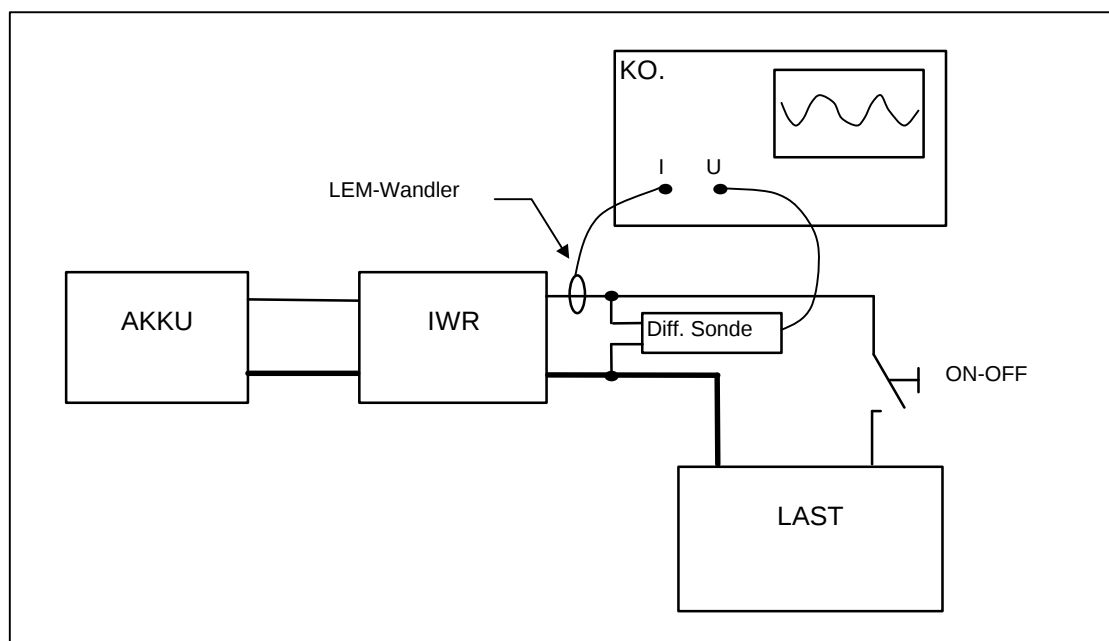


Bild 53: Messaufbau für die Messung des transienten Verhalten.

3.7.2 Beschreibung der Messung

Bei dieser Messung wird das Verhalten des Wechselrichters bei grossen und schnellen Laständerungen kontrolliert. Dazu wird der Wechselrichter im stationären Zustand betrieben (Leerlauf oder Teillast) und wahlweise eine weitere Last dazu geschaltet.

4 Testresultate Inselwechselrichter

4.1 Twin Power SI1224

4.1.1 Technische Daten (Herstellerangaben):

Hersteller:	Studer Innovative Technik, CH-3977 Granges
Nennleistung P_{AC} :	1200W
Nennspannung: U_{DC} :	24V
Eingangsspannungsbereich:	22,8V ... 31,9V
Ausgangsspannung:	Sinus 230V $\pm$ 3%, 50Hz $\pm$ 0,01%
Transformator:	2 (20VA und 1200VA)
Zulässiger $\cos \varphi$:	0,6 ... 1

4.1.2 EMV- Verhalten auf der AC-Seite:

$P_{AC} = 1200W$

☐ ++ ☐ + ☐ 0 ☐ - ☒ --

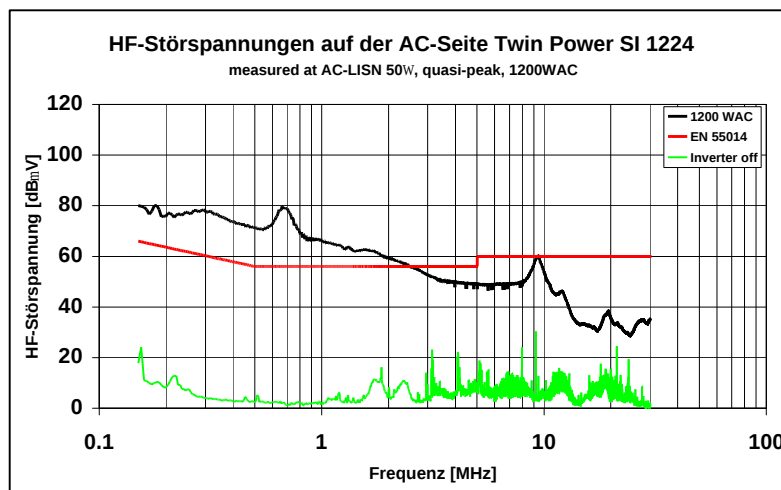


Bild 54:

HF-Störspannungen, die der Twin Power SI1224 auf der AC-Seite produziert, im Vergleich zu den Grenzwerten nach EN55014.

