

Literaturrecherche zu den Emissionen von nichtionisierender Strahlung von Photovoltaikanlagen

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

Dokument Nr. R1174712004

03. Dezember 2013

Impressum

Auftraggeber Bundesamt für Umwelt BAFU
Abteilung Luftreinhaltung und NIS
3003 Bern

Tel. 031 322 93 81
Fax 031 324 01 37

Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt,
Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK)

Auftragnehmer maxwave AG
Andreasstrasse 11
CH-8050 Zürich

Tel. 043 299 70 00
Fax 043 299 70 09

Begleitung BAFU Frank Brügger

Prüfbericht Nr. R1174712004

Verfasser Georg Klaus
CTO

Datum: 03.12.2013 Unterschrift:



Freigabe Sara Spitzmüller

Datum: 03.12.2013 Unterschrift:



Dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Bei kopierten oder elektronisch versandten Berichten gilt im Zweifelsfalle das bei maxwave abgelegte Dokument.

Inhaltsverzeichnis

Impressum	2
Inhaltsverzeichnis	3
Zusammenfassung	5
Résumé	6
Riassunto	7
1. Ausgangslage	8
2. Vorbemerkungen zur themenrelevanten Literatur und zum Vorgehen	9
3. Aufbau einer Photovoltaik-Anlage	10
3.1. Prinzipieller Aufbau.....	10
3.2. Bemessungsgrundlagen	10
3.3. Photovoltaik-Generator	11
3.4. Gleichstromnetzwerk.....	12
3.5. Wechselrichter	12
3.6. Wechselspannungsnetzwerk	13
3.7. Leistungsoptimierer	14
3.8. Räumliche Anordnung von PV-Anlagen	14
4. Themenrelevante Aspekte von Photovoltaik-Anlagen	15
4.1. NIS und EMV	15
4.2. Normative Situation hinsichtlich NIS	15
4.3. Normative Situation hinsichtlich EMV	16
4.4. PV-Anlage als Quelle von NIS (Übersicht).....	17
4.5. PV-Generator als Quelle von NIS	18
4.6. Gleichstromnetzwerk als Quelle von NIS.....	19
4.7. Wechselrichter als Quelle von NIS	22
4.8. Leistungsoptimierer als Quelle von NIS.....	30
4.9. Wechselspannungsnetzwerk als Quelle von NIS	31
4.10. NIS-Situation in der Nacht	31
5. Messungen der Immissionen einer PV-Anlage	32
5.1. Allgemeines.....	32
5.2. 50 Hz-Magnetfelder des Wechselrichters	33
5.3. Hochfrequente Emissionen des Wechselrichters	34
5.4. Hinweise für allfällige NIS-Messungen an PV-Anlagen.....	44



6.	Wissenslücken, Schlussfolgerungen und Empfehlungen.....	46
6.1.	Wissenslücken im DC-Pfad	46
6.2.	Wissenslücken bei Wechselrichtern und Leistungsoptimierern	46
6.3.	Wissenslücken im AC-Pfad.....	47
6.4.	Empfehlungen zur Minimierung der Strahlung	47
7.	Abkürzungen / Begriffe.....	48
8.	Literatur.....	49
A	Anhang	53
A.1.	Umrechnung der EMV-Limitierungen auf NIS-Werte.....	53
A.1.1.	EMV-Mess- und NIS-Bezugsdistanzen	53
A.1.2.	Summierungsvorschrift bei Immissionen mit mehreren Frequenzen	53
A.1.3.	Spitzenwert, Quasi-Spitzenwert und Mittelwert.....	54
A.1.4.	Umrechnung von Spannungen auf Ströme	56
A.2.	NIS-Interpretation der EMV-Normen bei Frequenzen über 150 kHz	57
A.2.1.	Leitungsgeführte Emissionen auf AC-Leitungen (150 kHz - 30 MHz)	57
A.2.1.1.	Einzelfrequenzen und geometrische Summierung.....	58
A.2.1.2.	Lineare Summierung.....	59
A.2.2.	Leitungsgeführte Emissionen (DC-Leitungen)	60
A.2.2.1.	Einzelfrequenzen und geometrische Summierung gemäss NISV	60
A.2.2.2.	Lineare Summierung gemäss NISV	61
A.2.3.	Feldgeführte Emissionen (gestrahlte Emissionen; 30 MHz - 6 GHz)	62
A.3.	Beispiel für einen Standort mit angrenzenden Wechselrichtern	63

Zusammenfassung

Photovoltaikanlagen (PV-Anlagen) emittieren elektrische und magnetische Felder in verschiedenen Frequenzbereichen. Drei Module sind dafür verantwortlich:

- Der Photovoltaikgenerator als Bereich, in dem Licht in elektrische Energie umgewandelt wird, ist eine Quelle von Gleichströmen und Gleichspannungen und damit auch eine Quelle elektro- und magnetostatischer Felder.
- Der Wechselrichter als Wandler zwischen dem Gleichstrom des PV-Generators und der 50-Hz-Wechselspannung der elektrischen Energieversorgung ist eine Quelle von nieder- und hochfrequenter Strahlung.
- Die Wechselstrominstallationen zwischen Wechselrichter und dem Verknüpfungspunkt mit der öffentlichen Energieversorgung sind Quellen von energietechnischen Feldern (50 Hz und Oberwellen).

Die Literaturrecherchen und eigene theoretische und messtechnische Untersuchungen zeigen, dass die Immissionen einer PV-Anlage gemessen an den Immissionsgrenzwerten der Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV) an den typischen Aufenthaltsorten von Menschen gering sind.

Die Strahlung des PV-Generators und die wechselstromseitige Strahlung lassen sich durch eine sorgfältige und kontrollierte Installation und Leitungsführung begrenzen.

Beim Wechselrichter als Hauptquelle verschiedenster Formen nichtionisierender Strahlung sorgen die verbindlich einzuhaltenden EMV-Vorschriften (EMV: elektromagnetische Verträglichkeit) für eine massgebliche Emissionsbegrenzung. Messungen zeigen, dass - zumindest bei den untersuchten Wechselrichtern - die Strahlung auch in den Frequenzlücken der EMV-Normen nicht auffällig ist. Die Strahlung klingt mit zunehmender Entfernung vom Wechselrichter ab. Durch richtiges Platzieren des Wechselrichters lässt sich die nichtionisierende Strahlung so weit reduzieren, dass diese im Rahmen der heute sonst üblichen Strahlung der technischen Geräte liegt. Photovoltaikanlagen haben zudem die "angenehme" Eigenschaft, dass die nichtionisierende Strahlung nachts verschwindet.

Die nichtionisierende Strahlung von PV-Anlagen kann durch folgende Massnahmen grundsätzlich und unabhängig von irgendwelchen Grenzwertbetrachtungen reduziert werden:

- DC-seitig ist auf eine sorgfältige Installation zu achten. Insbesondere sind Plus- und Minusleiter nahe zusammen zu führen.
- Für die Reduktion der Hochfrequenzstrahlung am Aufenthaltsort von Menschen ist auf eine ausreichende Distanz zwischen Wechselrichter und Mensch zu achten. Schon nach wenigen Metern ist der Einfluss des Wechselrichters kaum noch feststellbar.
- AC-seitig sollten wenn möglich Mehrleiterkabel verwendet werden.

Résumé

Les installations photovoltaïques (installations PV) émettent des champs électriques et magnétiques dans différentes gammes de fréquence. Trois modules sont responsables de ces émissions:

- Le générateur photovoltaïque – c'est-à-dire la partie de l'installation dans laquelle la lumière est convertie en énergie électrique – est source de courants continus et de tensions continues, et par conséquent de champs électro- et magnétostatiques.
- L'onduleur – qui transforme le courant continu délivré par le générateur photovoltaïque en courant alternatif de 50 Hz (fréquence du réseau électrique) – est source de rayonnement de haute et basse fréquences.
- Les installations à courant alternatif situées entre l'onduleur et le point de connexion au réseau public d'électricité génèrent des champs de 50 Hz et harmoniques.

Les recherches effectuées par les auteurs dans la littérature spécialisée, conjuguées à leurs propres mesures et études théoriques, montrent que par rapport aux valeurs limites fixées dans l'ordonnance sur la protection contre le rayonnement non ionisant (ORNI) les immissions des installations PV sont minimales dans les lieux de séjour typiques de l'être humain.

Il est possible de limiter le rayonnement du générateur photovoltaïque et de la partie AC de l'installation PV en réalisant ces éléments, en particulier le tracé des conducteurs, de façon contrôlée et avec le plus grand soin.

S'agissant de l'onduleur, qui constitue la source principale des formes de rayonnement non ionisant les plus diverses, les prescriptions – impératives – sur la compatibilité électromagnétique (CEM) assurent une limitation déterminée des émissions. Les mesures montrent, du moins pour les onduleurs étudiés, que le rayonnement n'est pas particulièrement suspect dans les fréquences non couvertes par les normes CEM. De plus, le rayonnement diminue au fur et à mesure qu'on s'éloigne de l'onduleur. En installant l'onduleur au bon endroit, on peut donc réduire le rayonnement non ionisant de manière à ce qu'il se situe dans la plage aujourd'hui habituelle pour les appareils techniques. Les installations PV se distinguent en outre par le fait qu'elles n'émettent pas de rayonnement pendant la nuit.

Indépendamment des valeurs limites, il est par principe possible de réduire le rayonnement non ionisant des installations PV en adoptant les mesures suivantes:

- Côté DC, il faut veiller à ce que l'installation soit réalisée avec soin. Les conducteurs positif et négatif doivent en particulier être menés à proximité l'un de l'autre.
- Pour réduire le rayonnement haute fréquence dans les lieux où séjournent des personnes, il faut veiller à ce que la distance entre l'onduleur et ces dernières soit suffisante. Il suffit d'une distance de quelques mètres pour que les effets de l'onduleur cessent pratiquement d'être perceptibles.
- Côté AC, il faudrait si possible utiliser des câbles multiconducteurs.

Riassunto

Gli impianti fotovoltaici generano campi elettrici e magnetici in gamme di frequenze differenti. Tre moduli sono responsabili di queste emissioni:

- il generatore fotovoltaico, inteso quale sezione in cui la luce viene trasformata in energia elettrica, è una fonte di corrente continua e di tensione costante e, quindi, anche una fonte di campi elettrostatici e magnetostatici;
- l'invertitore, inteso quale trasformatore fra la corrente continua del generatore fotovoltaico e la tensione alternata a 50 Hz dell'approvvigionamento di energia elettrica è una fonte di radiazioni a bassa e ad alta frequenza;
- le installazioni a corrente alternata montate fra l'invertitore e il punto di collegamento con l'approvvigionamento di energia elettrica pubblica sono fonti di campi a 50 Hz e relative armoniche.

Le ricerche documentali e proprie indagini teoriche e metrologiche indicano che le immissioni di un impianto fotovoltaico, sono basse nei luoghi tipici di soggiorno delle persone rispetto ai valori limiti d'immissione sanciti dall'ordinanza sulla protezione dalle radiazioni non ionizzanti (ORNI), ridotte.

Le radiazioni del generatore fotovoltaico e quelle prodotte dalla corrente alternata possono essere limitate mediante un'installazione e un instradamento accurati e controllati.

Le emissioni dell'invertitore, fonte principale di radiazioni non ionizzanti di forme differenti, possono essere limitate in misura determinante rispettando le prescrizioni vincolanti nell'ambito della compatibilità elettromagnetica (CEM). Almeno per quanto attiene agli invertitori esaminati, le misurazioni dimostrano che le radiazioni sono deboli anche negli intervalli di frequenza non definiti dalle norme CEM. Le radiazioni si affievoliscono più aumenta la distanza dall'invertitore. Un posizionamento corretto dell'invertitore consente di ridurre le radiazioni non ionizzanti al livello delle radiazioni emesse normalmente oggi dagli apparecchi tecnici. Gli impianti fotovoltaici presentano la comoda peculiarità di non emettere le radiazioni non ionizzanti durante la notte.

Le radiazioni non ionizzanti degli impianti fotovoltaici possono essere ridotte adottando le seguenti misure:

- nella parte di impianto della corrente continua, garantire un'installazione accurata, ad esempio posizionando il più vicino possibile i conduttori positivo e negativo;
- garantire una distanza sufficiente fra l'invertitore e le persone al fine di ridurre le radiazioni ad alta frequenza nel luogo di soggiorno (una distanza di pochi metri è sufficiente per quasi annullare l'influsso dell'invertitore);
- nella parte di impianto della corrente alternata, utilizzare se possibile un cavo multipolare.

1. Ausgangslage

Nachdem der Bundesrat am 25. Mai 2011 die neue Energiestrategie des Bundes bekannt gegeben hat, nach welcher die Schweiz schrittweise aus der Atomenergie aussteigen soll, nimmt das Interesse der Öffentlichkeit an den so genannten erneuerbaren Energien zu.

Eine mögliche Technologie zur elektrischen Energieerzeugung aus erneuerbaren Quellen ist die Photovoltaik. Bei neuen Technologien interessieren nebst den Chancen immer auch die einhergehenden Begleiterscheinungen und "Nebenwirkungen".

Im Zusammenhang mit Photovoltaikanlagen (PV-Anlagen) wird vermehrt die Frage aufgeworfen, inwiefern PV-Anlagen eine Quelle von nichtionisierender Strahlung (NIS) darstellen und wie stark diese nichtionisierende Strahlung in Räume einwirkt, in denen sich Menschen längere Zeit aufhalten können.

PV-Anlagen erzeugen Gleichströme, welche mittels so genannter Wechselrichter auf die 50-Hz-Netzbedingungen der öffentlichen Stromversorgung umgewandelt werden. Während die Photovoltaikmodule (PV-Module) auf dem Dach oder an der Fassade eines Gebäudes angebracht sind, werden die Wechselrichter an sehr unterschiedlichen Orten installiert, z.B. im Dachgeschoss in der Nähe der PV-Module, im Untergeschoss in der Nähe der elektrischen Haupteinspeisung oder auch irgendwo dazwischen. In allen Fällen müssen zusätzliche Leitungen im Gebäude verlegt werden, welche – im Vergleich zu den übrigen Leitungen der elektrischen Hausinstallation - nicht unerhebliche Ströme führen können. Neben der fallweise augenfälligen Nähe zwischen einzelnen Elementen einer PV-Anlage und dem Aufenthaltsort von Menschen sind aus der Praxis auch Fälle bekannt, wo PV-Anlagen in der Nachbarschaft Störungen, z.B. in Empfängern des Kurzwellenfunkes, verursacht haben. Die Frage ist also durchaus berechtigt, inwiefern die elektromagnetischen Felder einer PV-Anlage das Innenraumklima hinsichtlich nichtionisierender Strahlung beeinflussen können.

Um den heutigen Wissenstand erfassen zu können, hat das Bundesamt für Umwelt den Auftrag formuliert, das vorhandene Wissen zum Thema der nichtionisierenden Strahlung von Photovoltaikanlagen zu sammeln, zu sichten und die daraus gewonnenen Erkenntnisse darzustellen.

2. Vorbemerkungen zur themenrelevanten Literatur und zum Vorgehen

Die Literaturrecherche hat gezeigt, dass sich der überwiegende Teil der Literatur zur Photovoltaik mit der Funktionsweise, dem Aufbau, der Installation und dem Betrieb, also mit den Chancen von PV-Anlagen, befasst. Die themenrelevanten Aspekte der nichtionisierenden Strahlung als "lästige" Nebeneffekte, spielen in der Fachliteratur eine sehr untergeordnete Rolle. Wenn überhaupt, wird die Thematik meist unter dem Titel "Elektrosmog" ganz am Rande und oft ohne quantitativ präzise Angaben behandelt. Auch eigenständige Publikationen zum Thema "Elektrosmog von Photovoltaikanlagen" sind in der Regel allgemein gehalten [Bopp1, 2, 4; Brin; Heine1, 2; Newe; Vasi].

Mehr Bedeutung wird dem Thema der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) eingeräumt [Bopp3; Dege1, 2, 3; Erge; Graf; Häbe1, 2, 3; Heine1, 2; Piaz].¹ Die Einhaltung von EMV-Vorschriften für elektronische Geräte ist heute weltweit verpflichtend geregelt. Auch die Netzbetreiber sind daran interessiert, dass am öffentlichen Netz betriebene Anlagen nur in einem verträglichen Mass Netzurückwirkungen erzeugen und andere am Netz betriebene Geräte nicht beeinträchtigt werden.

Die EMV-Vorschriften für PV-Anlagen sind nicht unmittelbar themenrelevant. Sie betreffen jedoch dieselben Strahlungsquellen, welche auch für die NIS-Aspekte massgebend sind, und sie liefern deshalb sehr nützliche Parameter, um die themenrelevanten Einflüsse zumindest abschätzen zu können. Mangels geeigneter Literatur werden im Übrigen vorliegend auch eigene Modellrechnungen und Abschätzungen vorgenommen.

Im Rahmen dieses Berichts wird für NIS-Betrachtungen von einer NIS-Bezugsdistanz von 50 cm ausgegangen. Diese Minimaldistanz basiert auf der Annahme, dass sich die PV-Anlage in einem anderen Raum befindet als der massgebende Aufenthaltsort von Menschen (Anhang A.1.1.).

¹ Die EMV soll sicherstellen, dass sich elektrische Systeme in sich selbst und untereinander nicht stören.

3. Aufbau einer Photovoltaik-Anlage

3.1. Prinzipieller Aufbau

Im Folgenden wird der typische Aufbau einer PV-Anlage kurz dargestellt. Das Augenmerk richtet sich dabei auf die themenrelevanten Elemente. Aspekte, welche die nichtionisierende Strahlung kaum beeinflussen, werden bewusst weggelassen. Die Betrachtungen beschränken sich auf PV-Anlagen mit flächigen PV-Modulen wie sie typischerweise auf Dächern oder an Fassaden installiert werden.

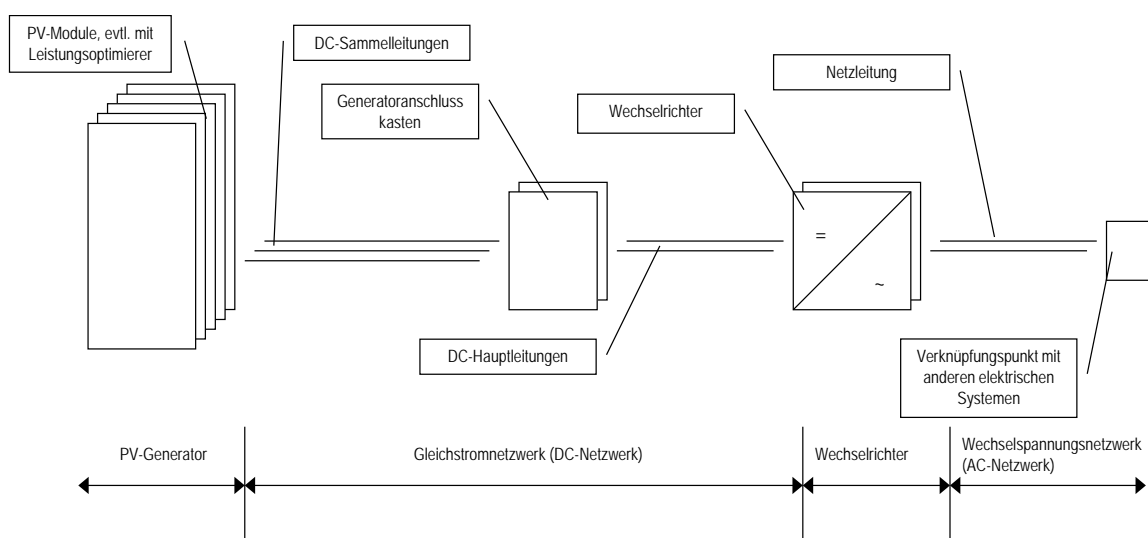


Abbildung 1: Prinzipieller Aufbau einer Photovoltaik-Anlage

Im Wesentlichen besteht eine PV-Anlage aus folgenden themenrelevanten Elementen:

- Photovoltaik-Generator (PV-Generator), evtl. mit Leistungsoptimierer
- Gleichstromnetzwerk (DC-Netzwerk)
- Wechselrichter
- Wechselspannungsnetzwerk (AC-Netzwerk)

3.2. Bemessungsgrundlagen

Als Bemessungsgrundlagen für PV-Anlagen dienen die so genannten Standard-Testbedingungen (STC: Standard Test Conditions) [Häbe1]. Sie basieren auf einer Sonneneinstrahlung mit einer Bestrahlungsstärke von $1'000 \text{ W/m}^2$, einem definierten Lichtspektrum und einer Zelltemperatur von 25°C . Diese STC-Annahmen beschreiben weitgehend die Bedingungen an einem sehr sonnigen Tag in Mitteleuropa. In Ausnahmefällen kann die Bestrahlungsstärke etwas über $1'000 \text{ W/m}^2$ liegen. So ist es beispielsweise in Bergregionen möglich, dass das Licht nicht nur direkt, sondern auch als Reflexion an Schnee- oder Eisflächen auf die PV-Module einwirkt und die Strahlung zudem wegen der geringeren Atmosphärendicke weniger gedämpft wird als

im Mittelland. Auch bei lockerer, heller Bewölkung um die Sonne kann die Bestrahlungsstärke kurzzeitig etwas höher werden (so genannte Cloud Enhancements, bei denen die Bestrahlungsstärke bis gegen $1'300 \text{ W/m}^2$ steigen kann) [Häbe1, p.33]. Trotz dieser Ausnahmefälle sind die Standard-Testbedingungen von $1'000 \text{ W/m}^2$, auf denen auch die meisten Spezifikationen in den Datenblätter der PV-Komponenten beruhen, eine sehr gute Basis zur Bestimmung der NIS-relevanten Parameter einer PV-Anlage. In den erwähnten, seltenen Extremsituationen sind Überhöhungen im Bereich weniger zehn Prozent und keine Abweichungen um Grössenordnungen möglich [Häbe1, p.337].

3.3. Photovoltaik-Generator

Der Photovoltaik-Generator (PV-Generator) ist derjenige Teil der Anlage, welcher die Lichtenergie in elektrische Energie umwandelt.

Das Grundelement für die Umwandlung ist die Photozelle (Photodiode). Die Photozelle gibt einen von der Bestrahlungsstärke abhängigen Gleichstrom ab. Elektrisch gesehen arbeitet die Photozelle als Stromquelle. Bei einer gleich bleibenden Bestrahlungsstärke ist der Strom weitgehend konstant und die Spannung ergibt sich nach dem Ohm'schen Gesetz aus dem Strom und der Last.

Mehrere Photozellen werden seriell und parallel zu grösseren so genannten Photovoltaikmodulen (PV-Module, auch Solarmodule genannt) zusammengeschaltet und als vorgefertigte Einheiten produziert. Die typische Modulfläche liegt bei etwa 1.5 m^2 . Im praktischen Betrieb wird die Belastung der PV-Module durch den nachgeschalteten Wechselrichter so geregelt, dass die Module möglichst die maximale elektrische Leistung abgeben können. Der Arbeitspunkt der maximalen Leistung wird als "Maximum Power Point (MPP)" bezeichnet. Der typische Strom eines PV-Modules beträgt unter STC-Bedingungen etwa 6 - 8 A. Die Modulspannung im MPP variiert je nach Modulgrösse zwischen etwa 20 und 50 Volt.

Zum Aufbau eines PV-Generators werden oft mehrere Module zu einem so genannten "String" (auch als "Strang" bezeichnet) seriell hintereinander geschaltet. Durch die Serieschaltung addieren sich in einem String die Spannungen der einzelnen PV-Module, während der "Stringstrom" gleich dem Modulstrom bleibt. Der Strom eines Strings beträgt damit etwa 8 A. Aus verschiedenen technisch-physikalischen Gründen werden PV-Module höchstens soweit in Serie geschaltet, dass die maximale Summenspannung unter $1'000 \text{ Volt}$ bleibt.² Typisch für grosse PV-Anlagen sind Spannungen von etwa 800 V. Bei kleinen Anlagen (z.B. bei Einfamilienhäusern) liegt die Spannung in der Regel unter 200 V.

Bei grösseren Solaranlagen werden mehrere Strings gebildet.

