

Stellungnahme: Reflexionsverhalten Photovoltaikmodule

Ziel der Stellungnahme ist es anhand der physikalischen Eigenschaften der Antireflexionsbeschichtungen das Reflexionsverhalten von PV-Modulen darzustellen. Dies gilt im Allgemeinen und somit dann auch für das Solarparkprojekt „Tagebau Wilhelm“ in Heinsberg.

Lichtreflexionen – physikalische Grundlage

Das physikalische Phänomen der Lichtreflexion wird unter anderem im Bereich der Photovoltaik mit einer bzw. mehreren Antireflexionsschichten minimiert.

Im Alltag kennen wir das Phänomen der Spiegelung z.B. an Fenstern, in Pfützen oder an Bergseen.

Zu beobachten ist dabei, dass je flacher der Blickwinkel zur Oberfläche ist, desto stärker ist die Reflexion. Je steiler der Blickwinkel, desto geringer wird die Reflexion. Bei senkrechten Blick ins Wasser können wir tief ins Wasser hineinschauen. Bei aufgewühlter Wasseroberfläche durch Wind wird die Spiegelung weniger.

In der Photovoltaik sind es die Lichtwellen, die von der Oberflächengrenzschicht der „blanken“ Solarzellenoberfläche zurückgespiegelt werden.

Brechungsindex

Entscheidend für die Reflexion an der Grenzschicht ist, wie rasch das Licht ein Material durchqueren kann. Das physikalische Maß für diese optische Eigenschaft ist der Brechungsindex n .

Der Referenzwert ist die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum. Der Brechungsindex gibt an, um welchen Betrag die Geschwindigkeit eines Lichtstrahls von der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum abweicht; dabei ist er von der Wellenlänge des Lichtstrahls abhängig.

Bei der kristallinen Solarzelle stellt sich die Reflexion folgendermaßen dar:

Luft, in der sich der Lichtstrahl zunächst bewegt, hat einen Brechungsindex von 1; Silizium, auf dessen Oberfläche die Lichtwelle trifft, weist im sichtbaren Spektrum einen Index von 3,9 auf.

Licht breitet sich in der Luft also deutlich schneller aus als in Silizium - an der Grenzschicht zwischen beiden Materialien kommt es zum optischen Bruch und damit zur Reflexion.



Berechnung des Reflexionsfaktors

Wie viel Solarstrahlung jeweils zurückgespiegelt wird, kann mit der Formel für den Reflexionsfaktor R berechnet werden. Sie geht aus der Fresnel'schen Gleichung hervor und beschreibt in der verwendeten Form den Spezialfall des senkrechten Lichteinfalls:

n_1 ist der Brechungsindex von Material 1 - im Alltag meist der Luft

n_2 ist der Brechungsindex von Material 2, in den genannten Beispielen also Glas, Spiegelsilber, Wasser oder eben Silizium

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2$$

Auf die Solarzelle bezogen:

$$R = \left(\frac{1 - 3,9}{1 + 3,9} \right)^2$$

Für senkrecht auf Silizium auftreffende Strahlen aus dem Bereich des sichtbaren Lichts ergibt sich damit ein Reflexionsfaktor von 0,35 – d.h. es werden 35% des einfallenden Lichtes reflektiert. Fällt das Licht in einem flacheren Winkel ein, sind die Reflexionsverluste sogar höher.

Antireflexbeschichtung

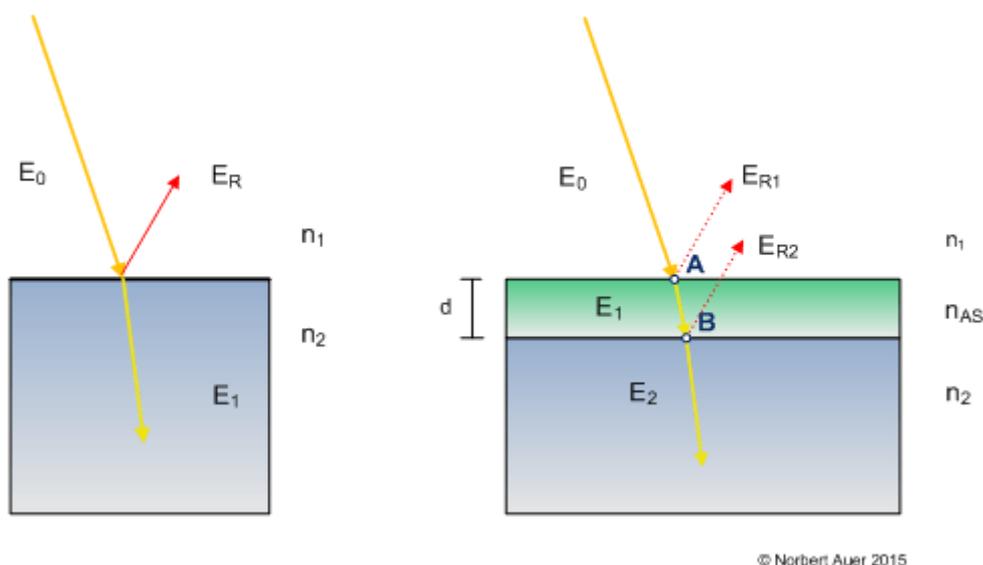
Diese wird bei Photovoltaikmodulen eingesetzt um die Verluste durch Reflexion des Lichtes in der Oberflächengrenzschicht zu reduzieren und damit das Licht zur Solarstromerzeugung genutzt werden kann.