4.1.3 EMV- Verhalten auf der DC-Seite:

$P_{AC} = 1200W$

☐ ++ ☐ + ☐ 0 ☐ - ☒ --

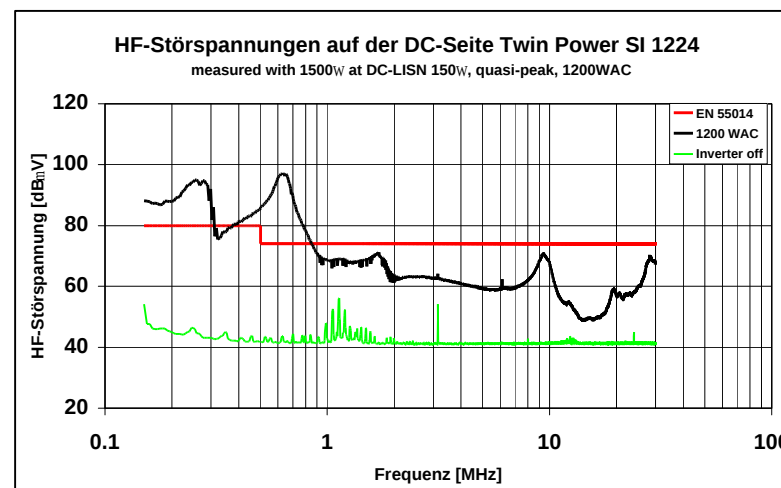
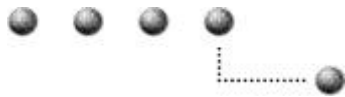


Bild 55:

HF-Störspannungen, die der Twin Power SI1224 auf der DC-Seite produziert, im Vergleich zu den Grenzwerten nach EN55014.



4.1.4 Oberschwingungsspannungen:

Verwendete Norm:

1. $P_{AC} = 1200W$
2. $P_{AC} = 400W$

EN61000-2-2

☒ ++	☐ +	☐ 0	☐ -	☐ --
☒ ++	☐ +	☐ 0	☐ -	☐ --

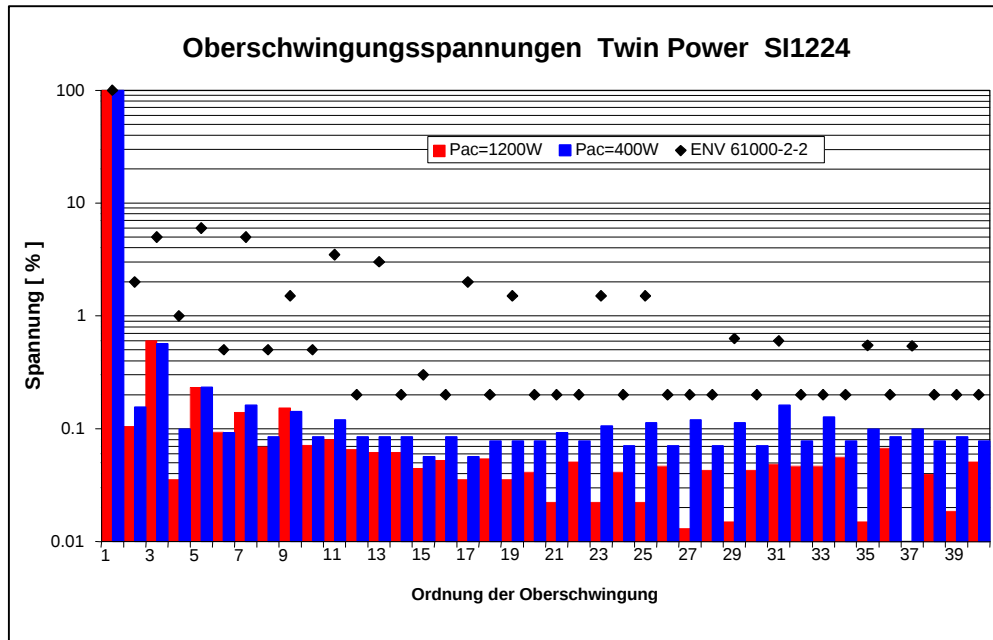


Bild 56:

Spannungsoberschwingungen eines Twin Power SI1224 im Vergleich zu den Grenzwerten nach EN61000-2-2. Die gemessenen Werte liegen auch bei Vollast weit unter den Grenzwerten.