Die Leistungsfähigkeit eines PV-Generators ist insofern begrenzt, als in heutigen PV-Modulen nur etwa 15% der Strahlungsenergie der Sonne in elektrische Energie umgewandelt werden

² Die Stringspannung darf die maximal zulässigen Spannungen des Wechselrichters, der PV-Module und der Kabel und Stecker nicht überschreiten. Da Isolationsmaterialien mit zunehmender Spannung aufwändiger werden, mit zunehmender Spannung grössere Isolationsabstände eingehalten werden müssen und nur Gleichspannungen von höchstens $1'500 \text{ V}$ als Niederspannung gelten [NIV] werden die Komponenten einer PV-Anlage auf maximale Spannungen unter $1'000 \text{ V}$ ausgelegt.

kann. Aus der Leistungsdichte der Sonnenbestrahlung von $1'000 \text{ W/m}^2$ (STC-Bedingung) kann pro Quadratmeter also etwa 150 W elektrische Leistung "geerntet" werden.

3.4. Gleichstromnetzwerk

Unter dem Gleichstromnetzwerk (DC-Netzwerk) wird im Folgenden die gesamte generatorseitige Verkabelung verstanden. Das Gleichstromnetzwerk "sammelt" die elektrische Energie des PV-Generators und transportiert diese zum Wechselrichter.

Besteht ein PV-Generator aus mehreren Strings, so können diese in einem so genannten Generatoranschlusskasten (GAK) parallel geschaltet werden. Vom GAK wird die elektrische Energie über eine DC-Hauptleitung einem zentralen Wechselrichter zugeführt. Die Spannung auf der DC-Hauptleitung entspricht im Wesentlichen der Stringspannung, der Strom der Summe der Stringströme.

Die Stringleitungen können auch direkt mit so genannten Stringwechselrichtern verbunden werden (ein Wechselrichter je String). In diesem Fall entfällt der GAK.

Da Verluste im DC-Netzwerk die Effizienz einer PV-Anlage reduzieren, wird bei der Auslegung von PV-Anlagen insbesondere auf geringe Leitungsverluste geachtet. Kleinere Leitungsverluste können mit höherer Spannung bei entsprechend kleineren Strömen oder mit grösseren Leiterquerschnitten, verbunden mit höheren Investitionskosten, erreicht werden. Die Zuleitungsverluste sind mitverantwortlich, dass tendenziell mit vergleichsweise hohen Gleichspannungen und kleinen Strömen gearbeitet wird.

Die Kabellängen in einem Gleichstromnetzwerk können stark variieren. Bei einer kleineren PV-Anlage ohne GAK auf einem Einfamilienhaus beträgt die Länge der Stringleitung je nach Ort des Wechselrichters etwa 10 bis 30 m. Bei PV-Anlagen auf grossen Dächern können die DC-Hauptleitungen zwischen GAK und Wechselrichter mehrere 100 m lang sein. In der Regel werden im DC-Netzwerk Einzelleiter verwendet (getrennte Leiter für "Plus" resp. "Minus").

Insbesondere für sehr kleine PV-Anlagen gibt es auch Lösungen, wo der Wechselrichter direkt beim oder auf dem Modul angebracht ist (Modulwechselrichter). In diesen Fällen entfällt das gesamte Gleichstromnetzwerk.

3.5. Wechselrichter

Der Wechselrichter regelt den Arbeitspunkt und wandelt die gleichförmig erzeugte elektrische Energie des PV-Generators in die elektrische Energieform der Starkstromversorgung mit einer Frequenz von 50 Hz um.

In einer ersten Umwandlungsstufe sorgt ein getakteter Regler dafür, dass der PV-Generator möglichst gut im MPP arbeitet und damit ein Maximum an elektrischer Energie geerntet werden kann. Der Regler wird als MPPT (Maximum Power Point Tracker) oder MPT (Maximum Power Tracker) bezeichnet [z.B. Häbe1]. Bei dieser Umwandlung wird im Wechselrichter eine Zwischenspannung mit einem neuen Gleichspannungsniveau erzeugt.

In der zweiten Stufe erfolgt die Frequenzwandlung von 0 Hz auf 50 Hz. Dazu wird die Zwischenspannung (0 Hz) in die Form eines PWM-Signals zerhackt (PWM: Pulsweitenmodulation) und daraus die 50-Hz-Wechselspannung gebildet. Bei netzgekoppelten Wechselrichtern wird die anliegende Netzspannung elektronisch erfasst und mittels einer Regelschaltung erfolgt die phasensynchrone Einspeisung ins Netz.

Neben den eigentlichen Nutzsignalen am Ein- und Ausgang des Wechselrichters (Gleichstrom am Eingang und 50-Hz-Wechselstrom am Ausgang) treten im Wechselrichter auch die intern notwendigen getakteten Signale zur Regelung und zur Frequenzwandlung auf. Die Taktfrequenzen dieser an sich rein internen Signale liegen je nach Produkt und Anwendung zwischen ca. 4 kHz und ca. 200 kHz. Die getakteten Signale moderner Wechselrichter zeichnen sich durch sehr steile Schaltflanken mit entsprechend kurzen Schaltzeiten aus. Nur so sind eine kompakte Bauform und eine verlustarme Umwandlung überhaupt möglich. Neben der Taktfrequenz entstehen damit auch Oberschwingungen, welche sich wegen der steilen Schaltflanken über ein grösseres Frequenzband erstrecken können. Ausserhalb eines Wechselrichters werden die Taktsignale nicht benötigt und die Spuren dieser Taktsignale sind unerwünscht, jedoch nie ganz zu vermeiden. Wie diese unerwünschten Signalspuren - letztlich sind es Störsignale - kostengünstig unterdrückt und verwischt werden können, ist in der Regel ein gut gehütetes Geheimnis der Wechselrichter-Hersteller.

Sinkt der Strom des PV-Generators am Eingang des Wechselrichters unter ein gewisses Minimum, so schalten sich die meisten Wechselrichter ab. Dies geschieht beispielsweise nachts oder wenn die Solarmodule stark beschattet oder mit Schnee bedeckt sind. Der Strom im DC-Netzwerk ist dann nahe Null und die Signalspuren des Wechselrichters verschwinden.

3.6. Wechselspannungsnetzwerk

Das Wechselspannungsnetzwerk (AC-Netzwerk) umfasst die Leitungen zwischen dem Wechselrichter und dem Anschlusspunkt an die Hausinstallation oder an das öffentliche Niederspannungsnetz. Grundsätzlich wird die gesamte Energie der PV-Anlage übernommen. Die Leiterströme sind proportional zur elektrischen AC-Leistung der Solaranlage. Je nach Wechselrichter und Grösse der PV-Anlage handelt es sich um einphasige oder um dreiphasige Verbindungen. Werden mehrere Wechselrichter eingesetzt (z.B. mehrere Stringwechselrichter) so kann das Wechselspannungsnetzwerk mehrere letztlich parallel geschaltete Leitungen umfassen. Die Leitungslängen können je nach Ort des Wechselrichters sehr unterschiedlich sein. In der Regel werden AC-seitig Mehrleiterkabel mit verdrehten Adern verwendet. Bei sehr leistungsstarken PV-Anlagen mit entsprechend grossen Strömen kommen auch Einzelleiter zum Einsatz.

3.7. Leistungsoptimierer

Leistungsoptimierer sind kleine elektronische Module, welche die sonst im Wechselrichter integrierte MPPT-Funktion übernehmen. Die Leistungsoptimierer werden direkt beim einzelnen PV-Modul oder kleinen Modulgruppen angebracht und können auch ins PV-Modul integriert werden. Dadurch, dass das MPP-Tracking im Prinzip für jedes Modul einzeln erfolgt, kann die Solaranlage laufend im "Optimum" betrieben werden, auch dann, wenn einzelne Module beispielsweise verschattet sind. Als Wechselrichter können in Kombination mit Leistungsoptimierern einfachere Geräte verwendet werden, weil die MPPT-Funktion im Wechselrichter entfällt.

Auch mit Leistungsoptimierern wird das DC-Netzwerk grundsätzlich bei 0 Hz betrieben, d. h. zwischen Leistungsoptimierer und Wechselrichter fließt Gleichstrom. Das MPP-Tracking im Leistungsoptimierer erfolgt allerdings – wie sonst im Wechselrichter – über leistungselektronische Vorgänge. Die dabei erzeugten internen Signale können auch hier als unerwünschte Signalspuren über das DC-Netzwerk abstrahlen.

Die Verbreitung von praxistauglichen Leistungsoptimierern ist derzeit noch klein (Stand Frühjahr 2013), dürfte jedoch rasch zunehmen.

3.8. Räumliche Anordnung von PV-Anlagen in Gebäuden

Letztlich bestimmt der Standort des Wechselrichters die räumliche Anordnung und Ausdehnung einer PV-Anlage innerhalb eines Gebäudes.

In vielen Fällen werden die Wechselrichter in der Nähe oder direkt in der Elektro-Hauptverteilung angebracht (nahe beim Verknüpfungspunkt zum öffentlichen Netz). Die Elektro-Hauptverteilung liegt oft in einem der untersten Geschosse. Damit ist das DC-Netzwerk ausgedehnt (Kap.3.4) und das AC-Netzwerk sehr kurz. Die Wechselrichter sind in diesen Fällen meist mehrere Meter vom Aufenthaltsort von Menschen entfernt.

Insbesondere um die Verluste auf der DC-Seite klein zu halten werden die Wechselrichter auch im Estrich oder in den obersten Geschossen angebracht. In diesen Fällen umfasst das DC-Netzwerk nur den Dachbereich, während die AC-Seite ausgedehnter ist. Je nach Situation ist es dabei durchaus möglich, dass Wechselrichter unmittelbar an Wohnräume angrenzen (siehe Anhang A.3).

Die Wechselrichter können auch irgendwo zwischen Dach und Untergeschoss, z.B. in einem Abstellraum, angebracht sein. In diesen Fällen sind die DC- und AC-Netzwerke entsprechend ausgedehnt und je nach Situation können auch hier Wohn- oder Büroräume angrenzen.

4. Themenrelevante Aspekte von Photovoltaik-Anlagen

4.1. NIS und EMV

Nichtionisierende Strahlung kann sowohl auf Lebewesen wie auch auf elektrische Geräte einwirken. In der Regel wird von nichtionisierender Strahlung (NIS) gesprochen, wenn davon Lebewesen betroffen sind. Sind elektrische Geräte betroffen, wird der Begriff "elektromagnetische Verträglichkeit" (EMV) verwendet. Diese Unterscheidung manifestiert sich beispielsweise in zwei unterschiedlichen Verordnungen des Bundesrats:

- Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV) [NISV]
- Verordnung über die elektromagnetische Verträglichkeit (VEMV) [VEMV]

Obwohl die Strahlung in beiden Fällen durch dieselben Quellen verursacht wird, ist die NISV ein Teil der Umweltschutzgesetzgebung, während die VEMV unter das Elektrizitätsgesetz fällt.

Wie in Kap. 2 erwähnt, ist die Literatur zur NIS-Situation eher spärlich. Mehr Niederschlag in der Literatur finden die EMV-Aspekte. Dies auch, weil elektrische Geräte - insbesondere Empfangsgeräte der drahtlosen Kommunikation - gegenüber nichtionisierender Strahlung sehr empfindlich reagieren können und bei vergleichsweise niedrigen Signalpegeln ein Störpotential besteht.

Die EMV-Anforderungen an elektrische Geräte sind heute in einer Vielzahl von Normen geregelt, welche zum Teil verpflichtend einzuhalten sind. Sie umfassen sowohl maximal zulässige Pegel für die Emission wie auch Mindestanforderungen an die Störfestigkeit. Hinsichtlich der NIS-Thematik sind besonders die in der EMV maximal zulässigen Emissionen von Interesse. Fordert die EMV eine Begrenzung der Emissionen, so werden die Immissionen auf Lebewesen im gleichen Ausmass begrenzt.

Die Störfestigkeitsanforderungen der EMV sind für NIS-Aspekte nur insofern von Bedeutung, als aus Störfestigkeitsgründen - z.B. im Zusammenhang mit dem Blitzschutz einer PV-Anlage - Installationsvorschriften erlassen werden, welche die Einkopplung in das elektrische System klein halten sollen. Massnahmen für die Installation, wie beispielsweise das Kleinhalten von Induktionsschleifen, welche die Störeinkopplung gegenüber Blitzeinwirkungen begrenzen, begrenzen gleichermassen die Emissionen (Reziprozität).

Generell haben die EMV-Anforderungen den "angenehmen" Nebeneffekt, dass damit auch die NIS-Immissionen in Grenzen gehalten werden.

4.2. Normative Situation hinsichtlich NIS

Die in der Schweiz zulässige nichtionisierende Strahlung von ortsfesten Anlagen wird für den Aufenthaltsort von Menschen grundsätzlich durch die NISV geregelt. Eine Ausnahme bilden Emissionen von nichtionisierender Strahlung in Betrieben, soweit die Strahlung auf das Betriebspersonal einwirkt. In diesen Fällen kommen in der Schweiz die Regelungen der SUVA ("Grenzwerte am Arbeitsplatz" [SUVA]) zur Anwendung. Da die SUVA-Grenzwerte von der Belastbarkeit arbeitsfähiger Erwachsener ausgehen, sind sie weniger streng als die Grenzwerte der NISV, welche zum Ziel haben, alle Bevölkerungsgruppen zu schützen. Im Folgenden werden

deshalb ausschliesslich die Anforderungen der NISV weiter betrachtet. Sind die Anforderungen der NISV erfüllt, so sind auch die Grenzwerte der SUVA eingehalten.

Gemäss Anhang 2 NISV dürfen die NIS-Immissionen an allen Orten, an denen sich Menschen aufhalten können, die Grenzwerte gemäss Tabelle 1 nicht überschreiten. Zur Ermittlung dieser Immissionen sind alle nicht betriebseigenen Quellen von NIS, also grundsätzlich auch PV-Anlagen, zu berücksichtigen.

Beim gleichzeitigen Vorhandensein von mehreren Frequenzen sind auch die Summierungsvorschriften gemäss NISV, Anhang 2, Ziff. 22 zu beachten.

Frequenz	Elektrische Feldstärke [V/m]	Magnetische Flussdichte [μ T]	Mittelungsdauer
< 1 Hz	kein Grenzwert	40'000	höchster Effektivwert (keine Mittelung)
1 Hz	10'000	40'000	
50 Hz	5'000	100	
3 kHz – 100 kHz	87	6.25	
100 kHz – 150 kHz	87	6.25	6 Minuten
1 MHz	87	0.92	
10 MHz	28	0.092	
400 MHz	28	0.092	
2 GHz	61	0.2	
10 GHz	61	0.2	
10 GHz - 300 GHz	61	0.2	$68 / f^{1.05}$ (f: Frequenz in GHz)

Tabelle 1: Immissionsgrenzwerte für Feldgrössen gemäss NISV, Anhang 2, Ziff. 11; die Grenzwerte gelten für Strahlung die gleichmässig auf den ganzen Körper einwirkt.

Gestützt auf das Vorsorgeprinzip im Umweltschutzgesetz [USG] kennt die NISV für gewisse elektrische Anlagen vorsorgliche Emissionsbegrenzungen [NISV, Anhang 1]. Mit diesen vorsorglichen Emissionsbegrenzungen sollen insbesondere Orte mit empfindlicher Nutzung geschützt werden.

Für PV-Anlagen sind in der NISV keine vorsorglichen Emissionsbegrenzungen spezifiziert. Ob solche gestützt auf Artikel 4 Absatz 2 NISV im Einzelfall angeordnet werden könnten, ist eine rechtliche Frage, welche im vorliegenden Bericht nicht erörtert wird.

4.3. Normative Situation hinsichtlich EMV

Zur Sicherstellung einer ausreichenden Verträglichkeit zwischen verschiedenen elektrischen Systemen wird von jedem System ein gewisses Mass an Störfestigkeit verlangt und die Emissionen müssen derart reduziert werden, dass andere, teilweise sehr empfindliche Geräte, nicht gestört werden.

Die EMV-Vorschriften betreffen grundsätzlich alle Elemente einer PV-Anlage, insbesondere auch die Wechselrichter und Leistungsoptimierer.

Bezüglich NIS sind die Mindestanforderungen der EMV-Emissionsnormen ein geeignetes Hilfsmittel, um - zumindest in den von den EMV-Normen erfassten Frequenzbereichen - die maximalen Immissionen abschätzen zu können.

EMV-Vorschriften haben eine andere Zielsetzung als NIS-Vorschriften. Deshalb müssen die EMV-Anforderungen für NIS-Betrachtungen teilweise umgerechnet und uminterpretiert werden.

4.4. PV-Anlage als Quelle von NIS (Übersicht)

Im Folgenden werden die einzelnen Elemente einer PV-Anlage hinsichtlich der NIS-Aspekte näher betrachtet.

Zur Veranschaulichung kann die Abbildung 1 wie folgt ergänzt werden.

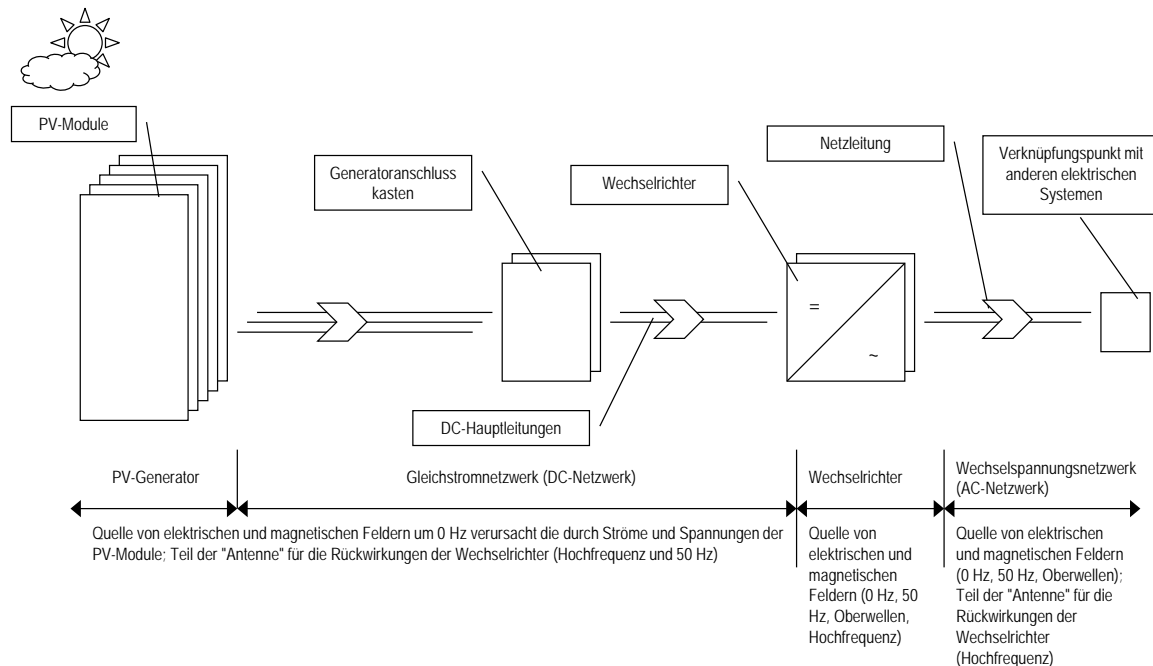


Abbildung 2: Themenrelevante Emissionen einer PV-Anlage

Neben dem eigentlichen Energieerzeugungspfad mit Gleichstrom vor und 50-Hz-Wechselstrom nach dem Wechselrichter ist der Wechselrichter selbst eine Quelle von nichtionisierender Strahlung. Neben der Tatsache, dass im Wechselrichter die gesamte Gleichstrom- und Wechselstromenergie konzentriert auftritt, wird im Wechselrichter auch die gesamte Energie "zerhackt" und damit in elektrische Energie bei höheren Frequenzen als 0 oder 50 Hz umgewandelt. Neben der direkten Abstrahlung können sich Spuren dieser höherfrequenten Anteile auch über die angeschlossenen Gleich- und Wechselstromleitungen ausbreiten. Diese Leitungen übernehmen bezüglich der Hochfrequenzabstrahlung die Funktion von "Antennen" und können aufgrund ihrer Längen durchaus effiziente Strahler sein.

Mit dem Einsatz von Leistungsoptimierern unmittelbar bei oder in den PV-Modulen entstehen zusätzliche, verteilte Quellen hochfrequenter Strahlung. Diese Strahlung ist dabei ähnlich wie die Strahlung der Wechselrichter. Technisch sind die Leistungsoptimierer im wesentlichen Gleichspannungswandler (getaktete DC/DC-Wandler).

4.5. PV-Generator als Quelle von NIS

Im Wesentlichen dominieren im PV-Generator Gleichströme (Quellen magnetostatischer Felder) und Gleichspannungen (Quellen elektrostatischer Felder).

Die Magnetfeldimmissionen sind direkt proportional zur Stromstärke. Quellen der Magnetfelder sind einerseits die Ströme innerhalb eines PV-Moduls und andererseits die Ströme in den Verbindungsleitungen zwischen den Modulen. Die maximalen Ströme liegen in beiden Fällen bei etwa 8 A. Die Magnetfelder sind in Leiternähe am Grössten. Unter der Annahme eines maximalen Stromes von 10 A und einer Entfernung vom Leiterzentrum von 1 cm beträgt die magnetische Flussdichte 200 μT . Das Magnetfeld klingt in unmittelbarer Leiternähe proportional zur Entfernung ab. Ab einer Entfernung, wo auch der Strom des Rückleiters einen massgeblichen Einfluss auf das Magnetfeld hat, ist die Abnahme mit der Distanz sogar überproportional. Zum Distanzverhalten der Magnetfelder in der Nähe von stromführenden Leitern sei auch auf Kapitel 4.6 verwiesen. Die Magnetfelder des PV-Generators sind statische Magnetfelder. Der hinsichtlich NIS-Betrachtungen massgebende Immissionsgrenzwert liegt bei 40'000 μT .

Die Spannungen über einem PV-Modul liegen bei 20 – 50 V. Durch Serienschaltung mehrerer Module zu einem String können Spannungen von mehreren hundert Volt entstehen (maximale Spannungen unter 1'000 V). Die Gleichspannungen sind Quellen von elektrostatischen Feldern. Da elektrostatische Felder in der NISV nicht begrenzt werden, wird auf weitere Betrachtungen verzichtet. Unabhängig von einer NIS-Relevanz werden statische oder pseudostatische elektrische Felder zudem bereits durch Materialien mit geringster elektrischer Leitfähigkeit fast vollständig abgeschirmt. Jegliche Dach- Wand- oder Fassadenkonstruktionen zwischen einer PV-Anlage und den Innenräumen eines Gebäudes wirken als effiziente Abschirmung gegenüber elektrostatischen Feldern.

Durch die Änderung der Bestrahlungsstärke, beispielsweise bedingt durch den Lauf der Sonne oder durch vorüber ziehende Wolkenfelder, kommt es zu langsamen Stromänderungen. Die Änderungen sind in der Regel so langsam, dass sie in Tabelle 1 Frequenzen unter 1 Hz zugeordnet werden können.

Leichte zeitliche Spannungsschwankungen entstehen neben den eben erwähnten Stromänderungen auch durch die Arbeitspunkt-Regelung der MPT-Stufe des Wechselrichters. Es handelt sich dabei in der Regel um Schwankungen im Zeitraum von Sekunden (Frequenzen unter 1 Hz). In speziellen Situationen kann es auch zu schnelleren Spannungsänderungen kommen [Häbe1, p. 318 ff].

Wechselrichter wie auch Leistungsoptimierer haben verschiedene Rückwirkungen auf die DC-Seite (MPP-Tracking, Rückwirkungen im Rhythmus der getakteten Signale, Rückwirkungen der 50 Hz Netzfrequenz, etc.). Diese vom Wechselrichter oder von den Leistungsoptimierern bedingten Beeinflussungen werden in Kapitel 4.7 resp. 4.8 näher betrachtet.