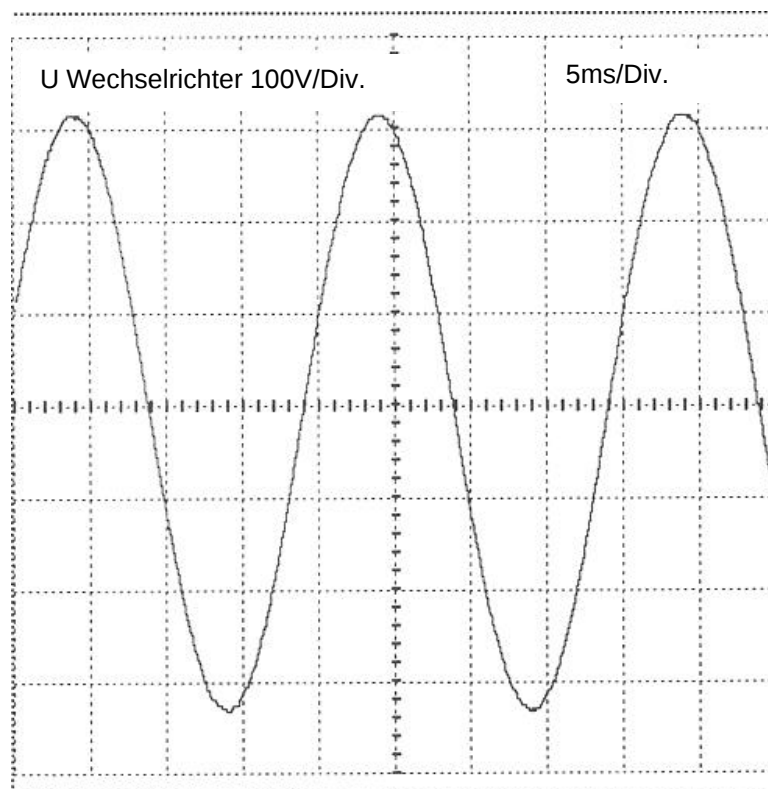


Bild 57:

Ausgangsspannung eines Twin Power SI1224 bei einer ohmschen Last von 300W. Der Regelkreis arbeitet optimal, die Spannung weist eine sehr gute Sinusform auf.

4.1.5 Wirkungsgrad bei ohmscher Last:

$P_{ACN} = 1200W$

Wirkungsgrad bei

5% P_{ACN} :	85,9%
10% P_{ACN} :	92,0%
20% P_{ACN} :	93,9%
30% P_{ACN} :	94,2%
50% P_{ACN} :	93,6%
100% P_{ACN} :	90,8%
Europäischer Wirkungsgrad:	92,6%

Maximaler Wirkungsgrad

94,2% bei **33%** von P_{ACN}

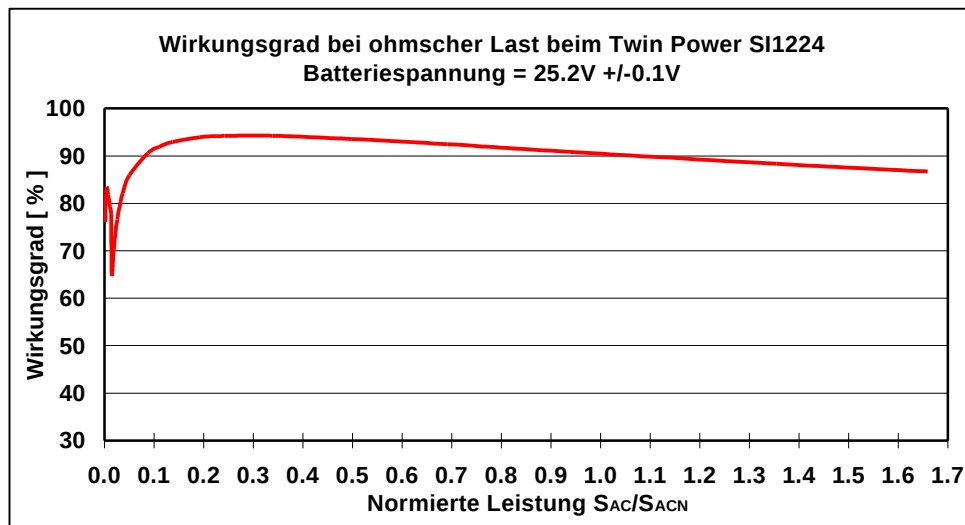


Bild 58:

Wirkungsgrad eines Twin Power SI1224 mit rein ohmscher Last. Bei kleinen Leistungen ist der kleine Trafo (20VA) in Betrieb. Bei grösseren Leistungen schaltet das Geräte um auf den grossen Trafo (1200VA).

4.1.6 Wirkungsgrad bei ohmscher/induktiver Last:

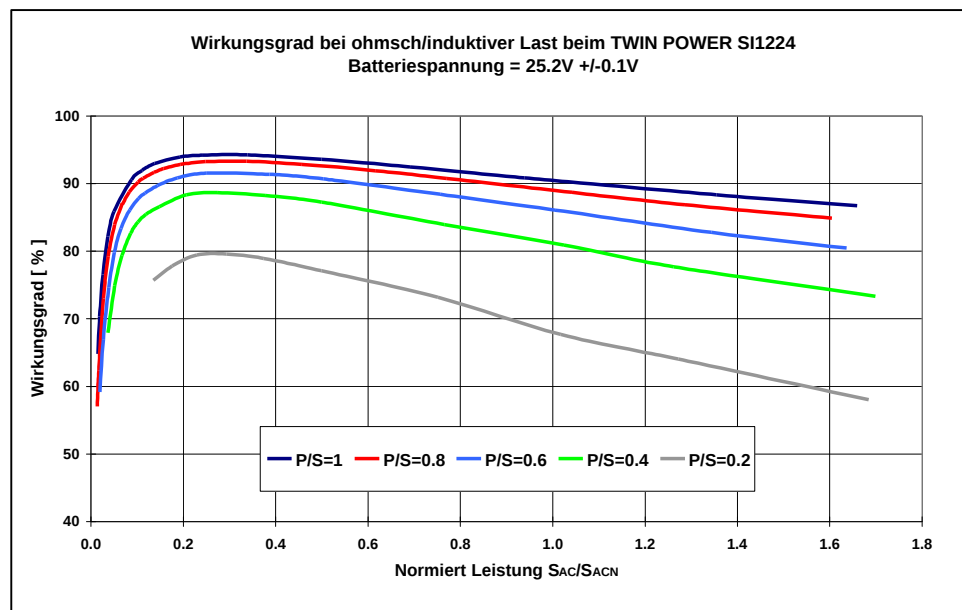


Bild 59:

Wirkungsgrad eines Twin Power SI1224 bei verschiedenen Werten des Leistungsfaktors $\cos \varphi = P/S$. Der Wechselrichter wurde im Betriebsmodus Lock gemessen, das heisst das Gerät arbeitet nur mit dem grossen Trafo.

4.1.7 Überlastverhalten

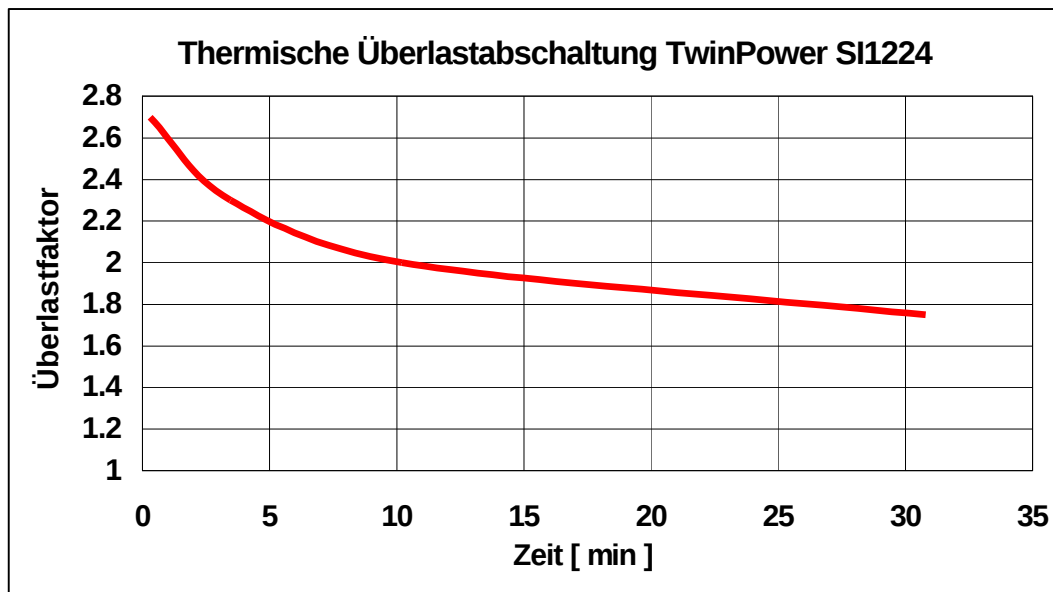


Bild 60:

Mögliche Betriebszeit im Überlastbetrieb bei ohmscher Last in Funktion des Überlastfaktors P_{AC}/P_{ACN} beim Wechselrichter Twin Power SI1224.