4.6. Gleichstromnetzwerk als Quelle von NIS

Die Quellen für elektrische und magnetische Felder im Gleichstromnetzwerk sind dieselben wie im PV-Generator. Die Feldemissionen werden verursacht durch die Gleichströme und Gleichspannungen. Wie bereits in Kap. 4.5 beschrieben, gibt es für statische elektrische Felder in der NISV weder Immissionsgrenzwerte noch vorsorgliche Emissionsbegrenzungen. Im Folgenden werden daher nur die Magnetfelder des Gleichstromnetzwerks näher betrachtet. Die NIS-Anforderungen an die elektrischen Feldemissionen werden als a priori eingehalten betrachtet.

Die vom PV-Generator im Gleichstromnetzwerk erzeugten Magnetfelder sind im Wesentlichen magnetische Gleichfelder. Wie in Kap. 4.5 beschrieben, können die zeitlichen Schwankungen Frequenzen unter 1 Hz zugeordnet werden und es gilt auch hier der Grenzwert von 40'000 μT .

Die massgebenden Einflussfaktoren für die Magnetfeldemissionen durch das DC-Netzwerk sind die Stromstärke und die Leiteranordnungen. Der Einfluss der Bausubstanz eines Gebäudes ist dagegen vernachlässigbar, weil die üblichen Baumaterialien niederfrequente Magnetfelder kaum abschirmen.

Zwischen Magnetfeld und Strom besteht ein linearer Zusammenhang (die Feldstärke ist proportional zum Strom). Der Zusammenhang zwischen Leiteranordnung und Magnetfeld ist komplexer. Ganz grundsätzlich sind die Magnetfeldemissionen umso kleiner, je näher zusammen Plus- und Minusleiter verlegt werden. In der Praxis findet man sehr unterschiedliche Leiteranordnungen [Frös, pp.43, 51]. Gemäss den geltenden Vorschriften (z.B. NIN) und auch gemäss den übereinstimmenden Empfehlungen in der Literatur [z.B. Falk, Frös, Häbe1, Stöck] sind Plus- und Minusleiter aus Blitzschutzgründen so zu verlegen, dass die Leiterschleifen klein gehalten werden:

Zitat NIN:

7.12.4.4.1 Schutz gegen elektromagnetische Beeinflussung (EMI, electromagnetic interference) in Gebäuden

Um durch Blitzschläge induzierte Spannungen zu verringern, muss die Fläche aller Leiterschleifen so gering wie möglich sein.

Entsprechend dieser Vorgabe werden heute die Stringleiter bei einer sorgfältigen Installation in einem gemeinsamen Rohr oder in einem gemeinsamen Kanal geführt. Gleiches gilt für die DC-Hauptleitungen.

Um die Magnetfeldemissionen in Abhängigkeit von den Leiterabständen zu veranschaulichen, wurden Modellrechnungen durchgeführt. Für die Feldberechnungen wird eine zylindrische Geometrie angenommen (unendlich langes, paralleles Leiterpaar als "Plus-" resp. "Minusleiter").

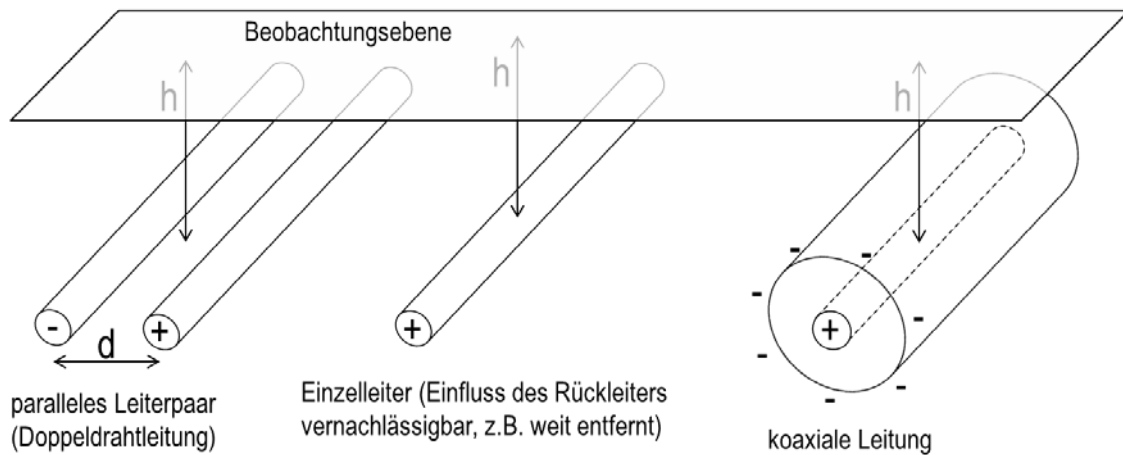


Abbildung 3: Leiteranordnungen

Die in Tabelle 2 aufgeführten Werte zeigen die maximale magnetische Flussdichte in einer im Abstand h parallel zur Leiterebene verlaufenden Beobachtungsebene und einem willkürlich angenommenen Strom von 100 A.

Abstand d zwischen Plus- und Minusleiter des Leiterpaars	Maximale magnetische Flussdichte bei 100 A in einer Beobachtungsebene im Abstand h über der Leiterebene:			
	h=10 cm	h=20 cm	h=50 cm	h=100 cm
1 cm	20 μT	5 μT	0.8 μT	0.2 μT
2 cm	40 μT	10 μT	1.6 μT	0.4 μT
5 cm	94 μT	25 μT	4.0 μT	1.0 μT
10 cm	160 μT	47 μT	8 μT	2 μT
20 cm	200 μT	80 μT	15 μT	4.0 μT
50 cm	200 μT	100 μT	32 μT	9.4 μT
100 cm	200 μT	100 μT	40 μT	16 μT
Einzelleiter	200 μT	100 μT	40 μT	20 μT
koaxiale Leitung	0 μT	0 μT	0 μT	0 μT

Tabelle 2: Magnetfeldimmissionen in Abhängigkeit des Abstandes d zwischen Plus- und Minusleiter und in Abhängigkeit von der Höhe h der Beobachtungsebene über der Leiterebene bei einem Strom von 100 A.

Die magnetische Flussdichte ist proportional zum Strom. Bei einer einzelnen Stringleitung und damit einem Strom von weniger als 10 A ist die magnetische Flussdichte mindestens zehnmal kleiner als die Werte in Tabelle 2.

Das grundsätzliche Distanzverhalten des Magnetfeldes in der Nähe eines Leiterpaares ist in Abbildung 4 dargestellt:

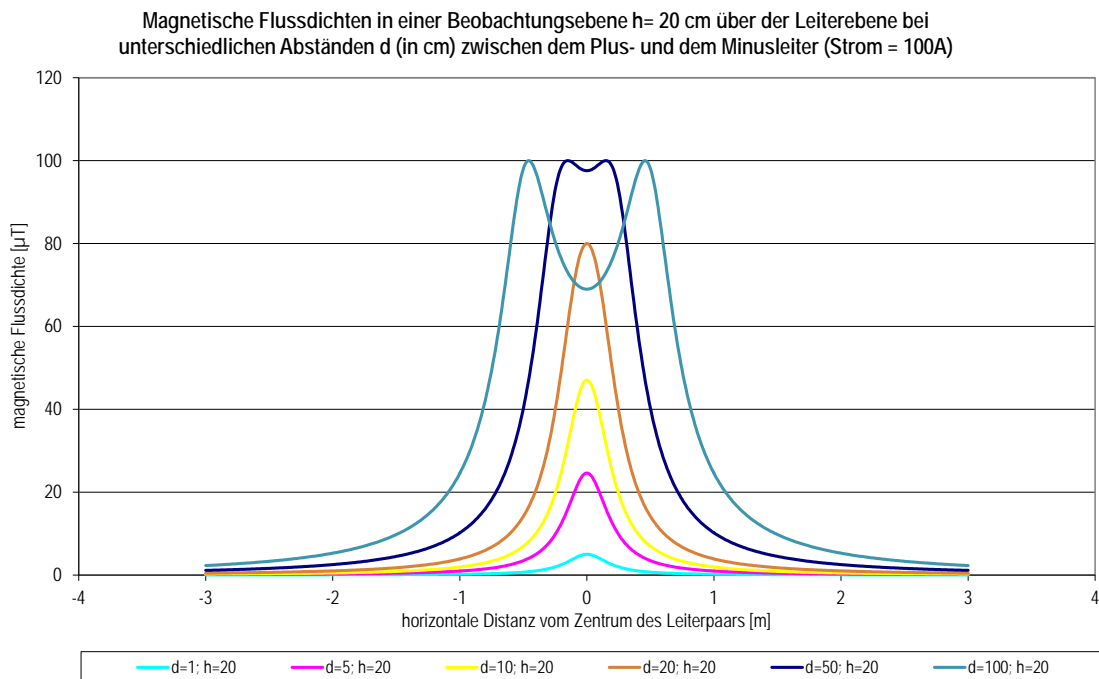


Abbildung 4: Magnetfeldverlauf in der Nähe der stromführenden Leiter

In Abbildung 4 ist deutlich zu erkennen, dass sich die Magnetfeldimmissionen reduzieren lassen, indem Plus- und Minusleiter nahe beieinander geführt werden.

Befindet sich der Beobachtungspunkt nur noch im Einflussbereich eines Leiters, so entsprechen die Magnetfeldimmissionen den Immissionen eines Einzelleiters (worst-case Situation).

Im Vergleich zum Immissionsgrenzwert der NISV von $40'000 \mu\text{T}$ sind die Werte bei einer PV-Anlage immer sehr klein. Selbst bei einem Strom von mehreren hundert Ampère wird der Grenzwert bei den in der Solartechnik üblichen Leiterquerschnitten nirgends überschritten, also weder im Leiter drin, noch auf der Oberfläche, noch in der Isolation, noch sonst irgendwo.

Vergleicht man die auftretenden Feldstärken unabhängig von irgendwelchen Grenzwertbetrachtungen mit dem immer vorhandenen Erdmagnetfeld, welches in unseren Breiten bei etwa $45 \mu\text{T}$ liegt, so sieht man aus Tabelle 2, dass selbst bei einem Einzelleiter und 100 A Strom der Einfluss der Leitung ab einer Distanz von etwa 50 cm kleiner ist als das Erdmagnetfeld. Bei einer Stringleitung mit einem etwa zehnmal kleineren Strom beträgt die Flussdichte in 50 cm Entfernung bereits weniger als ein Zehntel des Erdmagnetfeldes (Tabelle 2, Einzelleiter, $h = 50$ cm: $40 \mu\text{T}$ bei 100 A resp. $4 \mu\text{T}$ bei 10 A).

Bei den Kabeln des DC-Netzwerkes handelt es sich in der Regel um Einzelleiter. Hin- und Rückleiter sollten nahe zusammen geführt werden, sind jedoch in der Regel nicht bewusst verdrillt. Auf den Einfluss der Verdrillung wird deshalb hier nicht weiter eingegangen.

4.7. Wechselrichter als Quelle von NIS

Im Wechselrichter wird die elektrische Energie des PV-Generators in netzsynchrone elektrische Energie bei 50 Hz umgewandelt.

Ein Wechselrichter regelt und zerhackt dabei die Gleichspannung des PV-Generators mit Frequenzen zwischen ca. 4 kHz und ca. 200 kHz (die Frequenzen sind produkteabhängig) und bildet daraus die netzsynchrone 50-Hz-Wechselspannung des öffentlichen Netzes. Bei der Frequenzumsetzung von Gleich- auf Wechselspannung entstehen wegen der für eine Frequenzwandlung zwingend notwendigen nichtlinearen Vorgängen auch Oberschwingungen; sowohl Oberschwingungen der Zerhackerfrequenz, wie auch Oberschwingungen von 50 Hz. Der Wechselrichter ist innerhalb einer PV-Anlage die Quelle von vielen neuen Frequenzen. Wegen der schnellen Schaltvorgänge, welche für eine verlustarme Energieumwandlung notwendig sind, entstehen Frequenzen, welche sich bis über das UKW-Band hinaus erstrecken können. Von aussen betrachtet sind all diese neuen Frequenzen und die damit verbundene nichtionisierende Strahlung unerwünschte Nebeneffekte und keine Nutzsignale.

Die im Wechselrichter erzeugte nichtionisierende Strahlung kann sowohl direkt - "drahtlos durch die Luft" - wie auch über die angeschlossenen Kabel abgestrahlt werden. Im Fall der direkten Abstrahlung spricht man auch von so genannter feldgeführter Abstrahlung oder feldgeführter Störaussendung; im Fall der Abstrahlung über Kabel auch von sogenannter leitungsgeführter oder leitungsgebundener Abstrahlung resp. Störaussendung.

Der Übergang zwischen leitungs- und feldgeführter Abstrahlung ist fließend. Auch bei der feldgeführten Abstrahlung erfolgt diese vornehmlich über die angeschlossenen Kabel. Die Kabel dienen dabei nicht der Nutzsignalübertragung sondern haben die Funktion von "Antennen".

Bei der Wellenausbreitung entlang von Kabeln werden zwei grundsätzlich verschiedene "Ausbreitungsmodi" unterschieden:

Gegentaktausbreitung:

Bei der Gegentaktausbreitung erfolgt die Signalübertragung zwischen einzelnen Adern eines Kabels. Der Strom fließt in einer oder mehreren Adern eines Kabels hin und in einer oder mehreren Adern zurück. Die Ausbreitungsart ist grundsätzlich gleich wie beim Nutzsignal auf der DC- resp. AC-Seite eines Wechselrichters. Bezüglich des Streufeldes eines Signals, welches sich im Gegentaktmodus ausbreitet, gelten die gleichen Regeln wie beim Nutzsignal (s.a. Kap. 4.6 und 4.9). Die Gegentaktausbreitung von Wechselrichtersignalen ist mit Blick auf die NIS-Relevanz nur bei den Nutzsignalen selbst, bei den Oberschwingungen von 50 Hz und bei der Grundschwingung und den ersten Oberschwingungen der Zerhackerfrequenzen von Bedeutung. Bei der leitungsgeführten Ausbreitung von höherfrequenten Signalanteilen dominiert der so genannte Gleichtaktmodus.

Gleichtaktausbreitung:

Bei der Gleichtaktausbreitung dient das Kabel ungewollt als eine Art Antenne. Der Strom fließt auf allen leitfähigen Teilen des Kabels (Adern, Schirme, Erdleiter etc.) und betrifft nicht nur die Leitungen des DC- und des AC-Netzwerkes, sondern auch Steuer- und Kommunikationsleitungen. Bei höheren Frequenzen ist die Abstrahlung über die angeschlossenen Kabel oft der dominierende Abstrahlmechanismus. Die Leitungen können als durchaus effiziente Antennen wirken. So ist beispielsweise unter Funkamateuren bekannt, dass die abgestrahlten Wechselrichtersignale den Kurzwellenempfang stören oder gar

verunmöglichen können. Bezüglich der Auswirkungen auf die unmittelbare Umgebung verhält sich ein im Gleichtaktmodus angeregtes Kabel wie ein Einzelleiter gemäss Tabelle 2.

Die technischen Regeln, welche die maximale Abstrahlung der Wechselrichter limitieren, sind die EMV-Vorschriften. Für die folgenden Abschätzungen wird vorausgesetzt, dass die Wechselrichter die entsprechenden EMV-Normen einhalten.

4.7.1. EMV Normen für Wechselrichter

Die auf einen Wechselrichter anzuwendenden EMV-Normen sind abhängig von der Leistung und vom Typ der Umgebung, in der sie eingesetzt werden. Grundsätzlich gelten für Wechselrichter, welche für den Einsatz in einer Wohn- oder Büroumgebung vorgesehen sind strengere Emissionsbegrenzungen als für meist leistungsstarke Wechselrichter in einer industriellen Umgebung. Welche Normen ein Wechselrichter erfüllt, kann grundsätzlich der Produktspezifikation und insbesondere der Konformitätserklärung entnommen werden.

Für Wechselrichter kommen folgende EMV-Normen zur Anwendung.

Pos.	Bezeichnung	Kurzbeschreibung	NIS-Relevanz
1	SN EN 61000-3-2 [61-3-2]	Grenzwerte für Oberschwingungsströme (Geräte – Eingangsstrom $\leq 16A$ je Leiter)	Limitiert AC-seitig die Oberschwingungsströme von 50 Hz. Für Wechselrichter mit Leistungen bis ca. 11 kW.
2	SN EN 61000-3-12 [61-3-12]	Grenzwerte für Oberschwingungsströme (Geräte – Eingangsstrom $> 16A$ und $\leq 75A$ je Leiter)	Limitiert AC-seitig die Oberschwingungsströme von 50 Hz. Für Wechselrichter mit Leistungen zwischen ca. 11 kW und ca. 50 kW.
3	IEC/TR 61000-3-4 [61-3-4]	Grenzwerte für Oberschwingungsströme (Geräte – Eingangsstrom $> 16A$)	Limitiert AC-seitig die Oberschwingungsströme von 50 Hz. Leistung des Wechselrichters über ca. 11 kW. IEC 61000-3-4 würde auch für Leistungen über 50 kW gelten. IEC61000-3-4 ist keine harmonisierte EN-Norm und hat den Status eines "Technical Reports". Die Norm wird nicht von allen Herstellern konsequent angewendet.
4	IEC/TR 61000-3-15 [61-3-15]	Begrenzung der Netzrückwirkungen von verteilten Energieerzeugungsanlagen (Ströme $\leq 75A$, Frequenzanteile unter 9 kHz)	Limitiert u.a. AC-seitig die Oberschwingungsströme. Die Grenzwerte sind im Wesentlichen dieselben wie in [61-3-2] resp. [61-3-12]. IEC61000-3-15 ist keine harmonisierte EN-Norm und hat den Status eines "Technical Reports".
5	SN EN 61000-6-3 [61-6-3]	Fachgrundnorm, Störaussendung Wohnbereich Geschäfts- und Gewerbebereiche sowie Kleinbetriebe	Limitiert die maximalen Emissionen von Wechselrichtern, welcher für einen Einsatz in Wohn- und Geschäftshäusern vorgesehen sind. Limitiert sowohl die leitungsgeführten wie auch die gestrahlten Emissionen.
6	SN EN 61000-6-4 [61-6-4]	Fachgrundnorm, Störaussendung Industriebetriebe	Limitiert die maximalen hochfrequenten Emissionen, weitgehend wie die SN EN 61000-6-3, jedoch mit ca. 10 dB höheren Grenzwerten.

Tabelle 3: EMV-Normen für Wechselrichter

4.7.2. EMV-Normen und Lücken

Die EMV-Normen in Tabelle 3 decken nicht das gesamte Frequenzband von Tabelle 1 ab. Neben den generellen Lücken im Frequenzband sind weitere Lücken wie leistungsabhängige Frequenzlücken oder fehlende DC-seitige Limitierungen vorhanden. Die Lücken (grau hinterlegt) und die von den EMV-Normen erfassten Frequenzbereiche lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Pos.	Frequenzbereich	Kurzbeschreibung	Anmerkungen
1	0 Hz	AC-seitige Gleichspannungs- und Gleichstromanteile	Die maximal zulässigen Ströme und Spannung sind klein (wenige Ampère) und hinsichtlich NIS vernachlässigbar.
2	> 0 Hz - < 100 Hz	keine EMV-Normen für die Komponenten einer PV-Anlage	Der Frequenzbereich unterhalb der ersten Oberschwingung der Netzfrequenz wird von EMV-Normen nur bei sehr speziellen Anwendungen erfasst. Ein Bedürfnis zur Regulierung der maximalen Emissionen unter 100 Hz besteht in der Regel nicht.
3	100 Hz - 2 kHz	SN EN 61000-3-2 SN EN 61000-3-12	Limitiert AC-seitig die Oberschwingungsströme für Ströme bis maximal 75 A (ca. 50 kW).
		(IEC/TR 61000-3-4) (IEC/TR 61000-3-15)	Die Einhaltung der IEC 61000-3-4, welche auch Leistungen über 50 kW umfasst, ist nicht verpflichtend und wird von den Herstellern, wenn überhaupt, nur bei einem Teil der Produkte garantiert.. Eine gewisse Begrenzung wird über die Anschlussbedingungen ans öffentliche Netz geschaffen.
4	2 kHz - 9 kHz		Das Thema wird bei IEC als "potential new work item" geführt.
5	9 kHz - 150 kHz	(CISPR 11)	Frequenzlücke für Wechselrichter. CISPR 11 sieht nur einen Grenzwert für Induktionsherde vor. In die Frequenzlücke fallen teilweise die Grund- und Oberwellen der Zehackerfrequenzen.
6	150 kHz - 30 MHz	SN EN 61000-6-3 SN EN 61000-6-4	Limitiert AC-seitig die leitungsgebundene Störaussendung.
			Für Geräte, welche nach der SN EN 61000-6-3 geprüft werden, existiert eine Limite für die leitungsgeführten (Gleichtakt-) Störaussendung auf Gleichstromleitungen.
			Eine generelle Limitierung der DC-seitigen leitungsgeführten Störaussendung ist in Diskussion.
7	30 MHz - 6 GHz	SN EN 61000-6-3 SN EN 61000-6-4	Für Wechselrichter, welche nach der SN EN 61000-6-4 geprüft werden (Industrienumgebung), gibt es derzeit keine Limitierung der DC-seitigen Störaussendung. Eine generelle Limitierung ist in Diskussion.
7	30 MHz - 6 GHz	SN EN 61000-6-3 SN EN 61000-6-4	Die feldgeführte Störaussendung ist weitestgehend durch EMV-Normen begrenzt. Weil die Leitungen die "Antennen" für die feldgeführte Störaussendung bilden, wird indirekt auch die leitungsgeführte Störaussendung (Gleichtaktmodus) begrenzt.

Tabelle 4: Normativ erfasste Frequenzbereiche und Lücken

Die für NIS-Betrachtungen relevanten Lücken in den EMV-Normen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Frequenzbereich zwischen 0 Hz und 100 Hz
- Frequenzbereich zwischen 2 kHz und 150 kHz
- Netzoerschwingungen für Wechselrichter mit Leistungen über ca. 50 kW (über 75 A)
- DC-seitige leitungsgeführte Störaussendung (150 kHz - 30 MHz) für Wechselrichter, welche nur nach SN EN 61000-6-4 geprüft sind.

4.7.3. Umrechnung der EMV-Limitierungen auf NIS-Immissionen

Die in den Tabellen 3 und 4 aufgeführten EMV-Normen limitieren die leitungs- und feldgeführten Emissionen einer PV-Anlage. Es wird im Folgenden versucht die EMV-Grenzwerte so zu interpretieren oder umzurechnen, dass ein Vergleich mit den Immissionsgrenzwerten der NISV gemäss Tabelle 1 möglich ist. Für eine Interpretation hinsichtlich NIS sind insbesondere folgende Aspekte zu beachten (für eine detaillierte Herleitung wird auf den Anhang verwiesen):

- **EMV-Grenzwerte:**
Es wird im Folgenden angenommen, dass ein EMV-Grenzwert gerade eingehalten wird und dass damit die Emissionen einer PV-Anlage gerade so gross sind, wie es die EMV-Vorschriften maximal zulassen.
- **EMV-Mess- und NIS-Bezugsdistanzen:**
Als minimale Distanz für eine NIS-Beurteilung (NIS-Bezugsdistanz) wird zwischen einem emittierenden Objekt und dem Aufenthaltsort von Menschen eine Entfernung von 50 cm gewählt. Die EMV-Normen für feldgeführte Strahlung (Tabelle 3, Pos. 5 und 6) sehen demgegenüber eine Messdistanz von 3 m oder 10 m vor. Die aus den EMV-Grenzwerten gewonnenen Maximalwerte sind auf die kürzere NIS-Bezugsdistanz von 0.5 m umzurechnen.
- **Summierungsvorschrift der NISV bei Immissionen mit mehreren Frequenzen:**
Bei Immissionen mit mehreren Frequenzen sieht die NISV Summierungsvorschriften vor. Abhängig vom Frequenzbereich erfolgt die Summierung linear und/oder geometrisch. Die EMV-Vorschriften kennen keine vergleichbaren Summierungsvorschriften, sondern frequenzabhängige Grenzwerte, welche unter definierten Prüfbedingungen einzuhalten sind (Messbandbreite, Detektor, Messdistanz, Koppelmethode, etc.). Für NIS-Interpretationen müssen Annahmen über die Anzahl gleichzeitig vorhandener Frequenzen oder Frequenzanteile getroffen werden, welche die EMV-Grenzwerte gerade einhalten (Anzahl Punkte entlang der Frequenzachse, bei welchen der EMV-Grenzwerte "berührt" wird).
- **Spitzenwert-, Quasi-Spitzenwert- resp. Mittelwertbewertung:**
In der EMV werden die Signale mittels Spitzenwert-, Quasi-Spitzenwert- und/oder Mittelwert-Detektor gemessen. Insbesondere die Quasi-Spitzenwert-Bewertung hat zum Ziel, dem Aspekt der Verträglichkeit Rechnung zu tragen. So werden Störsignale, welche nur selten und für kurze Zeit auftreten, als weniger störend bewertet, als Störsignale, welche dauerhaft vorhanden sind. In der NISV sind grundsätzlich Effektivwerte zu betrachten und für Frequenzen oberhalb 100 kHz sind die Effektivwerte über 6 Minuten zu mitteln.
- **Umrechnung von (Stör-) Spannungen in (Stör-) Ströme:**
Die EMV-Vorschriften limitieren beispielsweise die leitungsgeführten Störaussendungen, meist in Form von maximal zulässigen Störspannungen. Die EMV-Messungen müssen dabei mittels speziell spezifizierter Netznachbildungen, welche u.a. eine kontrollierte Koppelimpedanz sicherstellen sollen, durchgeführt werden. Für die NIS-Interpretation sind die "EMV-Spannungen" in Ströme und daraus in Magnetfelder am Aufenthaltsort von Menschen umzurechnen.