4.1.8 Transientes Verhalten

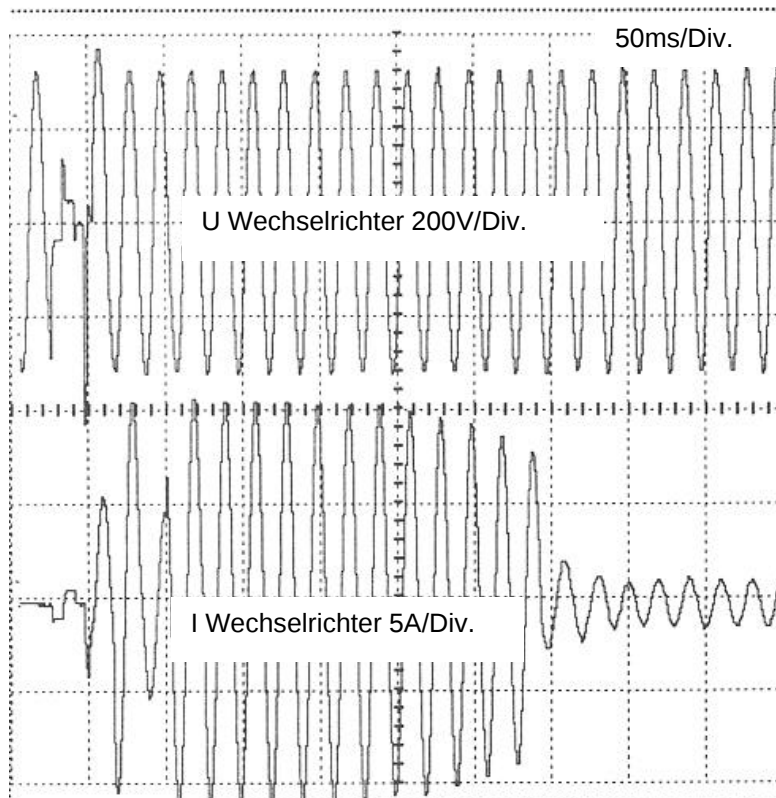


Bild 61:

Einschalten eines 90W Kühlschranks. Die Ausgangsspannung bricht während ca. 30ms beinahe total zusammen. Der Grund ist die Umschaltung auf den grossen Transformator. Danach ist die Ausgangsspannung stabil.



4.2 ASP TOPCLASS 13/24

4.2.1 Technische Daten:

Hersteller:	ASP Advanced Solar Products AG, CH-8637 Laupen
Nennleistung P_{DC} :	1300W
Nennspannung: U_{DC} :	24V
Eingangsspannungsbereich:	21V ... 32V
Ausgangsspannung:	Sinus 225V $\pm$ 2%, 50Hz $\pm$ 0.5%
Transformator:	1
Zulässiger $\cos \varphi$:	0,3 ... 1

4.2.2 EMV- Verhalten auf der AC-Seite:

$P_{DC} = 1300W$

☐ ++ ☐ + ☒ 0 ☐ - ☐ --

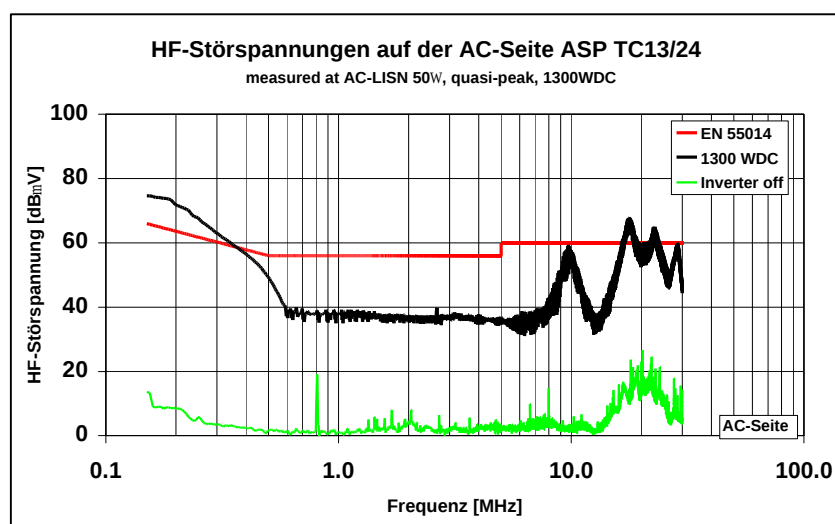


Bild 62:

HF-Störspannungen, die der ASP TC13/24 auf der AC-Seite produziert, im Vergleich zu den Grenzwerten nach EN55014.

4.2.3 EMV- Verhalten auf der DC-Seite:

$P_{DC} = 1300W$

☐ ++ ☐ + ☐ 0 ☒ - ☐ --

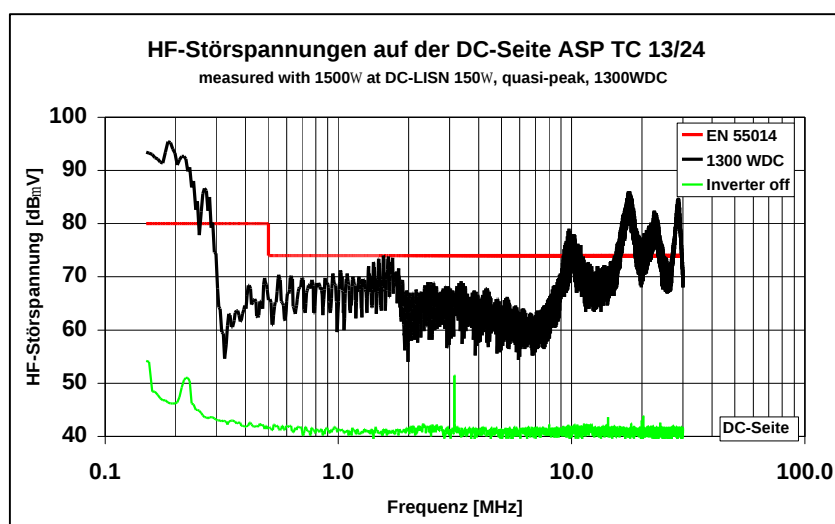
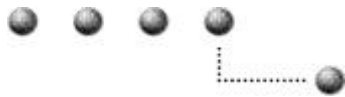


Bild 63:

HF-Störspannungen, die der ASP TC13/24 auf der DC-Seite produziert, im Vergleich zu den Grenzwerten nach EN55014.