4.7.4. NIS-Interpretation der wechselstromseitigen Oberschwingungen

Die im Wechselrichter gebildete 50-Hz-Netzspannung ist nicht rein sinusförmig und damit nicht frei von Oberschwingungen. Am Ausgang des Wechselrichters treten also neben der 50-Hz-Wechselspannung auch Oberschwingungsspannungen und -ströme auf, welche ihrerseits elektrische und magnetische Felder bei den entsprechenden Frequenzen erzeugen. Für NIS-Betrachtungen dürfen die Oberschwingungsanteile nicht a priori vernachlässigt werden, weil diese mit steigender Frequenz tieferen Grenzwerten und einer mit dem Grenzwert gewichteten Summierungsvorschrift zu genügen haben.

Grundsätzlich sind für den Betrieb von dezentralen Energieerzeugungsanlagen am öffentlichen Netz gewisse Bedingungen auch hinsichtlich der Oberschwingungen einzuhalten ([DACHCZ], [50160]). Die Grenzwerte sind abhängig von gewissen Netzparametern (Kurzschlussleistung). Dabei sollten die Bedingungen hinsichtlich Oberschwingungen eingehalten werden können, wenn der Wechselrichter die "Geräte-EMV-Anforderungen" bezüglich Oberschwingungen einhält. Die maximal zulässigen, wechselstromseitigen Oberschwingungsanteile sind abhängig von der Anschlussleistung des Wechselrichters (Tabelle 3, Pos. 1 - 4). Die zulässigen Oberschwingungsanteile werden meist in Prozent des Grundschwingungsstroms beschrieben. Um diese Werte mit den Grenzwerten der NISV vergleichen zu können, werden auch die Grenzwerte der NISV bei den Oberschwingungsfrequenzen als Prozentsatz des NIS-Grenzwertes bei 50 Hz dargestellt. Wenn der prozentuale Oberschwingungsanteil der EMV-Normen kleiner ist als der prozentuale Oberschwingungsgrenzwert der NISV, ist sichergestellt, dass die entsprechende Oberschwingung den NIS-Grenzwert für Einzelfrequenzen einhält, solange der NIS-Grenzwert bei 50 Hz eingehalten wird.

Vergleich der maximalen Oberschwingungsanteile der EMV-Normen mit den zulässigen Oberschwingungsanteilen der NISV

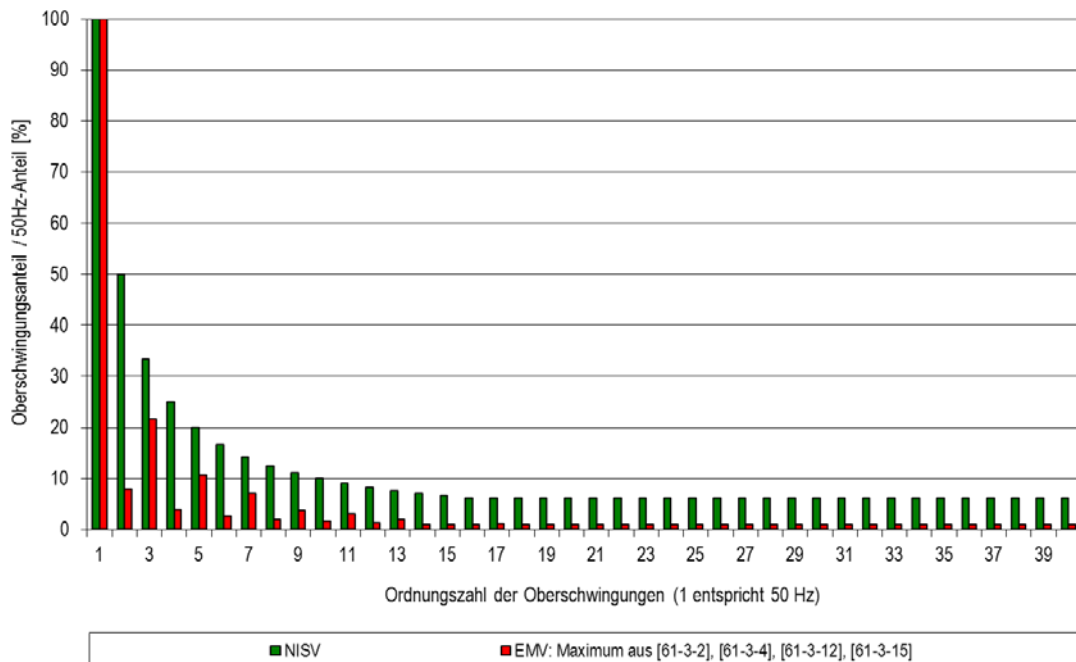


Abbildung 5: Vergleich der prozentualen Oberschwingungsanteile von 50 Hz.

Aus Abbildung 5 geht hervor, dass die prozentualen Oberschwingungsanteile in den EMV-Normen kleiner sind als in der NISV. Unter der Bedingung, dass eine PV-Anlage wechselstromseitig den NIS-Grenzwert bei 50 Hz einhält, ist damit sichergestellt, dass der NIS-Grenzwert auch von jeder Oberschwingung eingehalten wird.

Oberschwingungen haben als Ursache meist ein einziges Signal. Damit treten alle Oberschwingungsanteile gleichzeitig auf und es ist auch die Summierungsvorschrift der NISV zu beachten (NISV, Anhang 2, Ziff. 221). Summiert man die EMV-Oberschwingungsanteile gemäss NIS-Summierungsvorschrift, so erhält man einen Wert von etwa 7.9. Wenn also ein Wechselrichter die EMV-Grenzwerte bei jeder Oberschwingungsfrequenz gerade einhält und am Ort der NIS-Beurteilung der 50 Hz-Grenzwert gerade ausgeschöpft wird, dann wird der NIS-Summierungsgrenzwert etwa um das Achtfache überschritten. Um sicherzustellen, dass auch der NIS-Summierungsgrenzwert eingehalten wird, darf am NIS-Bezugsort der 50 Hz-Grenzwert nur zu einem Achtel ausgeschöpft werden. Gemäss Tabelle 2 ist dies dann sicher der Fall, wenn beispielsweise:

- a) der Strom kleiner als etwa 30 A ist (in diesem Fall ist die magnetische Flussdichte für einen Einzelleiter und damit für die ungünstigste Leiteranordnung in 50 cm Entfernung etwa 12 μT bei einem 50 Hz-Grenzwert von 100 μT).
- b) bei einem Strom von 100 A Phasen- und Neutralleiter weniger als 15 cm voneinander entfernt sind.

Wechselrichter werden AC-seitig meist durch Mehrleiterkabel erschlossen. Damit sind die Distanz zwischen Hin- und Rückleiter wesentlich kleiner als in Bedingung b).

Das Magnetfeld ändert sich zwischen einem einphasigen und einem dreiphasigen Anschluss nur unwesentlich. Mehrleiterkabel sind zudem verdrillt. Die Verdrillung bewirkt eine zusätzliche, erhebliche Reduktion der Immissionen [Urba].

Werden bei leistungsstarken Wechselrichtern Einzelleiter verwendet und werden diese in einem Bündel geführt, so sind auch hier die Leiterabstände nur wenige Zentimeter.

Zusammengefasst darf davon ausgegangen werden, dass in der Praxis auch die Summierungsvorschrift eingehalten wird.



4.7.5. NIS-Interpretation der EMV-Normen für Frequenzen über 150 kHz

Die NIS-Umrechnungen der EMV-Emissionsbegrenzungen sind im Anhang detailliert dargestellt

In Tabelle 5 werden die Ergebnisse der NIS-Umrechnungen zusammengefasst. Es werden jeweils die grössten Grenzwertausschöpfungen wiedergegeben.

Beim Vergleich der EMV-Grenzwerte mit den Einzelfrequenzen der NISV werden die Grenzwertausschöpfungen angegeben.

Bei den Summierungsvorschriften wird angegeben, wie viele Frequenzpunkte (siehe auch Anhang A.1.2) zu summieren wären, um den Grenzwert auszuschöpfen.

Pos.	Art der Störaussendung	EMV-Norm	NIS-Vorschrift	maximale Grenzwertausschöpfung in parts per million (ppm) für Einzelfrequenzen resp. Anzahl Frequenzpunkte (FP) zur Einhaltung der Summierungsvorschrift ¹⁾
1	Leitungsgeführte Emissionen (AC-Leitungen)	[61-6-3]	Einzelfrequenz	28 ppm (Tabelle A5)
2			geometrische Summe	1.3 e+9 FP (Tabelle A5)
3			lineare Summe bis 10 MHz	8.6 e+3 FP (Tabelle A7)
4		[61-6-4]	Einzelfrequenz	87 ppm (Tabelle A6)
5			geometrische Summe	1.3 e+8 FP (Tabelle A6)
6			lineare Summe bis 10 MHz	1.9 e+3 FP (Tabelle A8)
7	Leitungsgeführte Emissionen (DC- und Steuerleitungen)	[61-6-3]	Einzelfrequenz	29 ppm (Tabelle A9)
8			geometrische Summe	1.2 e+9 FP (Tabelle A9)
9			lineare Summe bis 10 MHz	1.8 e+4 FP (Tabelle A11)
10		[---]	Einzelfrequenz	85 ppm (Tabelle A10)
11			geometrische Summe	1.9 e+6 FP (Tabelle A10)
12			lineare Summe bis 10 MHz	124 FP (Tabelle A12)
13	Feldgeführte (gestrahlte) Emissionen	[61-6-3]	Einzelfrequenz	1'000 ppm (Tabelle A13)
14			geometrische Summe	9.9 e+5 FP (Tabelle A13)
15		[61-6-4]	Einzelfrequenz	3'200 ppm (Tabelle A14)
16			geometrische Summe	9.9 e+4 FP (Tabelle A14)

¹⁾ Auszug aus den Ergebnissen im Anhang
Tabelle 5: Zusammenfassung der Umrechnung der EMV-Grenzwerte

Bei der Interpretation der Grenzwertvergleiche ist zu beachten, dass die EMV-Messungen mit einer definierten Messbandbreite erfolgen. Frequenzen, welche innerhalb der Messbandbreite liegen, werden bereits messtechnisch summiert. Eine gewisse Summierung ist also bereits im EMV-Messergebnis enthalten. Es wird für die Interpretation angenommen, dass die einzelnen Frequenzpunkte in Tabelle 5 um mindestens ein Drittel der Messbandbreite auseinander liegen müssen, um als Additionsterme in die Summenformel aufgenommen zu werden (siehe auch Anhang A.1.2). Die in Tabelle 5 aufgeführte Anzahl Frequenzpunkte beschreibt also ein Frequenzband gemäss folgender Formel:

$$\text{Frequenzband} = \text{Anzahl Frequenzpunkte} \cdot \frac{\text{Messbandbreite}}{3}$$

In Tabelle 6 werden die einzelnen Positionen der Tabelle 5 kurz diskutiert.

Diskussion der Ergebnisse:

Pos.	Diskussion
1	Der Grenzwert wird klar eingehalten.
2	Es wären über eine Milliarde Frequenzpunkte am EMV-Grenzwert notwendig, um die Summierungsvorschrift der NISV auszuschöpfen. Bei einer EMV-Messbandbreite von 9 kHz müssten sich die zu summierenden Frequenzen über ein Frequenzband von 3.9 THz erstrecken ($1.3e+9 \cdot 3kHz$).
3	analog Pos.2; notwendiges Frequenzband: 78 MHz (Summierung bis 10 MHz)
4	Der Grenzwert wird klar eingehalten.
5	analog Pos.2; notwendiges Frequenzband: 390 GHz
6	analog Pos.2; notwendiges Frequenzband: 5.7 MHz. Der worst-case Wert liegt bei 150 kHz (Anhang A.2.1.2.). Der Wert steigt mit zunehmender Frequenz an und ergibt für Frequenzen über 500 kHz eine notwendige Bandbreite von mindestens 16.5 MHz bei einer Summierung bis 10 MHz.
7	Der Grenzwert wird klar eingehalten.
8	analog Pos.2; notwendiges Frequenzband: 3.6 THz
9	analog Pos.2; notwendiges Frequenzband: 54 MHz (Summierung bis 10 MHz)
10	Der Grenzwert wird klar eingehalten.
11	analog Pos.2; notwendiges Frequenzband: 5.7 GHz
12	124 Frequenzpunkte am Grenzwert sind zumindest theoretisch möglich.
13	Der Grenzwert wird klar eingehalten.
14	Die Messbandbreite beträgt in diesem Frequenzbereich 120 kHz. Das notwendige Frequenzband beträgt damit ca. 40 GHz. Die Summierung erfolgt nach NISV bis 300 GHz, wobei bei heutigen Wechselrichtern im GHz-Bereich keine Signale mehr detektiert werden können.
15	Der Grenzwert wird klar eingehalten.
16	analog Pos.14; notwendiges Frequenzband: ca. 4 GHz.

Tabelle 6: Diskussion der Ergebnisse

4.7.6. Rückwirkung der 50 Hz-Wechselspannung auf das DC-Netzwerk

Je nach Bauart des Wechselrichters können sich die 50 Hz-Wechselspannung einschliesslich der-Oberschwingungsspannungen im DC-Netzwerk und im PV-Generator widerspiegeln. Die Wechselspannungsrückwirkung auf die DC-Seite tritt vor allem bei Wechselrichtern ohne Ausgangstransformator auf [z.B. Häbe1]. Die Rückwirkungen äussern sich darin, dass das Potenzial der erdfreien DC-Seite gegenüber Erde und damit gegenüber der Umgebung im Rhythmus der Wechselspannung schwingt. Diese Spannungsschwankungen gegenüber Erde haben ein elektrisches Wechselfeld zwischen DC-Seite und Erde zur Folge. Es können dabei elektrische Feldstärken von einigen hundert Volt pro Meter auftreten [z.B. Bopp4]. Ein magnetisches Wechselfeld entsteht durch den Strom der dabei fliesst, wobei die Kopplung zwischen der erdfreien DC-Seite und Erde rein kapazitiv ist. Geht man von Spannungen von einigen hundert Volt und von Koppelkapazitäten im Nanofarad-Bereich aus, so ergeben sich Ströme im Mikro- oder tiefen Milliampere-Bereich. Die resultierenden Magnetfelder sind also nicht NIS-relevant.

Die elektrischen Felder treten nur zwischen dem DC-Netzwerk und der unmittelbaren Umgebung auf. Bezüglich NIS-Relevanz sind die Feldstärken gegenüber dem 50 Grenzwert von 5'000 V/m nicht von Bedeutung. Gegenüber dem Inneren eines Gebäudes oder gegenüber angrenzenden Räumen werden die niederfrequenten elektrischen Felder durch die Gebäudestruktur stark abgeschirmt.

4.7.7. Niederfrequente magnetische Streufelder des Wechselrichters

Im Wechselrichter fliesst - abgesehen von geringen Verlusten - die gesamte Leistung des PV-Generators auf der DC-Seite, in der Zehackerstufe und auch auf der AC-Seite. Die dabei fliessenden Ströme erzeugen Magnetfelder nicht nur innerhalb sondern auch in der Umgebung eines Wechselrichters (magnetische Streufelder).

In der Regel werden aus technischen und aus EMV-Gründen die Hin- und Rückleiter innerhalb des Wechselrichters sehr nahe beisammen geführt. Die Ströme fliessen jedoch auch durch Drosselspulen und je nach Bauart eventuell auch durch einen Ausgangstransformator mit entsprechenden Streufeldern. Diese Streufelder sind ein grundsätzlich lokales Phänomen in der Nähe eines Wechselrichters. Die Feldstärken nehmen mit zunehmender Entfernung vom Wechselrichter im Wesentlichen mit der zweiten Potenz ab.

Im Gegensatz zu Haushaltgeräten (siehe [62333]) fehlen für Wechselrichter Normen oder andere verbindliche Vorschriften, welche die niederfrequenten magnetischen Streufelder limitieren würden. Auch die EMV kann nicht helfen, weil niederfrequente Streufelder nur in sehr speziellen Fällen EMV-Probleme machen und deshalb EMV-Begrenzungen fehlen. Etwas salopp zusammengefasst gibt es für die niederfrequenten Felder der Wechselrichter keine normativen Strahlungs-Begrenzungen.

4.8. Leistungsoptimierer als Quelle von NIS

Wie in Kap. 3.7 angesprochen sind Leistungsoptimierer elektronische Gleichspannungswandler. Die Leistungsoptimierer erzeugen eine ähnliche Strahlung wie die Wechselrichter mit dem Unterschied, dass keine 50 Hz-Anteile vorkommen. Für Leistungsoptimierer gelten dieselben EMV-Anforderungen wie für Wechselrichter, wobei einzelne EMV-Anforderungen nicht zur Anwendung kommen. Bezugnehmend auf Kap. 4.7 sind folgende NIS-Interpretationen zu beachten:

Wechselrichter	Leistungsoptimierer
Kap. 4.7.4	entfällt, kein AC-Pfad
Tabelle 5, Pos. 1 - Pos. 6	entfallen, kein AC-Pfad
Tabelle 5, Pos. 7 - Pos. 9	gelten vollumfänglich mit denselben Ergebnissen
Tabelle 5, Pos. 10 - Pos. 12	entfallen, Leistungsoptimierer erfüllen SN EN 61000-6-3
Tabelle 5, Pos. 13 - Pos. 14	gelten vollumfänglich mit denselben Ergebnissen
Tabelle 5, Pos. 15 - Pos. 16	entfallen, Leistungsoptimierer erfüllen SN EN 61000-6-3

Tabelle 7: Gültigkeit der NIS-Interpretationen für Leistungsoptimierer

Über alles gesehen werden die Streufelder der einzelnen Leistungsoptimierer die Anforderungen der NISV mit Sicherheit einhalten.

Zu beachten ist, dass viele Leistungsoptimierer über den ganzen PV-Generator verteilt eingesetzt werden. Dies kann zu einer gewissen Kumulierung führen. Gemäss Tabelle 6 dürfte jedoch eine ausreichende Reserve in der Grenzwertausschöpfung bestehen. Praktische Erfahrungen, insbesondere auch hinsichtlich des EMV-Störpotentials fehlen derzeit.

4.9. Wechselspannungsnetzwerk als Quelle von NIS

Vernachlässigt man die Verluste, so wird die Energie des PV-Generators vollständig an die Wechselstromseite weitergegeben. Die dabei auf der AC-Seite fließenden Ströme sind ähnlich gross wie am DC-Eingang des Wechselrichters. In der Tendenz ist die DC-seitige Spannung etwas höher als die Netz-Wechselspannung und damit ist der AC-Strom in der Tendenz etwas grösser als der DC-Strom (siehe Datenblätter von Wechselrichtern). Bei einphasigen Stringwechselrichtern kann der AC-seitige Strom etwa doppelt so gross sein wie der DC-Strom. Zur Abschätzung der Streufelder können auch auf der Wechselstromseite die Darstellungen von Kap. 4.6 verwendet werden. Dabei ist zu beachten, dass im Gegensatz zur DC-Seite die AC-Seite meist durch verdrehte Mehrleiterkabel erschlossen wird.

Im Grundsatz unterscheiden sich die Magnetfelder im AC-Netzwerk nicht von den Magnetfeldern entlang der Leitungen einer Hausinstallation, da die gleichen Kabeltypen verwendet werden. Die Ströme im AC-Netzwerk können jedoch grösser sein als die "typischen" Ströme in den Leitungen der Hausinstallation.

Bezüglich der elektrischen Felder bestehen im AC-Netzwerk keine Unterschiede zu gleichartigen Leitungen der Hausinstallation, da mit denselben Spannungen gearbeitet wird.

4.10. NIS-Situation in der Nacht

In der Nacht liefert der PV-Generator praktisch keine Energie. Die Energieausbeute ist selbst bei Vollmond oder aufgrund von Streulicht etwa hunderttausend Mal kleiner als an einem sonnigen Tag. Damit fließt auch im gesamten Gleichstromnetzwerk nachts praktisch kein Strom und es entsteht kein relevantes Magnetfeld. Da vom PV-Generator keine elektrische Energie erzeugt wird, fließt auch AC-seitig kein Strom.

Ist die Energieproduktion des PV-Generators zu gering, so schalten die meisten Wechselrichter sogar ab. Damit ist das ganze System im Wesentlichen stromlos (abgesehen von sehr kleinen Strömen für die Überwachung) und es gibt nachts keine magnetischen Gleichfelder, keine magnetischen 50-Hz-Wechselfelder und auch keine Hochfrequenzstrahlung.

Da der PV-Generator elektrisch gesehen eine Stromquelle ist, erreicht eine unbelastete PV-Anlage bereits bei sehr geringer "Beleuchtung" die maximale Spannung. Es kann bei einem unbelasteten PV-Generator also auch nachts die volle DC-Spannung anliegen und die elektrischen Gleichfelder können nachts ähnlich gross sein wie tagsüber. Diesbezüglich herrschen in der Nacht dieselben Bedingungen wie in Kap. 4.5 und Kap. 4.6 beschrieben.

5. Messungen der Immissionen einer PV-Anlage

5.1. Allgemeines

In Ergänzung zu den Darstellungen in Kap.4 wurden Messungen an zwei PV-Anlagen durchgeführt. Die Messungen wurden in unmittelbarer Umgebung der Wechselrichter vorgenommen, weil dort die stärksten und "interessantesten" Immissionen festgestellt werden können. Als Wechselrichter wurden einerseits ein Stringwechselrichter ohne Transformator sowie ein schon etwas "älterer" Zentralwechselrichter mit Transformator gewählt:

Kurzbezeichnung	Merkmale	
WR1	Fabrikat	Solar Max SM 3000S
	Netzspannung	1 x 230 V
	Nennleistung	2.5 kW
	Anmerkungen	<ul style="list-style-type: none"> • Stringwechselrichter ohne Transformator • Die PV-Anlage umfasst insgesamt 5 Stringwechselrichter desselben Typs
		
WR2	Fabrikat	Solar Max 20
	Netzspannung	3 x 400 V
	Nennleistung	20 kW
	Anmerkungen	<ul style="list-style-type: none"> • Zentralwechselrichter mit Transformator
		

Tabelle 8: Merkmale der Wechselrichter in deren Umgebung Messungen durchgeführt wurden.

Gemessen wurden die niederfrequenten und die hochfrequenten Magnetfelder sowie die hochfrequenten Ströme auf allen Leitungen der Wechselrichter.

5.2. 50 Hz-Magnetfelder des Wechselrichters

Die Messungen am WR1 zeigen, dass die 50 Hz-Magnetfelder in einem direkten Zusammenhang mit der Leistung des Wechselrichters stehen. Die AC-Seite wird mit konstanter Netzspannung betrieben, so dass der 50 Hz-Strom proportional zur Leistung ist. Das 50 Hz-Magnetfeld wiederum ist proportional zum 50 Hz-Strom. Abbildung 6 zeigt den zeitlichen Verlauf der magnetischen Flussdichte in einer Entfernung von ca. 20 cm von einem der WR1-Wechselrichter an einem Nachmittag mit wechselnder Bewölkung.