4.2.4 Oberschwingungsspannungen:

Verwendete Norm:

1. $P_{AC} = 1200W$
2. $P_{AC} = 300W$

EN61000-2-2

☒ ++	☐ +	☐ 0	☐ -	☐ --
☒ ++	☐ +	☐ 0	☐ -	☐ --

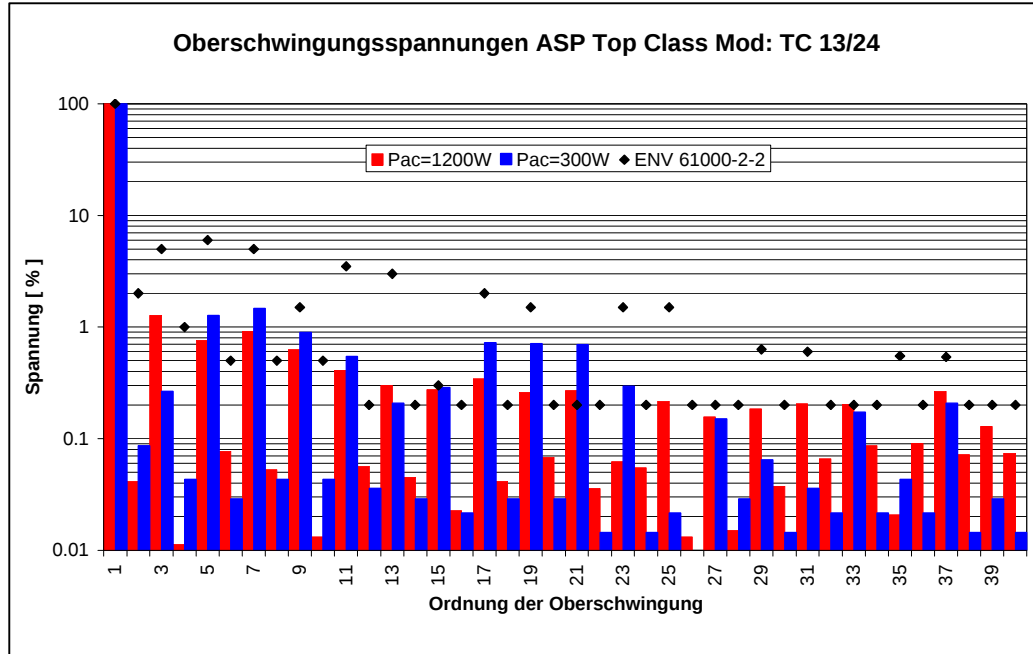


Bild 64:

Spannungsoberschwingungen eines ASP TC 13/24 im Vergleich zu den Grenzwerten nach der EN61000-2-2. Trotz dem leicht verzerrten Sinus gemäss Bild 65 werden die Grenzwerte noch nicht überschritten.

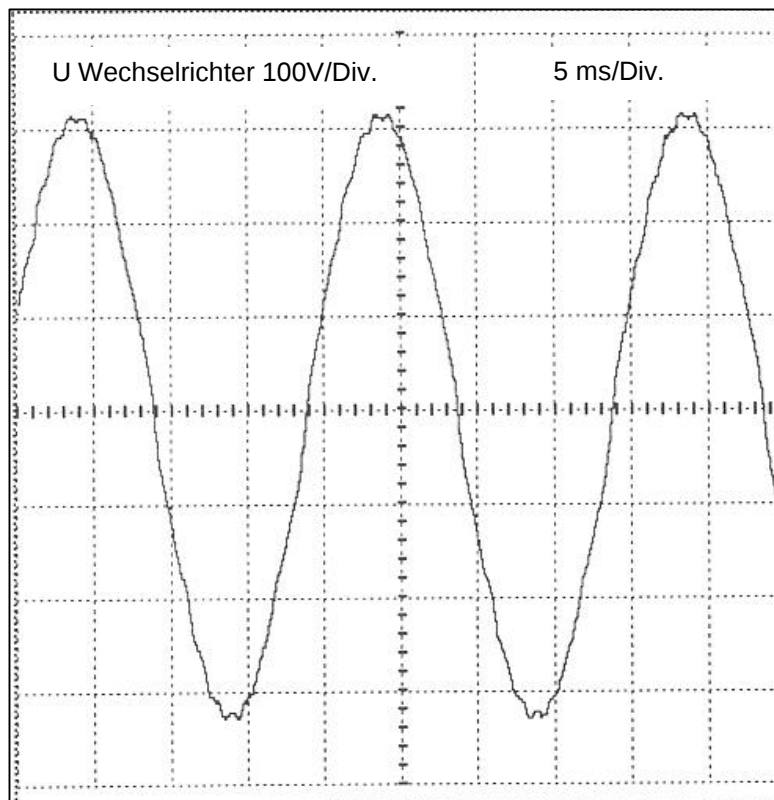


Bild 65:

Ausgangsspannung eines TC 13/24 bei einer ohmschen Last von 300W. Der Regelkreis arbeitet nicht ganz optimal, was an den Spitzen des Sinus zu erkennen ist.