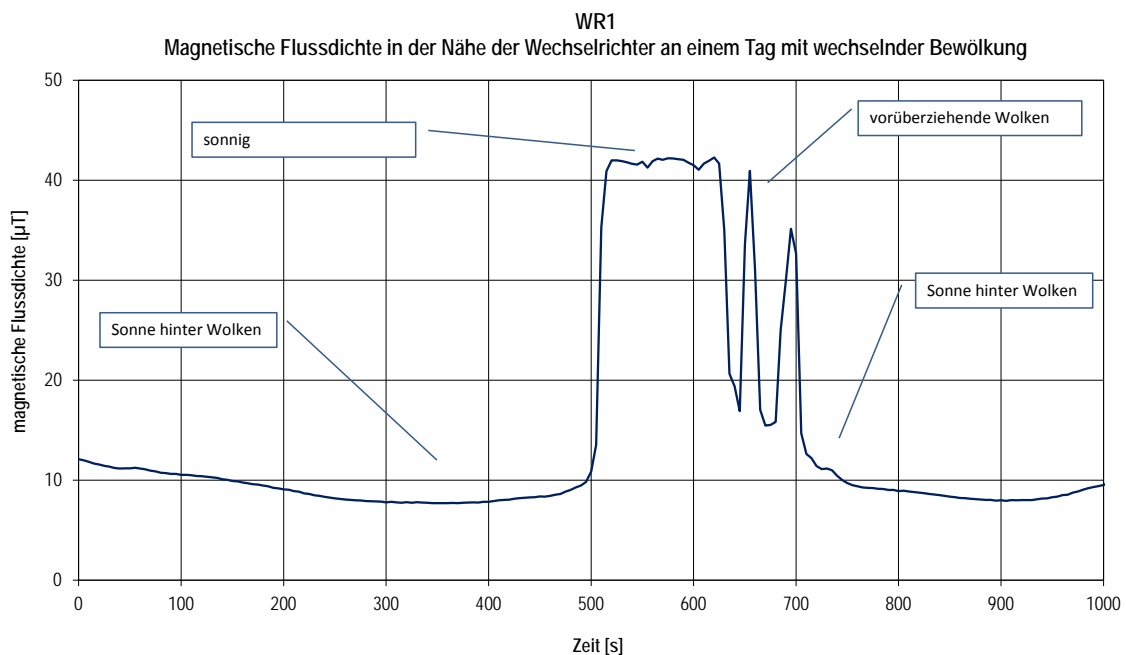


Abbildung 6: Magnetische Flussdichte (50 Hz) in ca. 20 cm Abstand vom Wechselrichter bei wechselnder Bewölkung

Die magnetische Flussdichte klingt etwa im Quadrat zur Entfernung vom Wechselrichter ab und beträgt beim WR1 - hochgerechnet auf Nennleistung - in einer Distanz von 50 cm maximal etwa 7 μT .

Der Unterschied zwischen einer frequenzselektiven Messung bei 50 Hz und einer breitbandigen Messung (30 Hz - 30 kHz), welche auch die Oberschwingungsanteile erfasst, ist gering.

Beim WR2 wurde in einer Entfernung von 50 cm eine maximale magnetische Flussdichte von etwa 35 μT gemessen (hochgerechnet auf Nennleistung). Das Maximum befindet sich etwa auf der Höhe des Transformators.

Bei einem Vergleich zwischen WR1 und WR2 ist zu beachten, dass WR2 eine achtmal höhere Nennleistung besitzt als WR1. Bezogen auf die Leistung ist der Unterschied zwischen WR1 und WR2 nicht erheblich.

5.3. Hochfrequente Emissionen des Wechselrichters

5.3.1. Ergebnisse der Magnetfeldmessungen

Abbildung 7 zeigt ein typisches Frequenzspektrum der Magnetfelder eines Wechselrichters. Die Messungen wurden unmittelbar beim Wechselrichter durchgeführt, um den spektralen Verlauf aufzeigen zu können und möglichst frei von Fremdeinflüssen zu sein. Der Wechselrichter emittiert vorwiegend Signale, welche auf den Zerracker zurückzuführen sind (die Ursache der Emissionen ist im Wesentlichen ein einziges, nicht sinusförmiges Signal). Andere Signale spielen im Vergleich dazu keine wesentliche Rolle.

Im Gegensatz zu den 50 Hz-Magnetfeldern sind die Pegel in Abbildung 7 praktisch unabhängig von der momentanen Leistung des Wechselrichters. Selektive manuelle Einzelmessungen am Messtag bei variabler Bewölkung ergaben Pegeländerungen von weniger als 2 dB bei einer Leistungsänderung zwischen 170 Watt und 2'200 Watt. Die hochfrequenten Immissionen sind also im Wesentlichen unabhängig von der Sonneneinstrahlung auf die PV-Anlage und verschwinden erst, wenn die PV-Anlage abschaltet (s.a. Kap. 4.10).

Gemessen wurden auch die Unterschiede zwischen einer Spitzenwert- und einer Quasispitzenwertmessung. Die Unterschiede sind wesentlich kleiner als dies in Kap. A.1.3 für den worst-case Fall eines Einzelimpulses angenommen wurde. Am WR1 haben die Messungen einen Unterschied zwischen Spitzen- und Quasispitzenwertmessung von weniger als 3 dB ergeben. Die in Kap. A.1.3 vorgenommene Pegelkorrektur von 29.5 dB dürfte die effektive Situation also stark überschätzen.

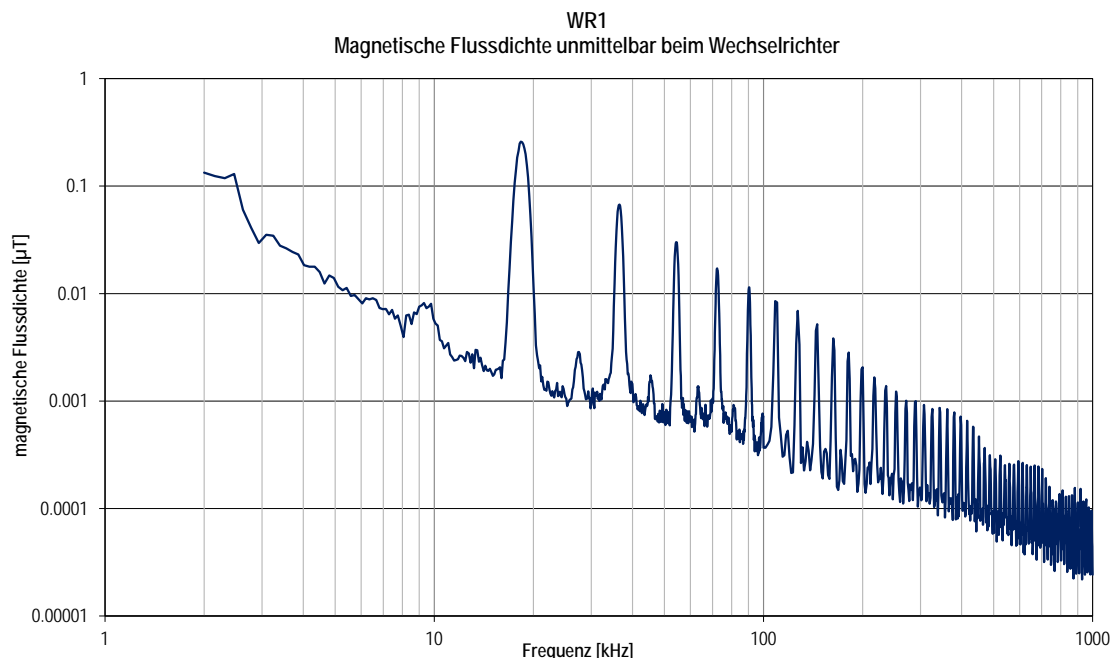


Abbildung 7: Frequenzspektrum des Wechselrichters WR1

In der NIS-Bezugsdistanz (50 cm vom Wechselrichter) sieht der Verlauf erwartungsgemäss sehr ähnlich aus wie in Abbildung 7, wobei die absoluten Pegel natürlich kleiner sind (Abbildung 8).

Als Orientierungshilfe ist auch der Immissionsgrenzwert der NISV für Einzelfrequenzen dargestellt.

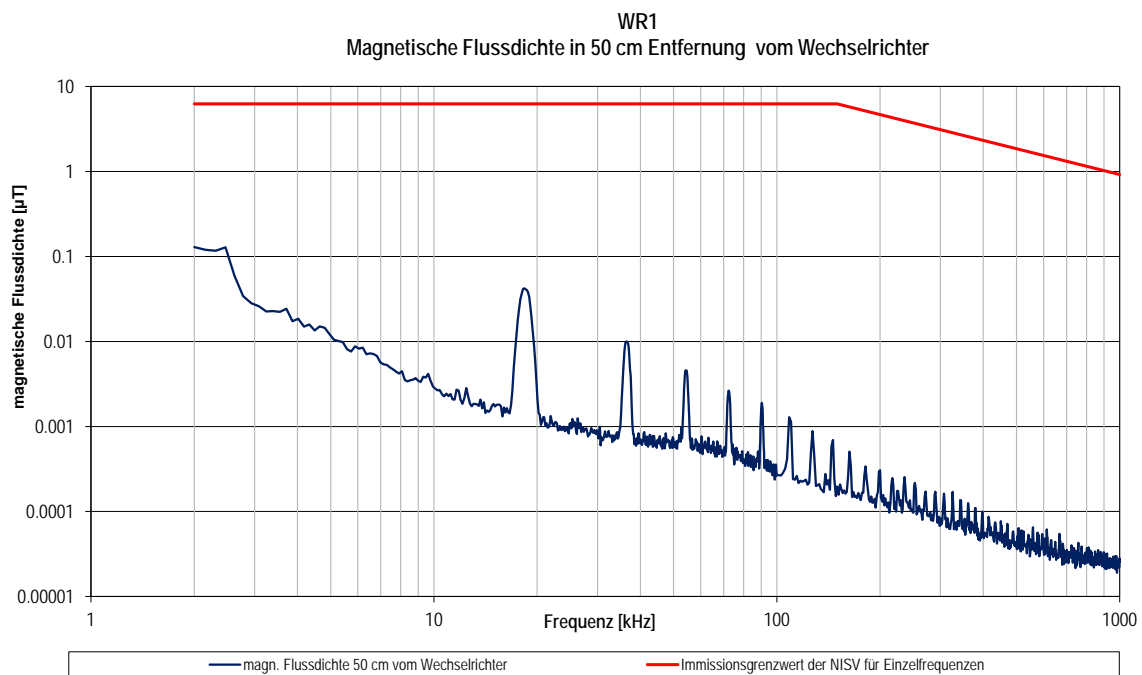


Abbildung 8: Magnetische Flussdichte in einer Distanz von 50 cm zum Wechselrichter WR1

Der Immissionsgrenzwert der NISV wird von jeder Einzelfrequenz sehr klar eingehalten. Die Abbildungen 7 und 8 zeigen zudem deutlich, dass hinsichtlich der Summierungsvorschrift nur die diskreten Frequenzen der Zerhackerfrequenz eine relevante Rolle spielen. Es ist deutlich zu erkennen, dass auch die Summierungsvorschriften klar eingehalten werden.

Die Messungen am Zentralwechselrichter WR2 zeigen zwar ein anderes Spektrum, aber keine grundsätzlich anderen Pegel (Abbildung 9). Es hat sich auch hier bestätigt, dass die hochfrequenten Signale nur unwesentlich von der Leistung abhängig sind.

Da die Messungen am WR2 mit einem anderen, unempfindlicheren Spektrum-Analysator durchgeführt wurden als beim WR1, sind das Grundrauschen und die untere Frequenzgrenze höher.

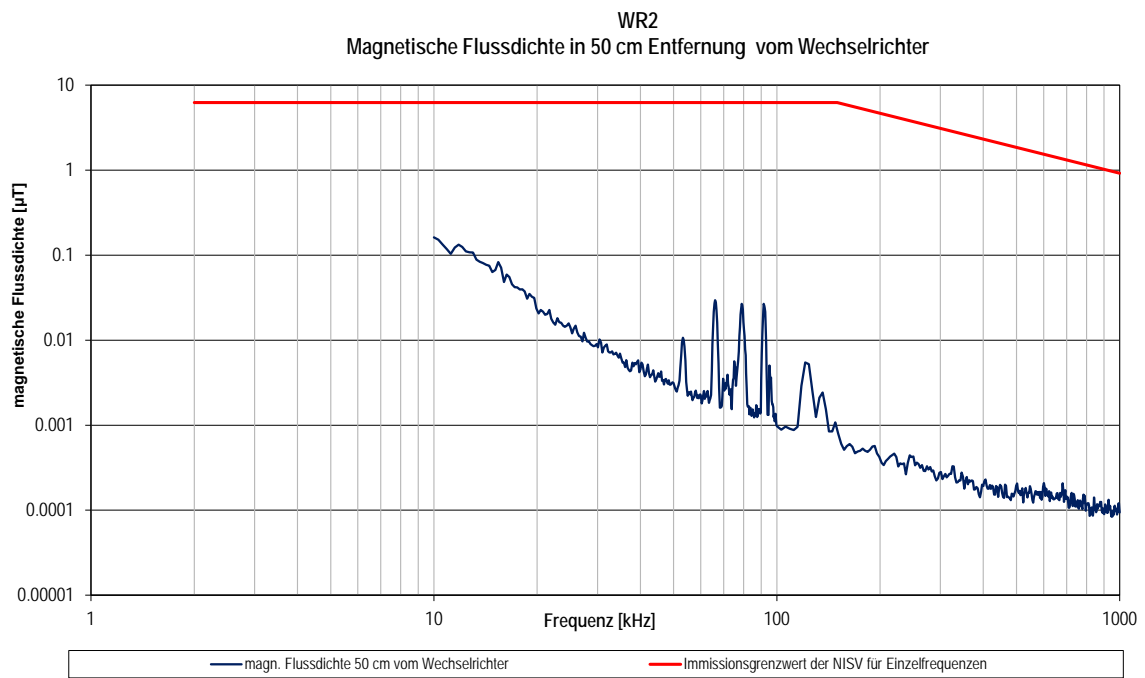


Abbildung 9: Magnetische Flussdichte in einer Distanz von 50 cm zum Wechselrichter WR2

5.3.2. Ergebnisse der Strommessungen

Um einen Eindruck von der Signalausbreitung entlang der angeschlossenen Leitungen zu erhalten, wurden die Ströme auf den einzelnen, am Wechselrichter angeschlossenen Leitungen wie folgt gemessen:

- Gleichtaktstrom auf der DC-Leitung (Abbildung 10; Plus- und Minusleitung in gleicher Richtung durch die Stromzange geführt)
- Gegentaktstrom auf der DC-Leitung (Abbildung 11; Plus- und Minusleitung in entgegengesetzter Richtung durch die Stromzange geführt)
- Strom im Erdleiter (PE-Leiter). Der Wechselrichter WR1 ist über einen Erdleiter mit dem Potentialausgleich des Gebäudes verbunden. Gemessen wurde der Strom, welcher zur Erde abfließt (Abbildung 12).
- Gleichtaktstrom auf der AC-Leitung (Abbildung 13).
- Gleichtaktstrom auf den Datenkabeln (Abbildung 14).

Als Orientierungshilfe wird in den Diagrammen auch eine mit "NIS-Grenzstrom50" bezeichnete Linie dargestellt. Der "NIS-Grenzstrom50" ist jener Strom, welcher bei einer Einzeldrahtleitung notwendig wäre, damit die Immissionsgrenzwerte der NISV in einer Entfernung von 50 cm gerade eingehalten werden könnten (für die Umrechnung s.a. Kap. A.1.4).

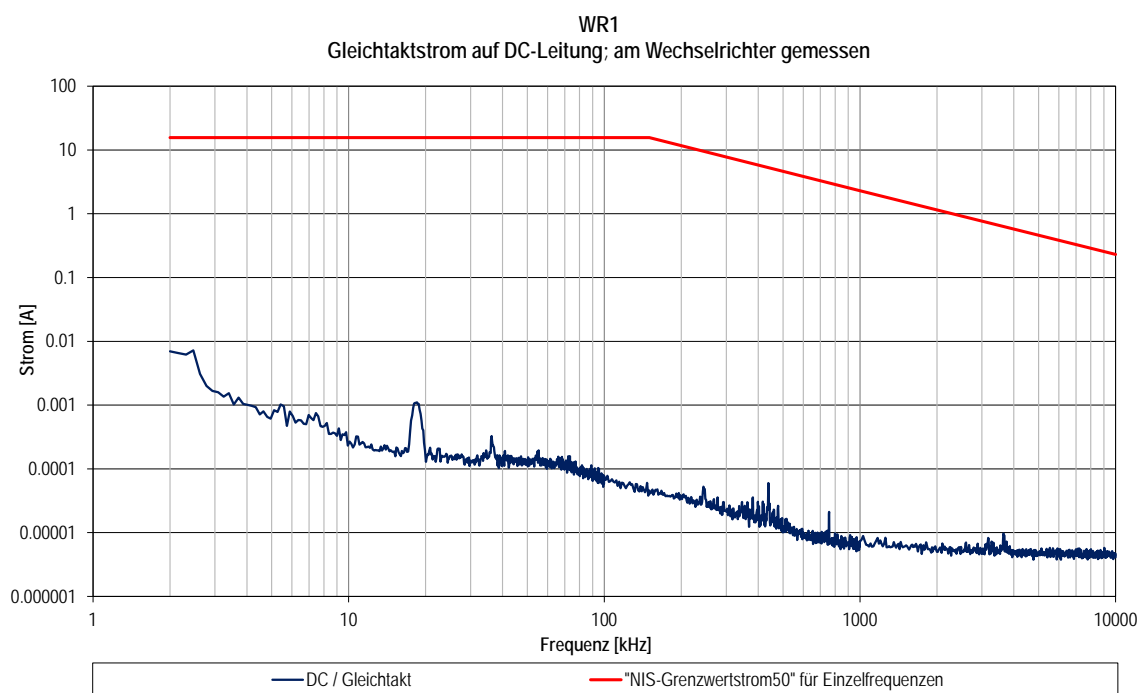


Abbildung 10: DC-seitiger Gleichtaktstrom

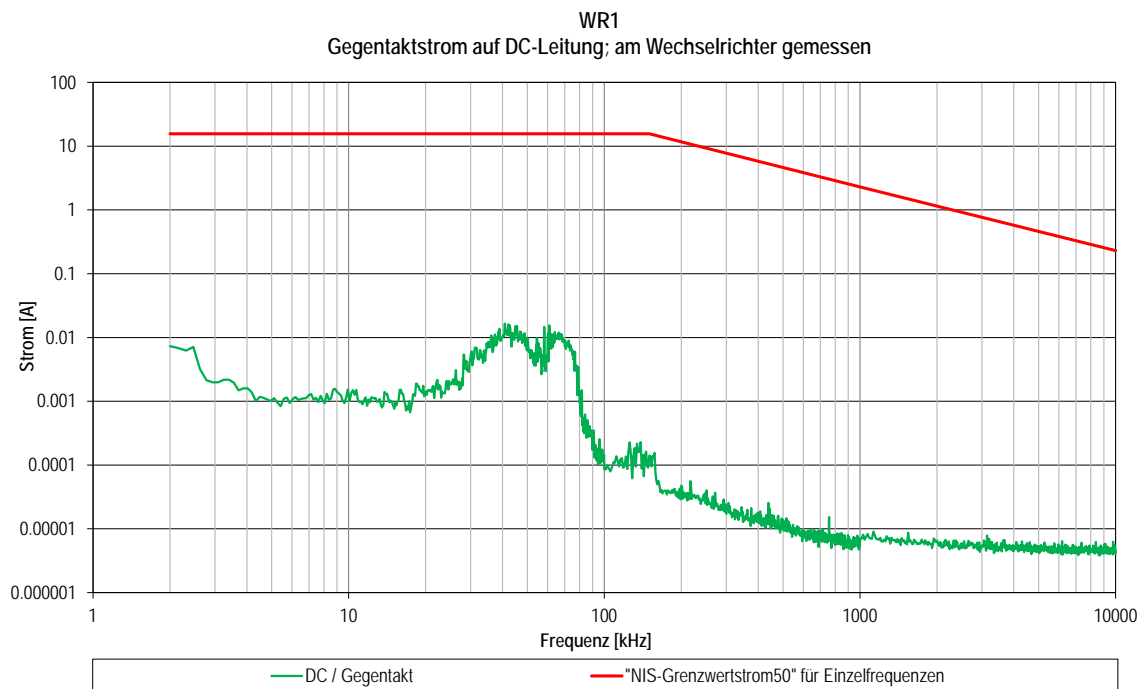


Abbildung 11: DC-seitiger Gegentaktstrom

Der DC-seitige Gegentaktstrom zeigt ein völlig anderes Bild (Profil) als der Gleichtaktstrom.

Im Gleichtaktstrom sind zumindest geringe Spuren der Zerhackerfrequenz vorhanden. Im Gegentaktstrom sind die Einflüsse des Zerhackers nicht zu erkennen. Zu erkennen sind aber insbesondere Spuren des MPP-Trackers. Die Spuren der Zerhackerfrequenz werden davon möglicherweise überdeckt.

Trotz der auffälligen Dominanz des Gegentaktmodus darf nicht vergessen werden, dass die Pegel im Vergleich zum "NIS-Grenzstrom50" niedrig sind und die Magnetfelder beim Gegentaktmodus erheblich reduziert werden, wenn Plus- und Minusleiter nahe zusammen geführt werden. So konnten bei Magnetfeldmessungen entsprechend Kap. 5.3.1 in 50 cm Entfernung von den DC-Leitungen auch keine Spuren des MPP-Trackers festgestellt werden.

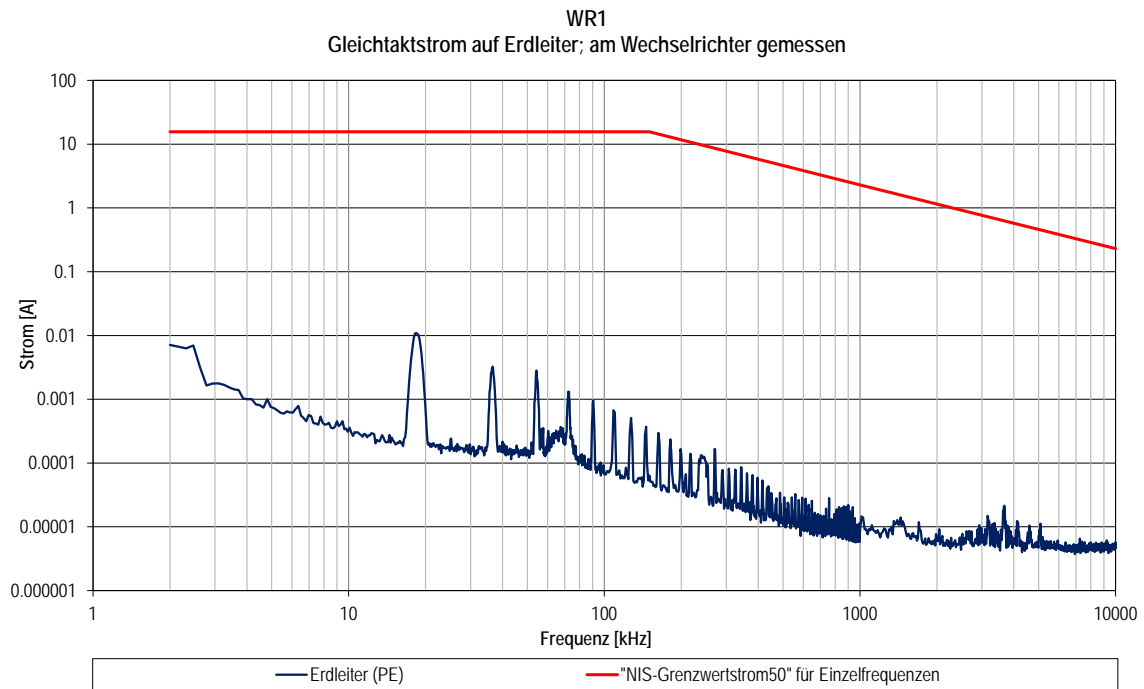


Abbildung 12: Strom im Erdleiter

Im Erdleiter sind Spuren des Zehhackers und auch Spuren der DC-Seite und der übrigen Elektronik erkennbar.