4.2.5 Wirkungsgrad bei ohmscher Last:

$P_{DCN} = 1300W$

Wirkungsgrad bei

5% P_{DCN} :	87,4%
10% P_{DCN} :	92,1%
20% P_{DCN} :	93,8%
30% P_{DCN} :	94,0%
50% P_{DCN} :	93,2%
100% P_{DCN} :	89,2%
Europäischer Wirkungsgrad:	92,3%

Maximaler Wirkungsgrad

94,1% bei **25%** von P_{DCN}

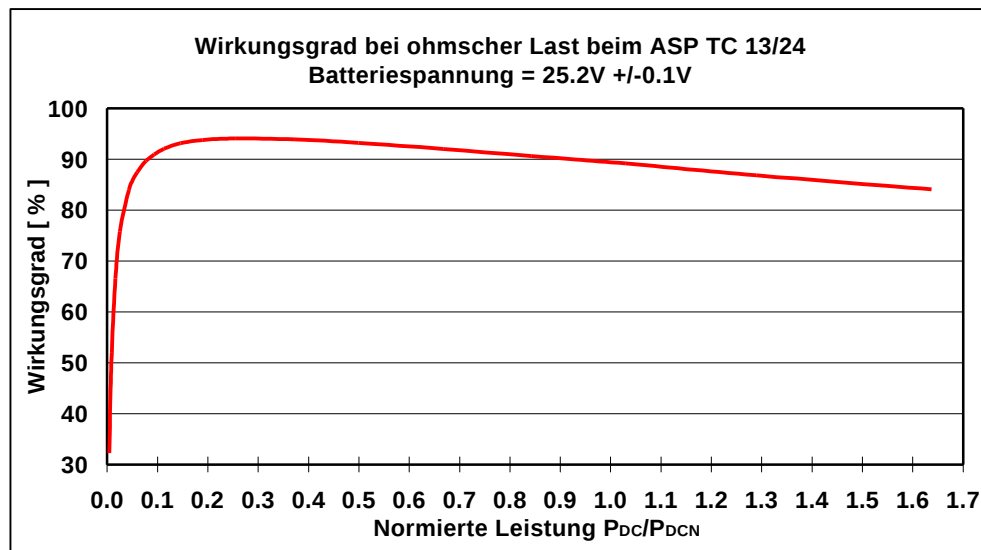


Bild 66: Wirkungsgradkennlinie eines ASP TC 13/24 mit rein ohmscher Last.

4.2.6 Wirkungsgrad bei ohmscher/induktiver Last:

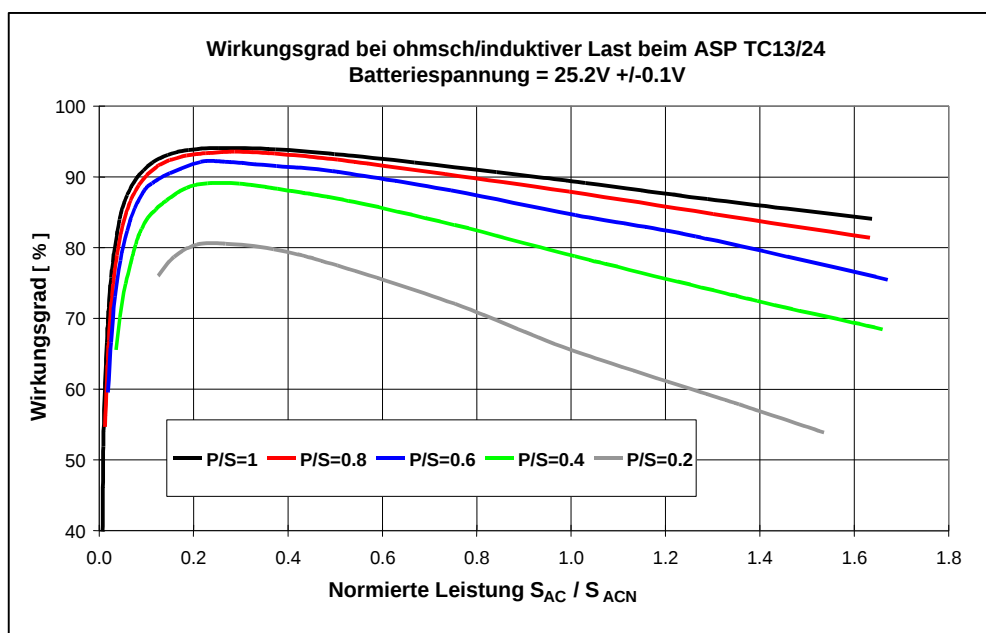


Bild 67: Wirkungsgrad eines ASP TC13/24 bei verschiedenen Werten des Leistungsfaktors $\cos \varphi = P/S$.