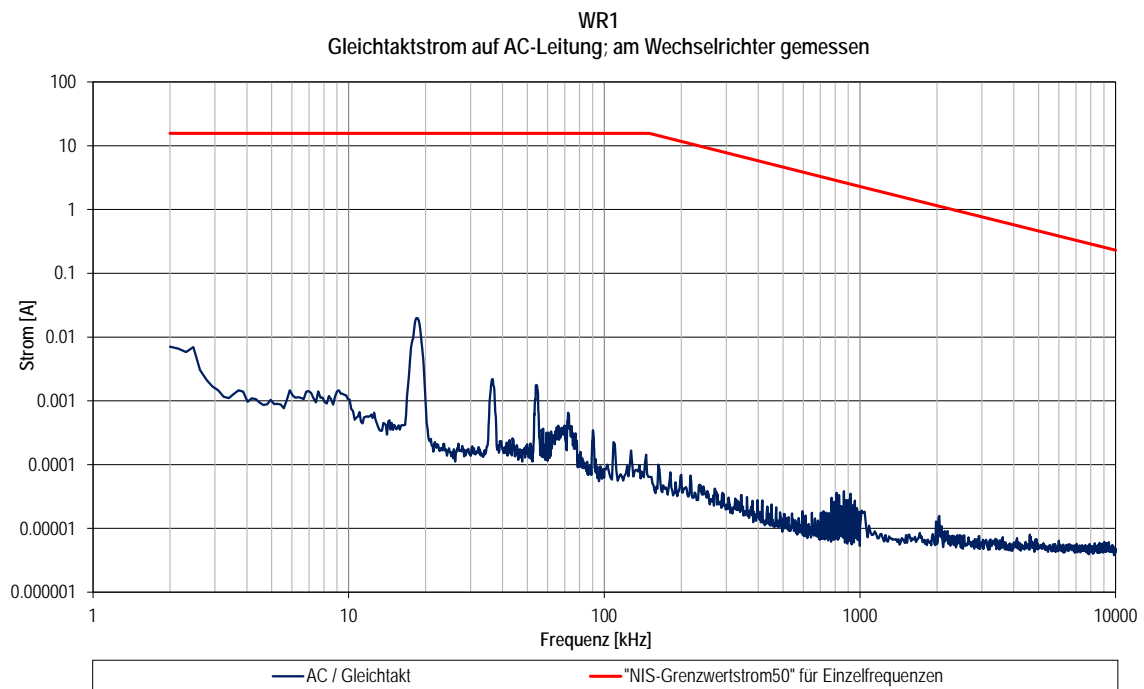


Abbildung 13: AC-seitiger Gleichtaktstrom

Der AC-seitige Gleichtaktstrom ist ähnlich wie der Strom im Erdleiter bei mehrheitlich etwas tieferen Pegeln.

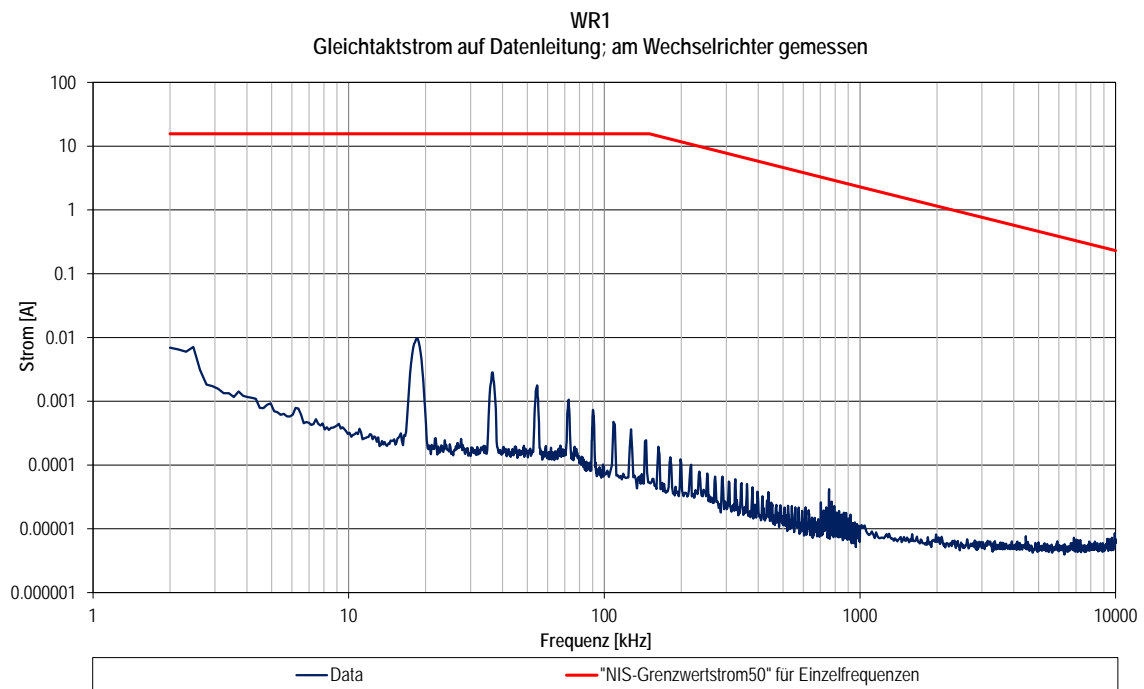


Abbildung 14: Gleichtaktstrom auf den Datenleitungen

Abbildung 14 zeigt deutlich, dass die "Abstrahlung" letztlich über alle angeschlossenen Leitungen erfolgt. Es handelt sich bei den Datenleitungen um geschirmte Ethernetkabel. Der gemessene Strom fließt vorwiegend auf dem Kabelschirm.

Die Messungen am WR2 zeigen auch beim Strom ein zwar anderes Profil als beim WR1, aber nicht grundsätzlich andere Pegel. Es werden in Abbildung 15 zusammenfassend die Maximalwerte aus den Messungen auf den einzelnen Kabeln dargestellt.

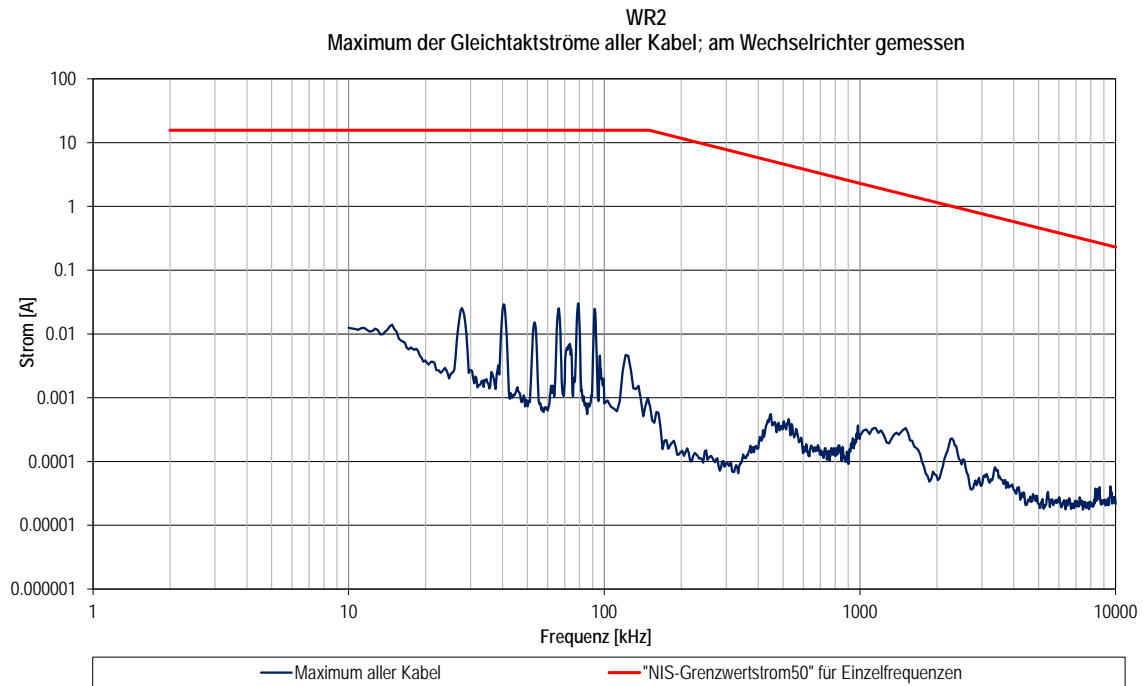


Abbildung 15: Maximum der Gleichtaktströme am WR2

5.3.3. Vergleich zwischen Strom- und Magnetfeldmessungen

Im vorangehenden Kap. 5.3.2 werden die gemessenen Ströme auch als solche dargestellt. Als Orientierungshilfe dient der aus dem NIS-Grenzwert für die magnetische Flussdichte errechnete "NIS-Grenzwertstrom50".

Im Folgenden wird der umgekehrte Weg beschrieben und aus den Maxima aller gemessenen Gleichtaktströme die magnetische Flussdichte in einem Abstand von 50 cm von einem Einzeleiter berechnet. Das Ergebnis dieser Zusammenfassung und Umrechnung wird mit "Stromfeld50" bezeichnet und mit den Magnetfeldmessungen bei den Wechselrichtern verglichen.

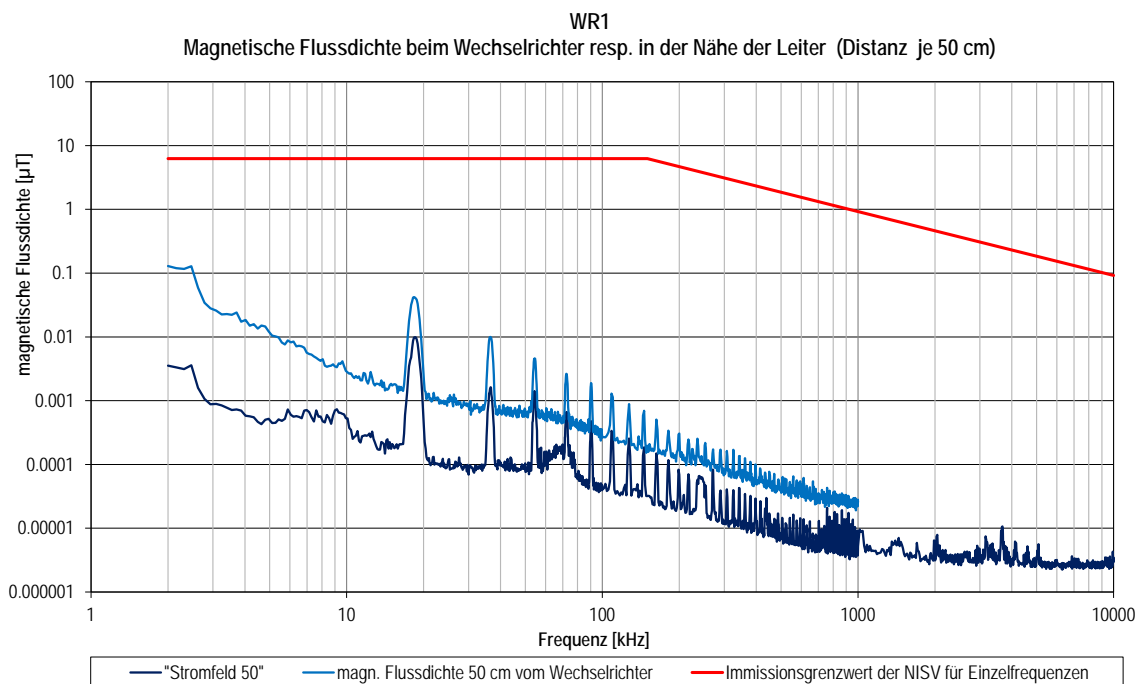


Abbildung 16: Vergleich der aufgrund der Ströme berechneten, maximalen magnetischen Flussdichte entlang der Leiter ("Stromfeld50") mit der gemessenen magnetischen Flussdichte unmittelbar beim Wechselrichter WR1 (Bezugsdistanz für beide Fälle: 50 cm)

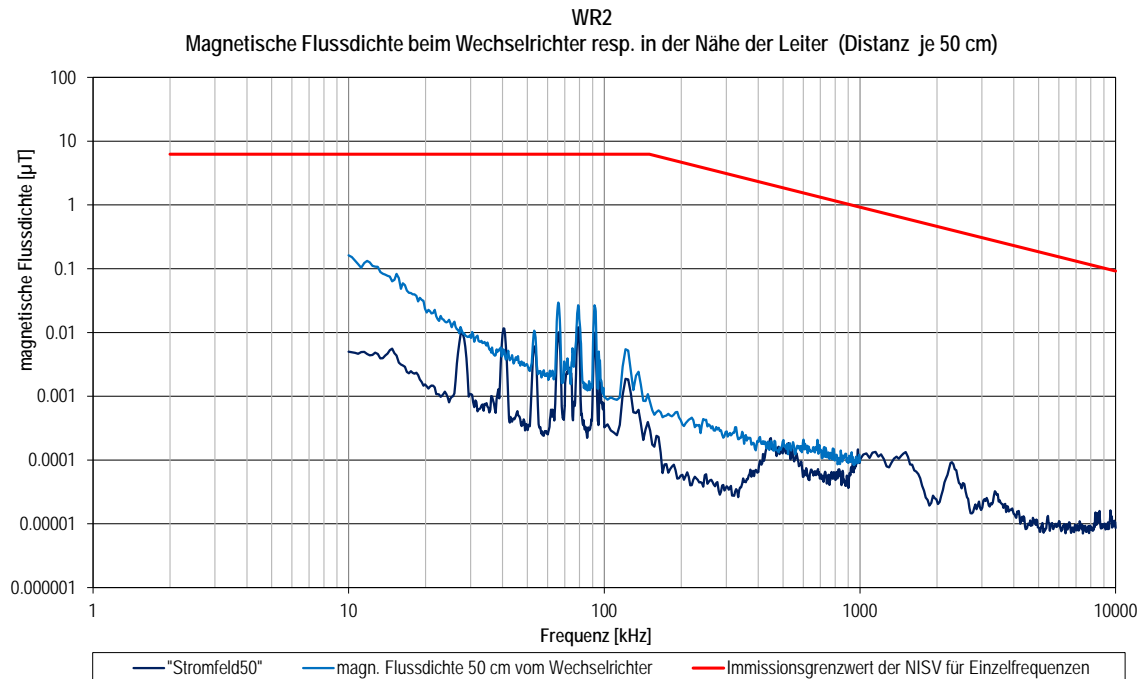


Abbildung 17: Vergleich der aufgrund der Ströme berechneten, maximalen magnetischen Flussdichte entlang der Leiter ("Stromfeld50") mit der gemessenen magnetischen Flussdichte unmittelbar beim Wechselrichter WR2 (Bezugsdistanz für beide Fälle: 50 cm)

Bei beiden Wechselrichtern ist - bei gleicher Bezugsdistanz - das Feld entlang der Leiter kleiner als das Magnetfeld in der unmittelbaren Umgebung der Wechselrichter. Dies deckt sich mit hier nicht näher dokumentierten praktischen Erfahrungen und Messungen entlang der Leitungen. Die grössten Feldstärken treten in der unmittelbaren Umgebung der Wechselrichter auf. Grund dafür sind induktive Bauteile wie Spulen und möglicherweise auch Leiteranordnungen innerhalb der Wechselrichter, welche bei gleichem Strom zu einem stärkeren magnetischen Streufeld führen als das Magnetfeld entlang einer gestreckten Leitung.

5.4. Hinweise für allfällige NIS-Messungen an PV-Anlagen

5.4.1. Niederfrequente Magnetfeldmessungen (50 Hz)

- Die 50-Hz-Magnetfelder schwanken mit der Leistung der PV-Anlage. Bei wechselhaftem Wetter muss für eine allfällige Hochrechnung auf Nennleistung zeitsynchron zur Magnetfeldmessung auch der AC-seitige Strom gemessen werden. Wegen der "langsamen" Veränderungen bei vorüberziehenden Wolken reicht eine "Synchronizität" von wenigen Sekunden. Können die Messungen in einem Zeitraum mit "konstanter" Sonnenbestrahlung durchgeführt werden, so reicht eine einzelne Strommessung. Gegebenenfalls kann die Leistung auch direkt am Wechselrichter abgelesen werden. Bei intensiver Sonnenbestrahlung kann die effektive Leistung über der Nennleistung liegen.
- Die Leistung einer PV-Anlage verändert sich im Tagesverlauf und ist nachts im Wesentlichen Null. Übers Jahr betrachtet verändert sich die Leistung zudem auch aufgrund des Sonnenstandes und aufgrund der Witterung. Ein Tages- oder Jahresmittelwert wird also stark von den Nennleistungsbedingungen abweichen.

5.4.2. Messung hochfrequenter Magnetfelder und Ströme

- Bei niedrigeren Frequenzen (Frequenzen unter ca. 30 MHz) werden Magnetfelder weniger von den Umgebungsbedingungen beeinflusst als elektrische Felder und können auch leichter Bausubstanzen durchdringen. Magnetfeldmessungen sind gegenüber allfälligen Messungen des elektrischen Feldes zu favorisieren.
- Falls Antennen verwendet werden, welche eine Polarisations- und/oder Richtungsabhängigkeit aufweisen (im vorliegenden Fall wurde eine kleine Loop-Antenne verwendet), so ist die Antenne im Messvolumen zu bewegen und der Maximalwert aufzuzeichnen. Weil auch Magnetfelder durch Objekte in der Umgebung "verfälscht" werden können, ist auch bei Magnetfeldmessungen darauf zu achten, dass zwischen der Antenne und der Umgebung ein Abstand von 20 - 50 cm gewahrt bleibt.
- Der Wechselrichter ist die Quelle der hochfrequenten Strahlung einer PV-Anlage. Um das Emissionspotential des gesamten PV-Netzwerks hinsichtlich hochfrequenter nichtionisierender Strahlung beurteilen zu können, kann man sich auf einfach durchzuführende Strommessungen abstützen. Die Strommessungen auf Leitungen führen zu gut reproduzierbaren Ergebnissen und werden durch die Umgebungsbedingungen nur wenig beeinflusst.
- Um eine genügend genaue Aussage über die NIS-Emissionen einer PV-Anlage machen zu können, reicht es aus, die Messungen auf die Umgebung der Wechselrichter zu beschränken. (Messung der Magnetfelder des Wechselrichters und Messung der Ströme auf den angeschlossenen Leitungen zur Beurteilung der Netzwerkeinflüsse).
- Auf Hochfrequenzmessungen oberhalb 10 MHz kann verzichtet werden. Die Abstrahlung der Wechselrichter ist dank der EMV aus NIS-Sicht vernachlässigbar klein und mit den im NIS-Bereich üblichen Messgeräten kaum noch nachweisbar.

5.4.3. Messung elektrischer Felder

- Die Messung elektrischer Felder im Niederfrequenz-, Lang- und Mittelwellenbereich ist problematisch. Wegen der grossen Wellenlängen und der Tatsache, dass schon geringe Leitfähigkeiten der umgebenden Materialien die Messergebnisse beeinflussen können, wird von Messungen der elektrischen Feldstärken bei tieferen Frequenzen in einer Gebäudeumgebung abgeraten.
- Elektrische Felder werden bei tieferen Frequenzen durch Baumaterialien sehr viel leichter abgeschirmt als Magnetfelder. Daher sind Magnetfeldmessungen auch wegen der geringeren Abschwächung durch Abschirmwirkungen vorzuziehen. Dies gilt allerdings nicht unbedingt, wenn die NIS-Messungen in demselben Raum durchgeführt werden müssen, in welchem sich auch die PV-Anlagen befinden.

5.4.4. Messung von Gleichfeldern

- Abgesehen davon, dass die Messung elektrischer oder magnetischer Gleichfelder spezielle Geräte erfordert, können allfällige NIS-Anforderung a priori als erfüllt angesehen werden. Auf die Messung elektrischer oder magnetischer Gleichfelder bei PV-Anlagen kann daher verzichtet werden.

5.4.5. Messung von PV-Anlagen mit Leistungsoptimierern

- Messungen an Leistungsoptimierern wurden keine durchgeführt.
- Da sich Leistungsoptimierer bezüglich Abstrahlung grundsätzlich ähnlich verhalten wie Wechselrichter, können die Messungen auch hier auf Magnetfeldmessungen in der unmittelbaren Umgebung der Leistungsoptimierer und auf Strommessungen begrenzt werden.

6. Wissenslücken, Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Neben den Gleichfeldern der Gleichstromseite (DC-Seite) und den 50-Hz-Feldern der Wechselstromseite (AC-Seite) ist der Wechselrichter die wesentliche Strahlungsquelle.

Grundsätzlich sind die EMV-Vorschriften für die Wechselrichter ein sehr wirksames Mittel, um die nichtionisierende Strahlung zu begrenzen. Die Wissenslücken über die nichtionisierende Strahlung von PV-Anlagen beschränken sich im Wesentlichen auf die Lücken in den EMV-Vorschriften.

Die Wissenslücken können grundsätzlich durch Messungen geschlossen werden, wobei die Messergebnisse - im Gegensatz zu den EMV-Begrenzungen - streng genommen nur für das geprüfte Produkt gelten.

6.1. Wissenslücken im DC-Pfad

Neben den Rückwirkungen der Wechselrichter und/oder der Leistungsoptimierer erzeugt der DC-Pfad ausschliesslich Gleichfelder. Die magnetostatischen Felder lassen sich rechnerisch zuverlässig bestimmen. Die elektrostatischen Felder werden als a priori unkritisch betrachtet. Insofern erübrigt sich auch das Schliessen einer allfälligen Lücke.

6.2. Wissenslücken bei Wechselrichtern und Leistungsoptimierern

Die Strahlung von Wechselrichtern wird durch die EMV-Emissionsvorschriften limitiert. Die Wissenslücken decken sich mit den Lücken in den EMV-Begrenzungen. Messungen können diese Lücken schliessen.

Die Messungen an zwei unterschiedlichen Wechselrichtertypen zeigen, dass auch in den Frequenzlücken der EMV-Normen die Strahlung weit unter den Immissionsgrenzwerten der NISV liegt. Dies ist nicht weiter erstaunlich, als es technisch ohne grossen Aufwand kaum möglich ist, eine "übermässig starke" Strahlung in den Frequenzlücken zuzulassen und diese gleichzeitig in den angrenzenden normativ erfassten Frequenzbereichen ausreichend zu unterdrücken. Trotzdem gelten die messtechnisch ermittelten Werte streng genommen nur für die geprüften Produkttypen. Die Wissenslücke in den EMV-Lücken bleibt streng genommen für alle nicht geprüften Produkte bestehen.

Bei Leistungsoptimierern gilt grundsätzlich das Gleiche wie bei Frequenzumrichtern. Die Wissenslücken sind die EMV-Normierungslücken. Im Gegensatz zu den Wechselrichtern fehlen derzeit praktische und messtechnisch erhärtete Erfahrungen.

6.3. Wissenslücken im AC-Pfad

Die Abstrahlung entspricht der Abstrahlung von Installationen der Hausinstallation. Bei den Grund- und Oberschwingungen von 50 Hz klingen bei Mehrleiterkabeln die Feldstärken mit zunehmender Entfernung sehr rasch ab. Aufgrund der Erfahrungen mit den Geräten und Installationen in der heutigen Hausinstallation gibt es eigentlich keine unbekanntenen Probleme ausser bei den EMV-Normierungslücken der Wechselrichter. Diesbezüglich gilt das Gleiche wie in Kap. 6.2.

6.4. Empfehlungen zur Minimierung der Strahlung

Die nichtionisierende Strahlung von PV-Anlagen kann durch folgende Massnahmen grundsätzlich und unabhängig von irgendwelchen Grenzwertbetrachtungen reduziert werden:

- DC-seitig ist auf eine sorgfältige Installation zu achten. Insbesondere sind Plus- und Minusleiter nahe zusammen zu führen.
- Die Quelle hochfrequenter Strahlung ist der Wechselrichter. Die Strahlung in unmittelbarer Umgebung des Wechselrichters ist dabei stärker als die über die Leitungen verschleppte Strahlung. Die Strahlung um den Wechselrichter klingt mit dem Abstand rasch ab. Möchte man die Strahlung am Aufenthaltsort von Menschen reduzieren, so ist auf eine ausreichende Distanz zwischen Wechselrichter und Mensch zu achten. Schon nach wenigen Metern ist der Einfluss des Wechselrichters kaum noch feststellbar.
- AC-seitig ist die Strahlung vergleichbar mit der Strahlung entlang der Kabel für die "üblichen" Energieverbraucher der Hausinstallation. Wenn möglich sind AC-seitig Mehrleiterkabel zu verwenden.
- Bei der Abwägung aller Massnahmen muss man sich bewusst sein, dass die nichtionisierende Strahlung einer PV-Anlage nachts nicht vorhanden ist.

7. Abkürzungen / Begriffe

Bestrahlungsstärke	Leistung elektromagnetischer Energie, die auf eine Oberfläche trifft
AC	Wechselstrom (alternating current)
DC	Gleichstrom (direct current)
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
FP	Frequenzpunkt
GAK	Generatoranschlusskasten
LISN	Netznachbildung (line impedance stabilization network)
MPP	Maximum Power Point (Arbeitspunkt maximaler Leistung für PV-Module)
MPPT	Maximum Power Point Tracker
MPT	Kurzform für MPPT
NIS	Nichtionisierende Strahlung
ppm	"parts per million"
PV	Photovoltaik, Begriff für die Erzeugung elektrischer Energie aus Licht
PV-Generator	Bereich der Photovoltaikanlage, welcher Licht in elektrische Energie umwandelt
PV-Modul	Photovoltaikmodul, Solarmodul; zu einer Verkaufs- und Montageeinheit zusammengefügte Photozellen
PWM	Pulsweitenmodulation
Strang	Siehe "String"
String	Serieschaltung von mehreren PV-Modulen (auch "Strang" genannt)
STC	Standard-Testbedingungen (standard test condition); 1'000 W/m ² , AM1.5-Spektrum, Zelltemperatur 25°C

8. Literatur

[16-1-1]	SN EN 55016-1-1:2010, Anforderungen an Geräte und Einrichtungen sowie Festlegung der Verfahren zur Messung der hochfrequenten Störaussendung (Funkstörungen) und Störfestigkeit - Teil 1-1: Geräte und Einrichtungen zur Messung der hochfrequenten Störaussendung (Funkstörungen) (CISPR 16-1-1:2010+A1:2010)
[50160]	SN EN 50160:2010, Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen
[61-3-2]	SN EN 61000-3-2:2006, Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV). Teil 3-2: Grenzwerte - Grenzwerte für Oberschwingungsströme (Geräte-Eingangsstrom ≤ 16 A je Leiter) (IEC 61000-3-2:2005)
[61-3-4]	IEC 61000-3-4 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-4: Limits - Limitation of emission of harmonic currents in low-voltage power systems for equipment with rated current greater than 16 A, Technical Report 1998
[61-3-12]	Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV). Teil 3-12: Grenzwerte - Grenzwerte für Oberschwingungsströme, verursacht von Geräten und Einrichtungen mit einem Eingangsstrom >16 A und ≤ 75 A je Leiter, die zum Anschluss an öffentliche Niederspannungsnetze vorgesehen sind (IEC 61000-3-12:2011)
[61-3-15]	IEC/TR 61000-3-15 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-15: Limits - Assessment of low frequency electromagnetic immunity and emission requirements for dispersed generation systems in LV networks, Technical Report Ed. 1.0, 2011
[61-6-3]	SN EN 61000-6-3:2007+A1:2011, Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV), Teil 6-3: Fachgrundnormen – Störaussendung für Wohnbereich, Geschäfts- und Gewerbebereiche sowie Kleinbetriebe
[61-6-4]	SN EN 61000-6-4:2007+A1:2011, Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV), Teil 6-4: Fachgrundnorm – Störaussendung für Industriebereiche
[62233]	SN EN 62233:2008, Verfahren zur Messung der elektromagnetischen Felder von Haushaltgeräten und ähnlichen Elektrogeräten im Hinblick auf die Sicherheit von Personen in elektromagnetischen Feldern (IEC 62233:2005, mod.)
[Berg]	Arno Bergmann, Photovoltaikanlagen, Normengerecht errichten, betreiben, herstellen und konstruieren, VDE-Schriftenreihe 138, VDE-Verlag, 2011
[Bopp1]	W. Bopp, Verursachen Photovoltaikanlagen Elektrosmog?, Pressemeldung von Baubiologie Regional, Bayreuth, 18. 12. 2006
[Bopp2]	W. Bopp, Verursachen Photovoltaikanlagen Elektrosmog?, Pressemeldung Arbeitskreis Baubiologie Mainfranken IBN, 24. März 2009
[Bopp3]	G. Bopp, T. Erge Welche EMV-Normen sind für die Photovoltaik relevant?, Fraunhofer- Institut für Solare Energiesysteme ISE, Artikel aus Fachseminar EMV und Blitzschutz in Photovoltaik-Anlagen 26./27. September 2002, Freiburg
[Bopp4]	G. Bopp, R. Schätzle, Inwieweit tragen Photovoltaik-Anlagen zum Elektrosmog



	bei?, Artikel aus Energieversorgung und Mobilfunk, Elektromagnetische Verträglichkeit, 1. EMV Tagung des VDB 19.-20. April 2002
[Brin]	Bernd Brinkmeier, Elektrosmog durch PV-Anlagen, Solarenergie Förderverein Deutschland SFV, 2005
[DACHCZ]	D-A-CH-CZ Technische Regeln zur Beurteilung von Netzzrückwirkungen, VSE, 2007
[Dege1]	T. Degner, E. Enders, A. Schülbe, H. Daub et. Al., EMC and Safety Design for Photovoltaic Systems (ESDEPS), 16 th European Solar Energy Conference and Exhibition, Glasgow, 1.-5- May 2000
[Dege2]	T. Degner, N. Henze, J. Kirchhof, Elektromagnetische Verträglichkeit und Sicherheitsdesign für Photovoltaische Systeme – Funkstörungen in Photovoltaikanlagen, 16. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Kloster Banz, Staffelstein, 14. – 16. März 2001
[Dege3]	T. Degner, W. Enders, A. Schülbe, H. Daub, Elektromagnetische Verträglichkeit und Sicherheitsdesign für Photovoltaische Systeme – das europäische Verbundprojekt ESDEPS, 14. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Staffelstein, 10.-12. März 1999
[DGS]	Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie (DGS) – 2 nd ed., Planning and installing photovoltaic systems: a guide for installers, architects, and engineers , Reprint 2006
[EleG]	SR 734.0, Bundesgesetz betreffend die elektrischen Schwach- und Starkstromanlagen (Elektrizitätsgesetz, EleG) vom 24. Juni 1902 (Stand am 1. August 2008)
[Erge]	T. Erge, C. Bendel, G. Bopp, T. Trümper, Elektromagnetische Verträglichkeit von Photovoltaikanlagen, Forschungsverbund Sonnenenergie "Themen 96/97"
[Falk]	Falk Anthony, Christian Dürschner, Karl-Heinz Remmers, Photovoltaik für Profis, Verkauf, Planung und Montage von Solarstromanlagen, Solarpraxis AG, 2. Auflage, 2009
[Frös]	Heinz-Dieter Fröse, Regelkonforme Installation von PV-Anlagen, Hüthig&Pflaum Verlag, 2011
[Graf]	Bundesamt für Energie (BFE), J.-D. Graf, H. Häberlin, Qualitätssicherung von Photovoltaikanlagen – Schlussbericht, BFE Projekt Nr. DIS Nr. 2744 / 61703, ENET Nr. 200023
[Häbe1]	H. Häberlin, Photovoltaik – Strom aus Sonnenlicht für Verbundnetz und Inselanlagen, Electrosuisse Verlag und VDE Verlag, 2. Auflage 2010
[Häbe2]	H. Häberlin, R. Fischer, Netznachbildungen und Grenzwerte für EMV-Messungen auf der Gleichstromseite von Photovoltaik-Anlagen, 16. Symposium Photovoltaische Solarenergie Staffelstein / BRD 14. - 16.03.2001
[Häbe3]	Bundesamt für Energie (BFE), Berner Fachhochschule, Technik und Informatik Photovoltaiklabor, H. Häberlin, Photovoltaik Systemtechnik PVSYSSTE 2007 – 2010, BFE Bereichsleiter: Dr. Stefan Oberholzer, Februar 2011



[Heine1]	M.Heinemann, S.Mocker, EMV-Messung von PV-Modulen, Artikel in Sonne Wind & Wärme 12/2011
[Heine2]	M.Heinemann, S.Mocker, EMV-Messung von PV-Modulen, Hochschule Albstadt-Sigmaringen Studiengang Wirtschaftsingenieurwesen
[Kirch1]	J. Kirchhof, EMV und Blitzschutz in Photovoltaik-Anlagen, EMV Messverfahren und Grenzwerte, Fachseminar Technologiekolleg OTTI, 27.-28.11.2003
[Kirch2]	J. Kirchhof, EMV-Grenzwerte, - Messverfahren und Messergebnisse für PV, Institut für Solare Energieversorgungstechnik, Verein an der Universität Kassel (ISET) e.V., EMV, Blitz- und Brandschutz in Solaranlagen, Fachseminar OTTI, Regensburg, 05. – 06. November 2008
[Kirch3]	J. Kirchhof, Grenzwertlücke - Wechselrichter stört Elektrozähler, EMV 2010, Düsseldorf
[Konr]	Frank Konrad, Planung von Photovoltaik-Anlagen, Verlag Vieweg+Teubner, 2. Erweiterte Auflage, 2008
[Luqu]	Antonio Luque, Steven Hegedus, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, Verlag John Wiley & Sons Ltd, 2003
[Mark]	Tom Markvart, Luis Castañer, Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications, Verlag Elsevier Ltd, 2003
[Mert]	Konrad Mertens, Photovoltaik, Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis, Hüthig Fachbuchverlag Leipzig, 2011,
[Newe]	P. Newerla, B. Newerla, Photovoltaik und Elektromog – was man bei der Installation einer Photovoltaikanlage beachten sollte , FreiRaum, Heglestrasse 38, 72108 Rottenburg
[NIN]	SEV 1000:2010, Niederspannungs-Installationen (NIN 2010), Electrosuisse, 2010
[NISV]	SR 814.710, Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung NISV) vom 23. Dezember 1999 (Stand am 1. Juli 2012)
[NIV]	SR 734.27, Verordnung über elektrische Niederspannungsinstallationen (NIV) vom 07. November 2001 (Stand am 1. Januar 2013)
[Piaz]	Maria Carmela Di Piazza, Calogero Serporta, Giovanni Tinè, Gianpaolo Vitale, ElectroMagnetic Compatibility Characterisation of the DC Side in a Low Power Photo Voltaic Plant, 2004 IEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 2004
[Schla]	Steffen Schlattner, Die elektromagnetische Verträglichkeit und der Blitzschutz von Photovoltaik-Anlagen, Dissertation, Universtität Fridericiana Karlsruhe, 2001
[Stöck]	Andreas Stöcklhuber, Roland Lüders, Photovoltaik, Normen und Vorschriften, Testberichte, Beratung und Verkauf, de-Jahrbuch 2012, Hüthig & Pflaum, 2012,
[SUVA]	1903.d, Grenzwerte am Arbeitsplatz 2013, SUVA, Arbeitsmedizin, Januar 2013
[Thal]	K.Thalmann, M.Gugler, Elektromog – ein Thema in aller Munde, doch viele Quellen sind wenig bekannt, Bulletin SEV / VSE 15/2007

[Urba]	Stefan Urbank, Magnetisches Restfeld von Transformatoren und Kabelverbindungen, Fachhochschule Lausitz, Diplomarbeit, November 2004
[USG]	SR 814.01, Bundesgesetz über den Umweltschutz (Umweltschutzgesetz, USG) vom 7. Oktober 1983 (Stand am 1. August 2010)
[Vasi]	G.Vasilescu, F. Popentiu, Renewable Energy Generators and Electromagnetic Pollution: A Case Study on Residential Solar Energy, Analele Universitatii din Oradea, Fasciula de Energetica, Vol.15, 2009
[VEMV]	SR 734.5 Verordnung über die elektromagnetische Verträglichkeit (VEMV) vom 18. November 2009 (Stand am 1. Januar 2010)
[VPeA]	SR 734.25, Verordnung über das Plangenehmigungsverfahren für elektrische Anlagen (VPeA) vom 02. Februar 2000 (Stand am 1. September 2009)
[Wage]	Hans-Günther Wagemann, Heinz Eschrich, Photovoltaik, Solarstrahlung und Halbleitereigenschaften, Solarzellenkonzepte und Aufgaben, Verlag Vieweg + Teubner, 2. überarbeitete Auflage, 2010,
[Wagn]	Andreas Wagner, Photovoltaik Engineering, Handbuch für Planung, Entwicklung und Anwendung, Springer Verlag 2010, 3.erw. Auflage,
[Zach]	P. Zacharias, Elektromagnetische Beeinflussung durch Photovoltaikanlagen, Artikel in Elektrosmog-Report 7(4), Institut für Solare Energieversorgungstechnik (ISET), April 2001
[Zöll]	P. Zöllner, Referat: Photovoltaik, Skript "Elektrische Gebäudeausrüstung inkl. Beleuchtung", Fachhochschule Köln,

A Anhang

A.1. Umrechnung der EMV-Limitierungen auf NIS-Werte

A.1.1. EMV-Mess- und NIS-Bezugsdistanzen

Die Messdistanzen in den relevanten EMV- Normen betragen bei der feldgeführten Abstrahlung drei oder zehn Meter.

Die Immissionsgrenzwerte der NISV limitieren die Feldstärken am Aufenthaltsort von Menschen. Dieser Aufenthaltsort kann bedeutend näher bei einer elektrischen Anlage oder bei einer elektrischen Leitung liegen als die EMV-Messdistanzen. Im Rahmen dieses Berichts wird für NIS-Betrachtungen von einer NIS-Bezugsdistanz von 50 cm ausgegangen. Diese Minimaldistanz basiert auf der Annahme, dass sich die PV-Anlage in einem anderen Raum befindet als der massgebende Aufenthaltsort von Menschen und setzt sich wie folgt zusammen:

Annahmen	Distanzbeitrag
Gerätemitte bis zum angrenzenden Raum, inkl. dazwischen liegender Wand oder Boden	30 cm
Minimaldistanz eines Menschen zur Wand oder zum Boden	20 cm
Total (= NIS-Bezugsdistanz)	50 cm

Tabelle A1: Annahmen zur Bestimmung der NIS-Bezugsdistanz

Für die Umrechnung der EMV-Messdistanzen auf die NIS-Bezugsdistanz wird davon ausgegangen, dass sich der Aufenthaltsort eines Menschen im Nahfeld (Induktionsfeld) der Quelle befindet und die Feldstärke mit abnehmender Entfernung quadratisch zunimmt ("1/r²-Verhalten").

Für die Distanzumrechnung ergeben sich damit folgende Umrechnungsfaktoren:

EMV-Messdistanz	NIS-Bezugsdistanz	Distanzfaktor	Distanzfaktor in dB
10 m	0.5 m	400	52.0 dB
3 m	0.5 m	36	31.1 dB

Tabelle A2: Umrechnung von Feldstärken bei der EMV-Messdistanz auf die NIS-Bezugsdistanz

Beispiel: Erlauben die EMV-Anforderungen bei einer Messdistanz von 10 m eine maximale elektrische Feldstärke von 100 µV/m, so ergibt die Distanzumrechnung, dass ein Mensch in einer NIS-Bezugsdistanz von 0.5 m einer 400 mal höheren Feldstärke von 40 mV/m ausgesetzt sein kann.

A.1.2. Summierungsvorschrift bei Immissionen mit mehreren Frequenzen

Sind verschiedene Frequenzen gleichzeitig vorhanden, so sind bei einer NIS-Beurteilung die Effektivwerte bei den einzelnen Frequenzen entsprechend den Summierungsvorschriften zusammenzufassen [NISV, Anhang 2, Ziff. 2ff). Die Summierung erfolgt für Frequenzen zwischen 1 Hz und 10 MHz linear und für Frequenzen über 100 kHz geometrisch (Wurzel aus der Quadratesumme). Für Frequenzen zwischen 100 kHz und 10 MHz sind beide Summierungsverfahren anzuwenden.

Im Gegensatz zur NISV werden in der EMV keine expliziten Summierungen vorgenommen. Die EMV-Limiten sind bei jeder einzelnen Frequenz einzuhalten. Die EMV-Anforderungen werden also auch dann eingehalten, wenn - wie in Abbildung A.1 dargestellt - die Grenzwerte in vielen Punkten entlang der Frequenzachse gerade eingehalten werden.



Angenommene Abstrahlung eines fiktiven Gerätes, welches einen angenommenen EMV-Grenzwert in vielen "Frequenzpunkten" (1 MHz-Raster) gerade noch einhält.

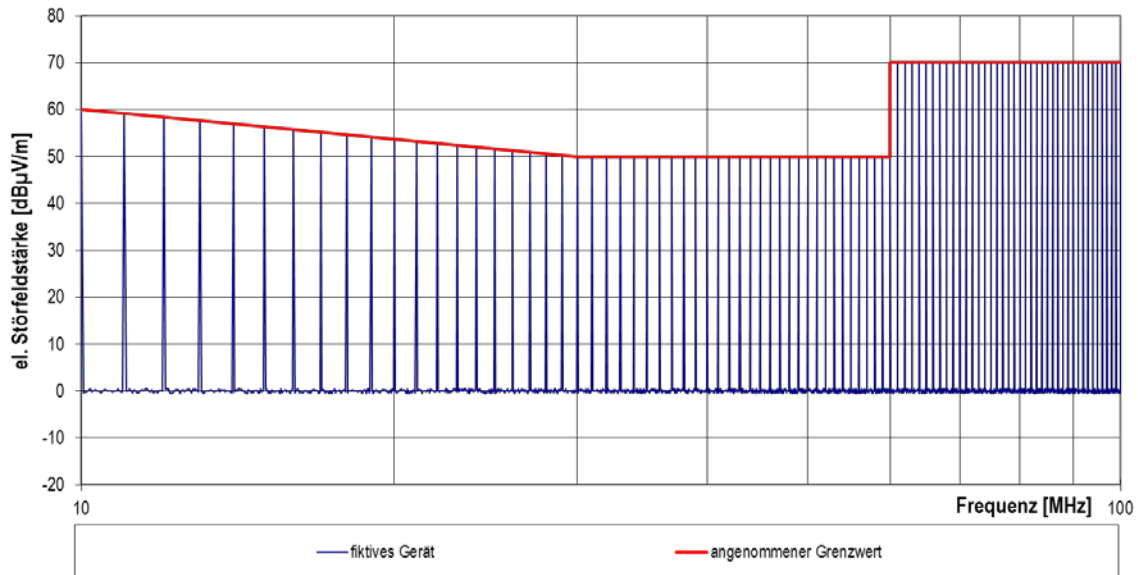


Abbildung A1: Fiktives Gerät, welches in vielen Frequenzpunkten den willkürlich angenommenen EMV-Grenzwert gerade einhält. Das Gerät erfüllt damit die EMV-Anforderungen. Zur NIS-Interpretation müssten die einzelnen Werte entsprechend der Summierungsvorschriften addiert werden. Der Ursprung der dargestellten Abstrahlung könnte theoretisch ein einziges, nichtsinusförmiges Signal sein (beispielsweise mit einer Frequenz von 1 MHz).

Für die NIS-Interpretation ist zu beachten, dass die spektralen EMV-Messungen (EMV-Messung im Frequenzbereich) mit einer definierten Messbandbreite (Bandpassfilter) erfolgen. Es erfolgt dabei eine - mit der Filterkurve und dem Detektor gewichtete - Art der Summierung aller Frequenzanteile innerhalb der Messbandbreite. Der in einem Frequenzbereich (Durchlassbereich des Filters) ermittelte Wert wird der Messfrequenz, also einem Punkt auf der Frequenzachse zugeordnet. Während den spektralen EMV-Messungen wird die Frequenzachse in der Regel in diskreten Frequenzschritten abgetastet. Die Schrittweite muss dabei so klein sein, dass Frequenzanteile zwischen den Abtastfrequenzen nicht "übersehen" werden. Unter Einhaltung dieser Bedingung wird in der EMV die Schrittweite so gross wie möglich gewählt, um die Dauer einer Messung klein zu halten. In der EMV liegt die Schrittweite meist zwischen ca. 50 - 100 % der Messbandbreite.

Bezüglich der NIS-Interpretation wird im Sinne einer worst-case Annahme eine Schrittweite von einem Drittel der Messbandbreite angenommen. Durch die geringe Schrittweite werden Einzelfrequenzen und Frequenzanteile teilweise auf mehrere Punkte entlang der Frequenzachse abgebildet. Für ein Gaussfilter und geometrische Summierung wird bei der angenommenen Schrittweite das Summierungsergebnis um bis zu ca. 30% überschätzt.

A.1.3. Spitzenwert, Quasi-Spitzenwert und Mittelwert

In der EMV wird zwischen einer Spitzenwert-, einer Quasi-Spitzenwert- und einer Mittelwert-Bewertung der "Störsignale" unterschieden. Die Quasi-Spitzenwert-Bewertung ist eine "Fast-Spitzenwert-Bewertung", wobei dem Verträglichkeitseindruck einer Störung Rechnung getragen

wird. Es wird dabei angenommen, dass kurzzeitige, seltene Ereignisse als weniger störend empfunden werden als lange andauernde Störungen. Für letztere entspricht der Quasi-Spitzenwert dem Spitzenwert. Für höherfrequente, schmalbandige, stationäre Signale (z.B. ein Sinussignal bei 10 MHz) führen Spitzenwert, Quasi-Spitzenwert- und Mittelwertmessung auf das gleiche Ergebnis.

Für eine NIS-Beurteilung ist bis 100 kHz der maximale Effektivwert, oberhalb von 10 MHz der Mittelwert über 6 Minuten und dazwischen - wegen der Summierungsvorschriften - beides zu beachten.

Für die Interpretation der EMV-Limitierungen als NIS-Werte ist insbesondere die Umrechnung zwischen Quasi-Spitzenwert und Spitzenwert von Bedeutung. Dem grundsätzlichen Prinzip folgend, dass die NIS-Interpretation auf worst-case EMV-Annahmen abgestützt wird, muss für die Umrechnung von Quasi-Spitzenwert auf Spitzenwert von einem Einzelimpuls ausgegangen werden. Gemäss CISPR 16 [16-1-1] beträgt die Differenz für das Frequenzband von 150 kHz bis 30 MHz (Band B) 29.5 dB (im Vergleich dazu würde der Umrechnungsfaktor von Quasi-Spitzenwert auf Spitzenwert bei einer Pulsfrequenz von 50 Hz "nur" 8.5 dB betragen).

Es werden für die NIS-Interpretation folgende Umrechnungen vorgenommen:

Frequenzbereich	Signalbewertung gemäss EMV-Normen	Signalbewertung gemäss NISV	Korrektur EMV-> NISV
50 Hz – 2 kHz	Effektivwert	max. Effektivwert	keine
2 kHz – 150 kHz	--- (Lücke)	max. Effektivwert	---
150 kHz – 10 MHz	Mittelwert und Quasi-Spitzenwert (leitungsgeführt)	max. Effektivwert für die Summierung bis 10 MHz	+ 29.5 dB gegenüber EMV-Quasi-Spitzenwert
		6 Minuten Mittelwert für Einzelfrequenzen und die Summierung bis 300 GHz	0 dB gegenüber EMV-Mittelwert
10 MHz – 30 MHz	Mittelwert und Quasi-Spitzenwert (leitungsgeführt)	6 Minuten Mittelwert	0 dB gegenüber EMV-Mittelwert
30 MHz – 1 GHz	Quasi-Spitzenwert (feldgeführt)	6 Minuten Mittelwert	0 dB gegenüber EMV-Quasi-Spitzenwert
1 GHz – 6 GHz	Spitzenwert und Mittelwert	6 Minuten Mittelwert	0 dB gegenüber EMV-Mittelwert

Tabelle A3: Umrechnung der Signalbewertung der EMV auf die Signalbewertung der NISV.