4.2.7 Überlastverhalten

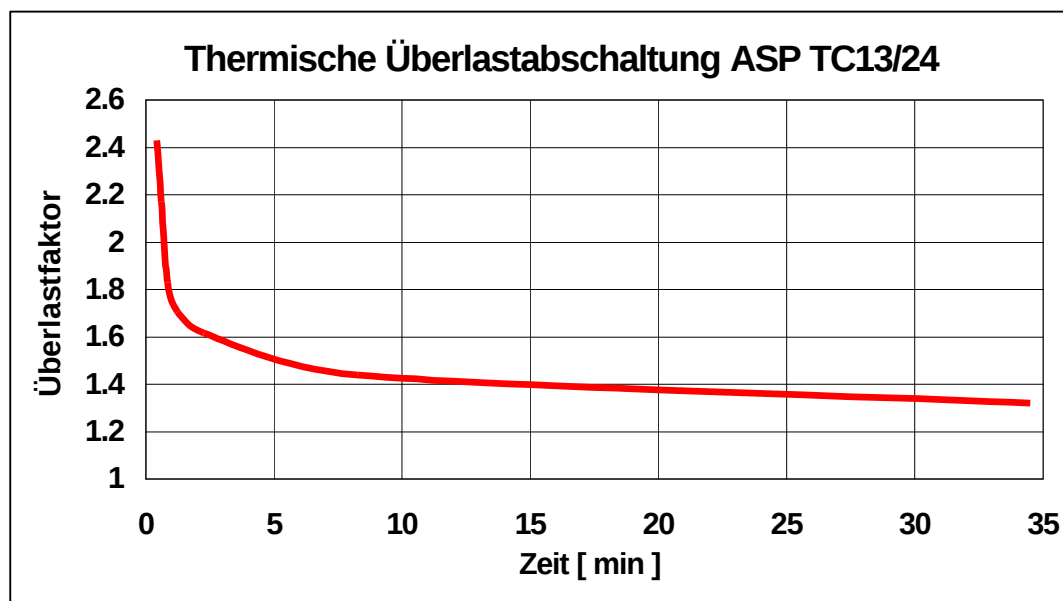


Bild 68:

Mögliche Betriebszeit im Überlastbetrieb bei ohmscher Last in Funktion des Überlastfaktors P_{DC}/P_{DCN} beim Wechselrichter ASP TC 13/24.

4.2.8 Transientes Verhalten

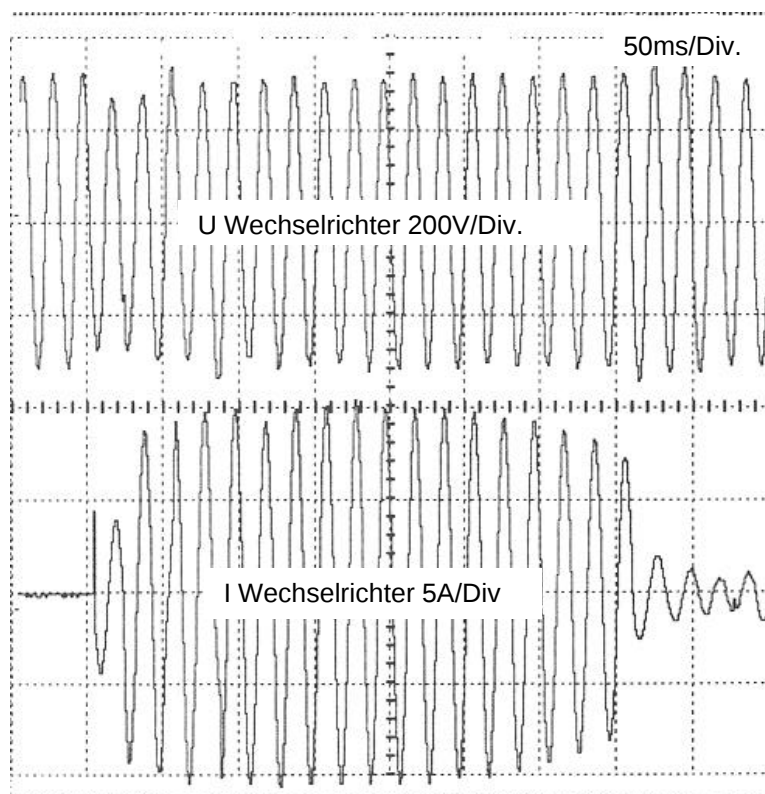


Bild 69:

Einschalten eines 90W Kühltankkompressors.

Der Regelalgorithmus zeigt leichte Schwächen, in dem die Spannung zum Einschaltzeitpunkt um ca. 10% sinkt. Danach ist die Spannung nicht stabil und am Ende, als der Anlaufvorgang abgeschlossen ist, steigt die Spannung noch einmal um ca. 10%.