A.1.4. Umrechnung von Spannungen auf Ströme

Im Frequenzbereich zwischen 150 kHz und 30 MHz wird die leitungsgeführte Störaussendung in der EMV in der Regel als Störspannung beschrieben, wobei die Messung mittels einer so genannten Netznachbildung erfolgt. Die Netznachbildung dient insbesondere der Impedanzkontrolle.

Für die NIS-Interpretation wird die Spannung mittels der Impedanz der Netznachbildung und dem Ohm'schen Gesetz in einen Strom umgerechnet (Strom = Spannung / Impedanz). Die Magnetfeldberechnung am Aufenthaltsort von Menschen in 50 cm Entfernung von der Leitung erfolgt unter der worst-case Annahme eines zylindrischen Einzelleiters angeregt im Gleichtaktmodus.

$$B [\mu T] = 0.4 \cdot I [A]$$

(Distanz: 0.5 m; B: magnetische Flussdichte in Mikrottesla, I: Strom in Ampère)

Für die Umrechnung der Spannungen in Ströme ergeben sich folgende Umrechnungsfaktoren:

Frequenz	Impedanz der Netznachbildung AC-seitig (50µH+5Ω)//50Ω		Impedanz der Netznachbildung DC-seitig 150Ω	
	[dBΩ]	[Ω]	[dBΩ]	[Ω]
150 kHz	30.3	32.7	43.5	150
500 kHz	33.5	47.2		
1 MHz	33.8	49.3		
10 MHz	34.0	50.0		
30 MHz	34.0	50.0		

Tabelle A4: Umrechnungsfaktoren für die Umrechnung von Spannungen in Ströme

Beispiel: Liegt der EMV-Grenzwert bei 500 kHz beispielsweise bei 1 mV (60 dBµV) so beträgt der entsprechende 500 kHz-Stromanteil auf der AC-Leitung ca. 21 µA (1 [mV]/47.2 [Ω]). In einer Entfernung von 50 cm ergibt dies eine magnetische Flussdichte von ca. 8 pT. Auf einer DC-Leitung wäre der 500 kHz-Stromanteil etwa 6.7 µA (1 [mV]/150 [Ω]) und die magnetische Flussdichte in 50 cm Entfernung ca. 2.7 pT.

A.2. NIS-Interpretation der EMV-Normen bei Frequenzen über 150 kHz

Im Folgenden werden die EMV-Limitierungen für Wechselrichter auf NIS-Werte umgerechnet. Die Umrechnungen erfolgt dabei im Wesentlichen für Einzelfrequenzen. Bezüglich der NIS-Summierungsvorschriften wird angegeben, bei wievielen einzelnen Punkten entlang der Frequenzachse ("Frequenzpunkte" genannt) die EMV-Limite gerade erreicht werden müsste, um die NIS-Summierungsvorschrift noch einzuhalten. Wie in Kap. A.1.2 beschrieben, beträgt der minimale Abstand zwischen zwei Frequenzpunkten ein Drittel der EMV-Messbandbreite..

A.2.1. Leitungsführte Emissionen auf AC-Leitungen (150 kHz - 30 MHz)

In den für Wechselrichter derzeit gültigen Normen SN EN 61000-6-3 und SN EN 61000-6-4 (Kap. 4.7.5), werden (Stör-)Spannungen im Frequenzbereich zwischen 150 kHz und 30 MHz spezifiziert, welche entsprechend Kap. A.1.4 in Ströme und daraus in magnetische Flussdichten umgerechnet werden.

In den EMV-Normen wird ein Grenzwert für die Quasi-Spitzenwert-Bewertung und einen Grenzwert für die Mittelwert-Bewertung vorgegeben. Beide Grenzwerte sind einzuhalten.

Die NISV sieht oberhalb von 100 kHz folgende Bewertungen vor:

- Einzelfrequenzen: Mittelung des Effektivwertes über 6 Minuten.
- Mehrere Frequenzen: 1 Hz - 10 MHz: Addition der maximalen Effektivwerte je Frequenzpunkt gewichtet mit dem NIS-Grenzwert der Einzelfrequenz (bis 65 kHz) resp. gewichtet mit 6.25 μ T. Der Grenzwert ist eingehalten, wenn die Summe kleiner 1 ist.

$$\sum_{1\text{Hz}}^{65\text{kHz}} \frac{B_f}{B_{G,f}} + \sum_{>65\text{kHz}}^{10\text{MHz}} \frac{B_f}{6.25} \leq 1$$

- Mehrere Frequenzen: 100 kHz - 300 GHz: geometrische Summe der 6-Minuten Mittelwerte je Frequenzpunkt entsprechend der unterstehenden Formel (mit f in MHz). Der Grenzwert ist eingehalten, wenn die Summe kleiner 1 ist.

$$\sqrt{\sum_{100\text{kHz}}^{1\text{MHz}} \left(\frac{B_f f}{0.92}\right)^2 + \sum_{>1\text{MHz}}^{300\text{GHz}} \left(\frac{B_f}{B_{G,f}}\right)^2} \leq 1$$

Für die NIS-Umrechnung bildet der EMV-Mittelwert die Basis bezüglich Einzelfrequenzen und bezüglich geometrischer Summierung. Für die lineare Summierung zwischen 1 Hz und 10 MHz ist der Grenzwert für den EMV-Quasi-Spitzenwert zu verwenden und auf den Spitzenwert umzurechnen.

A.2.1.1. Einzelfrequenzen und geometrische Summierung

Für die NIS-Beurteilung ist für Einzelfrequenzen und für die Summierung oberhalb von 100 kHz der 6-Minuten-Mittelwert massgebend. Für die NIS-Interpretation kann damit direkt der Mittelwert-Grenzwert der EMV verwendet werden. Die Umrechnung sieht wie folgt aus.

NIS-Interpretation auf der EMV-Basis von SN EN 61000-6-3

Frequenz	EMV-Grenzwert		Strom [μA]	Magnetische Flussdichte ¹⁾ [pT]	Immissionsgrenzwert der NISV (Einzelfrequenzen) [pT]	Bezugswert für Summierung [pT]	Minimale Anzahl Frequenzpunkte bis zur Ausschöpfung des "NIS- Summierungs- grenzwertes ²⁾ [---]
	[dBμV]	[mV]					
150 kHz	56	0.63	19.30	7.72	6'250'000	6'133'333	6.3 e+11
500 kHz	46	0.20	4.23	1.69	1'840'000	1'840'000	1.2 e+12
1 MHz	46	0.20	4.05	1.62	920'000	920'000	3.2 e+11
5 MHz	46	0.20	3.99	1.60	184'000	184'000	1.3 e+10
5 MHz	50	0.32	6.32	2.53	184'000	184'000	5.3 e+9
10 MHz	50	0.32	6.32	2.53	92'000	92'000	1.3 e+9
30 MHz	50	0.32	6.32	2.53	92'000	92'000	1.3 e+9

¹⁾ Distanz zum Leiter: 50 cm

²⁾ Der Wert ergibt sich aus der Division des quadrierten "Bezugswertes für die Summierung" mit der quadrierten magnetischen Flussdichte

Tabelle A5: NIS-Interpretation leitungsgeführter Emissionen auf AC-Leitungen auf der Basis der SN EN 61000-6-3

NIS-Interpretation auf der EMV-Basis von SN EN 61000-6-4

Frequenz	EMV-Grenzwert		Strom [μA]	Magnetische Flussdichte ¹⁾ [pT]	Immissionsgrenzwert der NISV [pT]	Bezugswert für Summierung [pT]	Minimale Anzahl Frequenzpunkte bis zur Ausschöpfung des "NIS- Summierungs- grenzwertes ²⁾ [---]
	[dBμV]	[mV]					
150 kHz	66	2.00	61.02	24	6'250'000	6'133'333	6.6 e+10
500 kHz	66	2.00	42.27	17	1'840'000	1'840'000	1.2 e+10
500 kHz	60	1.00	21.19	8	1'840'000	1'840'000	5.3 e+10
1 MHz	60	1.00	20.28	8	920'000	920'000	1.3 e+10
10 MHz	60	1.00	20.00	8	92'000	92'000	1.3 e+8
30 MHz	60	1.00	20.00	8	92'000	92'000	1.3 e+8

¹⁾ Distanz zum Leiter: 50 cm

²⁾ Der Wert ergibt sich aus der Division des quadrierten "Bezugswertes für die Summierung" mit der quadrierten magnetischen Flussdichte

Tabelle A6: NIS-Interpretation leitungsgeführter Emissionen auf AC-Leitungen auf der Basis der SN EN 61000-6-4

A.2.1.2. Lineare Summierung

Für die NIS-Beurteilung ist die Summierung bis 10 MHz auch additiv mittels des maximalen Effektivwertes durchzuführen. Als EMV-Basis dient in diesem Fall der Grenzwert für den Quasi-Spitzenwert. Die Umrechnung des Quasi-Spitzenwertes auf den Spitzenwert erfolgt unter der theoretischen worst-case Annahme eines einzelnen Impulses.

NIS-Interpretation auf der EMV-Basis von SN EN 61000-6-3

Frequenz	EMV-Grenzwert Quasi- Spitzenwert [dB μ V]	NIS-Umrechnung Spitzenwert ²⁾		Strom [μ A]	Magnetische Flussdichte ¹⁾ [pT]	Bezugswert für Summierung [pT]	Minimale Anzahl Frequenzpunkte bis zur Ausschöpfung des "NIS- Summierungs- grenzwertes ³⁾ [---]
		[dB μ V]	[mV]				
150 kHz	66	95.5	60	1822	729	6'250'000	8.6 e+3
500 kHz	56	85.5	19	399	160	6'250'000	3.9 e+4
1 MHz	56	85.5	19	382	153	6'250'000	4.1 e+4
5 MHz	56	85.5	19	377	151	6'250'000	4.1 e+4
5 MHz	60	89.5	30	597	239	6'250'000	2.6 e+4
10 MHz	60	89.5	30	597	239	6'250'000	2.6 e+4

¹⁾ Distanz zum Leiter: 50 cm

²⁾ Umrechnung von einem mit Quasi-Spitzenwertmethode gemessenen und bewerteten Einzelimpuls auf den Spitzenwert (+29.5 dB).

³⁾ Der Wert ergibt sich aus der Division des "Bezugswertes für die Summierung" mit der magnetischen Flussdichte
Tabelle A7: NIS-Interpretation (lineare Summierung) leitungsgeführter Emissionen auf AC-Leitungen auf der Basis der SN EN 61000-6-3

NIS-Interpretation auf der EMV-Basis von SN EN 61000-6-4

Frequenz	EMV-Grenzwert Quasi- Spitzenwert [dB μ V]	NIS-Umrechnung Spitzenwert ²⁾		Strom [μ A]	Magnetische Flussdichte ¹⁾ [pT]	Bezugswert für Summierung [pT]	Minimale Anzahl Frequenzpunkte bis zur Ausschöpfung des "NIS- Summierungs- grenzwertes ³⁾ [---]
		[dB μ V]	[mV]				
150 kHz	79	108.5	266	8137	3255	6'250'000	1.9 e+3
500 kHz	79	108.5	266	5637	2255	6'250'000	2.8 e+3
500 kHz	73	102.5	133	2825	1130	6'250'000	5.5 e+3
1 MHz	73	102.5	133	2705	1082	6'250'000	5.8 e+3
10 MHz	73	102.5	133	2667	1067	6'250'000	5.8 e+3

¹⁾ Distanz zum Leiter: 50 cm

²⁾ Umrechnung von einem mit Quasi-Spitzenwertmethode gemessenen und bewerteten Einzelimpuls auf den Spitzenwert (+29.5 dB).

³⁾ Der Wert ergibt sich aus der Division des "Bezugswertes für die Summierung" mit der magnetischen Flussdichte
Tabelle A8: NIS-Interpretation (lineare Summierung) leitungsgeführter Emissionen auf AC-Leitungen auf der Basis der SN EN 61000-6-4

A.2.2. Leitungsgeführte Emissionen (DC-Leitungen)

Es gelten für DC-Leitungen grundsätzlich dieselben Regeln und Annahmen wie bei den AC-Leitungen mit dem Unterschied, dass die Umrechnung zwischen Strom und Spannung über eine Impedanz von 150 Ω erfolgt.

Eine Limitierung für leitungsgeführte Störaussendungen auf DC-Leitungen ist noch nicht für alle Anwendungen gültig. Für kleinere Wechselrichter, welche in Wohn- und kleineren Geschäftshäusern zur Anwendung kommen, gilt grundsätzlich die SN EN61000-6-3. Für leistungsstärkere PV-Anlagen sind Limitierungen in Diskussion. Die NIS-Interpretation erfolgt auf der Basis der SN EN61000-6-3. Die Tabellen für leistungsstärkere Anlagen dienen als Orientierungshilfe.

A.2.2.1. Einzelfrequenzen und geometrische Summierung gemäss NISV

NIS-Interpretation auf der EMV-Basis von SN EN 61000-6-3

Frequenz	EMV-Grenzwert		Strom [μ A]	Magnetische Flussdichte ¹⁾ [pT]	Immissionsgrenzwert der NISV (Einzelfrequenzen) [pT]	Bezugswert für Summierung [pT]	Minimale Anzahl Frequenzpunkte bis zur Ausschöpfung des "NIS- Summierungs- grenzwertes ²⁾ [---]
	[dB μ V]	[mV]					
150 kHz	66	2.00	13.30	5.32	6'250'000	6'133'333	1.33E+12
500 kHz	66	2.00	13.30	5.32	1'840'000	1'840'000	1.20E+11
500 kHz	60	1.00	6.67	2.67	1'840'000	1'840'000	4.75E+11
1 MHz	60	1.00	6.67	2.67	920'000	920'000	1.19E+11
10 MHz	60	1.00	6.67	2.67	92'000	92'000	1.19E+09
30 MHz	60	1.00	6.67	2.67	92'000	92'000	1.19E+09

¹⁾ Distanz zum Leiter: 50 cm

²⁾ Der Wert ergibt sich aus der Division des quadrierten "Bezugswertes für die Summierung" mit der quadrierten magnetischen Flussdichte

Tabelle A9: NIS-Interpretation leitungsgeführter Emissionen auf DC-Leitungen auf der Basis der SN EN 61000-6-3

EMV-Diskussionsbasis für leistungsstarke Anlagen

Frequenz	EMV-Grenzwert		Strom [μ A]	Magnetische Flussdichte ¹⁾ [pT]	Immissionsgrenzwert der NISV (Einzelfrequenzen) [pT]	Bezugswert für Summierung [pT]	Minimale Anzahl Frequenzpunkte bis zur Auschöpfung des "NIS- Summierungs- grenzwertes ²⁾ [---]
	[dB μ V]	[mV]					
150 kHz	106	199.53	1330.17	532	6'250'000	6'133'333	1.33E+08
1 MHz	100	100.00	666.67	267	920'000	920'000	1.19E+07
5 MHz	96	63.10	420.64	168	460'000	460'000	7.50E+06
10 MHz	88	25.12	167.46	67	92'000	92'000	1.89E+06
30 MHz	76	6.31	42.06	17	92'000	92'000	2.93E+07

¹⁾ Distanz zum Leiter: 50 cm

²⁾ Der Wert ergibt sich aus der Division des quadrierten "Bezugswertes für die Summierung" mit der quadrierten magnetischen Flussdichte

Tabelle A10: NIS-Interpretation leitungsgeführter Emissionen auf DC-Leitungen auf der Basis der SN EN 61000-6-4

A.2.2.2. Lineare Summierung gemäss NISV

Für die NIS-Interpretationen gelten dieselben Regeln und Annahmen wie in Kap. A.2.1.2.

EMV-Basis: SN EN 61000-6-3

Frequenz	EMV-Grenzwert Quasi- Spitzenwert [dB μ V]	NIS-Umrechnung Spitzenwert ²⁾		Strom [μ A]	Magnetische Flussdichte ¹⁾ [pT]	Bezugswert für Summierung [pT]	Minimale Anzahl Frequenzpunkte bis zur Ausschöpfung des "NIS- Summierungs- grenzwertes ²⁾ [---]
		[dB μ V]	[mV]				
150 kHz	79	108.5	266	1774	710	6'250'000	8.80E+03
500 kHz	79	108.5	266	1774	710	6'250'000	8.80E+03
500 kHz	73	102.5	133	889	356	6'250'000	1.76E+04
1 MHz	73	102.5	133	889	356	6'250'000	1.76E+04
10 MHz	73	102.5	133	889	356	6'250'000	1.76E+04

¹⁾ Distanz zum Leiter: 50 cm

²⁾ Der Wert ergibt sich aus der Division des "Bezugswertes für die Summierung" mit der magnetischen Flussdichte

Tabelle A11: NIS-Interpretation (lineare Summierung) leitungsgeführter Emissionen auf DC-Leitungen auf der Basis der SN EN 61000-6-3

EMV-Diskussionsbasis für leistungsstarke Anlagen

Frequenz	EMV-Grenzwert Quasi- Spitzenwert [dB μ V]	NIS-Umrechnung Spitzenwert ²⁾		Strom [μ A]	Magnetische Flussdichte ¹⁾ [pT]	Bezugswert für Summierung [pT]	Minimale Anzahl Frequenzpunkte bis zur Ausschöpfung des "NIS- Summierungs- grenzwertes ²⁾ [---]
		[dB μ V]	[mV]				
150 kHz	116	145.5	18836	125577	50'231	6'250'000	1.24E+02
1 MHz	110	139.5	9441	62937	25'175	6'250'000	2.48E+02
5 MHz	106	135.5	5957	39711	15'884	6'250'000	3.93E+02
10 MHz	100	129.5	2985	19903	7'961	6'250'000	7.85E+02
10 MHz	73	102.5	133	889	356	6'250'000	1.76E+04

¹⁾ Distanz zum Leiter: 50 cm

²⁾ Der Wert ergibt sich aus der Division des "Bezugswertes für die Summierung" mit der magnetischen Flussdichte

Tabelle A12: NIS-Interpretation (lineare Summierung) leitungsgeführter Emissionen auf DC-Leitungen für leistungsstarke Anlagen auf der Basis diskutierter EMV-Grenzwerte

A.2.3. Feldgeführte Emissionen (gestrahlte Emissionen; 30 MHz - 6 GHz)

Für die NIS-Beurteilung ist für Einzelfrequenzen und für die Summierung der 6-Minuten-Mittelwert massgebend. Für die NIS-Interpretation wird bis 1 GHz der EMV-Grenzwert für den Quasi-Spitzenwert und über 1 GHz der EMV-Grenzwert für den Mittelwert verwendet. Die Distanzumrechnung erfolgt gemäss Kap. A.1.1. Die Umrechnung sieht wie folgt aus.

NIS-Interpretation auf der EMV-Basis von SN EN 61000-6-3

Frequenz	EMV-Grenzwert [dB μ V/m]	EMV-Messdistanz [m]	Elektrische Feldstärke in 0.5 m Entfernung		Immissionsgrenzwert der NISV [mV/m]	Minimale Anzahl Frequenzpunkte bis zur Ausschöpfung des "NIS-Summierungsgrenzwertes ¹⁾ [---]
			[dB μ V/m]	[mV/m]		
30 MHz	30	10	82	12.6	28'000	4.94E+06
230 MHz	30	10	82	12.6	28'000	4.94E+06
230 MHz	37	10	89	28.2	28'000	9.86E+05
1 GHz	37	10	89	28.2	43'500	2.38E+06
1 GHz	50	3	81.1	11.4	43'500	1.46E+07
2 GHz	50	3	81.1	11.4	61'000	2.86E+07
3 GHz	50	3	81.1	11.4	61'000	2.86E+07
3 GHz	54	3	85.1	18.0	61'000	1.15E+07
6 GHz	54	3	85.1	18.0	61'000	1.15E+07

¹⁾ Der Wert ergibt sich aus der Division des quadrierten "Bezugswertes für die Summierung" mit der quadrierten elektrischen Feldstärke

Tabelle A13: NIS-Interpretation feldgeführter Emissionen auf der Basis der SN EN 61000-6-3

NIS-Interpretation auf der EMV-Basis von SN EN 61000-6-4

Frequenz	EMV-Grenzwert [dB μ V/m]	EMV-Messdistanz [m]	Elektrische Feldstärke in 0.5 m Entfernung		Immissionsgrenzwert der NISV [mV/m]	Minimale Anzahl Frequenzpunkte bis zur Ausschöpfung des "NIS-Summierungsgrenzwertes ¹⁾ [---]
			[dB μ V/m]	[mV/m]		
30 MHz	40	10	92	40	28'000	4.90E+05
230 MHz	40	10	92	40	28'000	4.90E+05
230 MHz	47	10	99	89	28'000	9.90E+04
1 GHz	47	10	99	89	43'500	2.39E+05
1 GHz	56	3	87.1	23	43'500	3.58E+06
2 GHz	56	3	87.1	23	61'000	7.03E+06
3 GHz	56	3	87.1	23	61'000	7.03E+06
3 GHz	60	3	91.1	36	61'000	2.87E+06
6 GHz	60	3	91.1	36	61'000	2.87E+06

¹⁾ Der Wert ergibt sich aus der Division des quadrierten "Bezugswertes für die Summierung" mit der quadrierten elektrischen Feldstärke

Tabelle A14: NIS-Interpretation feldgeführter Emissionen auf der Basis der SN EN 61000-6-4

A.3. Beispiel für einen Standort mit angrenzenden Wechselrichtern

Der Standort für einen Wechselrichter ist grundsätzlich frei wählbar. Oft werden Wechselrichter in der Nähe des Netzanschlusses, beispielsweise im Untergeschoss eines Gebäudes angebracht. Wegen der geringeren Zuleitungsverluste sind auch Standorte nahe beim PV-Generator beliebt (Dach, Estrich, oberstes Geschoss, etc.).

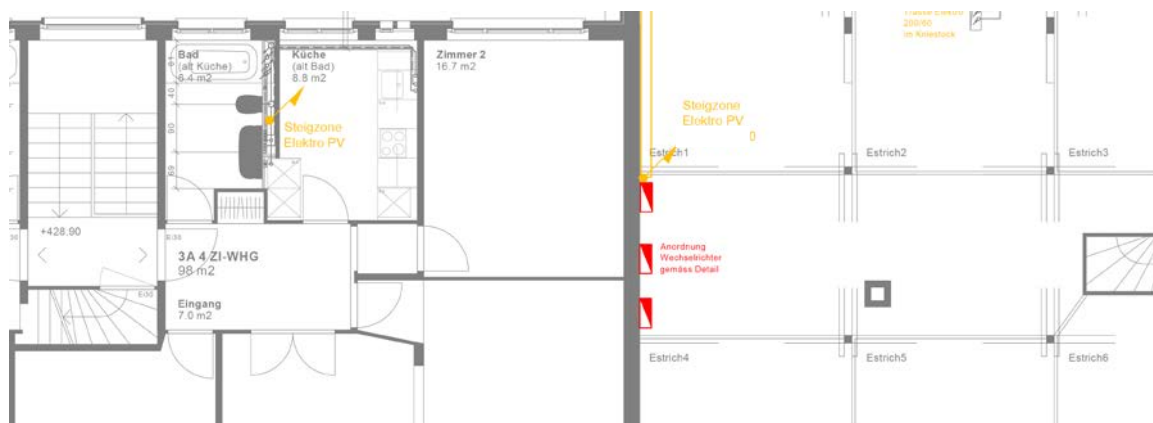


Abbildung A2: Beispiel einer Anordnung mit Wechselrichtern im Dachbereich und angrenzendem Wohnraum eines höher gelegenen, angebauten Gebäudes

Abbildung A2 zeigt ein Beispiel mit einem Wechselrichter im Dachbereich. Die zusammengebauten Gebäude sind abgestuft, so dass die Wechselrichter auf das Niveau der angrenzenden Zimmer zu liegen kommen. Grundsätzlich ist dagegen, auch aus Sicht der NISV, nichts einzuwenden. Die Vorschriften und Grenzwerte sind eingehalten.

Möchte man freiwillig die Immissionen der Wechselrichter, welche auf die angrenzenden Zimmer einwirken, reduzieren, so wäre ein Standort in grösserer Entfernung zu wählen.