Dies lässt sich erreichen

- durch Texturierung (Oberflächenformen, Nadeln oder Pyramiden)
- durch die Wahl des passenden Beschichtungsmaterials (SiO_2 , Si_3N_4)
- durch die Wahl der passenden Schichtstärke.

Forscher und Hersteller bedienen sich bei der entspiegelnden Beschichtung der Solarzelle physikalischer Grundlagen der Optik. Wie z.B. bei der Entspiegelung von Brillengläsern, oder dem ähnlichen Prinzip der Geräusch-Unterdrückung in Kopfhörern.

Funktionsprinzip Antireflexschicht

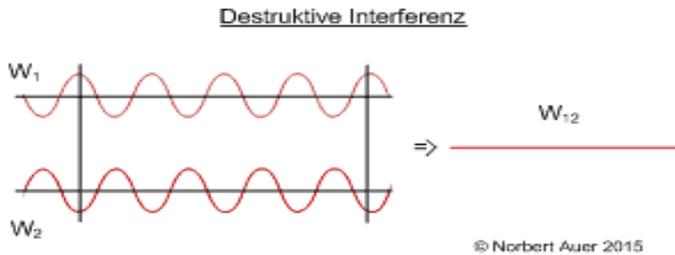


Darstellung nach Mertens 2015

Der einfallende Lichtstrahl E_0 wird in A und B reflektiert. Durch den Phasensprung heben sich die reflektierten Strahlen E_{R1} und E_{R2} auf.

Grundsätzlich besteht das Verfahren der Entspiegelung darin, die Wellen der einfallenden und reflektierten Lichtstrahlen so gegeneinander zu verschieben, dass sie sich gegenseitig neutralisieren. Durch die Schichtstärke des Antireflexüberzugs können die Wellen der reflektierten Lichtstrahlen dabei gezielt aus dem Takt gebracht werden - der Physiker spricht von einer Phasenverschiebung. Für den Antireflex-Effekt muss ein Wellental auf einen Wellenberg treffen, weshalb die reflektierten Wellen genau um eine halbe Länge - d.h. eine halbe Phase - verschoben werden müssen. Fachleute nennen diesen Vorgang destruktive Interferenz (vgl. Abbildung unten).

Phasenverschiebung in der Umsetzung



Darstellung: Norbert Auer 2015

Das optische Prinzip der Antireflexschicht, die „Dekonstruktive Interferenz“

Zwei gleich starke, um eine halbe Phase verschobene Wellen (W_1 , W_2) heben sich auf (W_{12})

Technisch wird dies durch die Anpassung der Dicke der Antireflexschicht umgesetzt.

Nach den Gesetzen der Optik braucht es für die notwendige halbe Phasenverschiebung eine Schichtdicke, die genau 25% der Wellenlänge des einfallenden Lichtstrahls entspricht - oder einem ungeraden Vielfachen davon. Ganz verschwinden die Wellen der Lichtstrahlen - und damit die Reflexion - aber erst, wenn sie in derselben Höhe (Amplitude) schwingen.

Mathematisch Bedingung: $n_{AR} = \sqrt{n_0 \times n_{sub}}$

- n_0 steht dabei für den Brechungsindex der Schicht über der Antireflexschicht - das ist bei Solarzellen in der Regel die Luft.
- n_{sub} ist die Brechzahl für das Substrat, auf dem die reflexionsmindernde Schicht aufgebracht wird, also Silizium.
- Setzt man die entsprechenden Werte - 1 für Luft, 3,9 für Silizium - in die Formel ein, ergibt sich für kristalline Solarzellen ein idealer Brechungsindex von ≈ 2 . Siliziumnitrid kommt dem mit einer Brechzahl von 1,9 - 2,1 am nächsten.

Werden diese beiden Bedingungen vollständig erfüllt, können Reflexionsverluste theoretisch sogar ganz verhindert werden - allerdings nur wenn das Licht fast ausschließlich senkrecht auf die Oberfläche fällt.

Entspiegelung (ARC) von Photovoltaikmodulen

Die Antireflexschicht, Abk. AR-Beschichtung oder ARC (von engl.: anti-reflection-coating) - liegt auf der sonnenzugewandten Seite von Solarzellen und schließt deren Schichtaufbau auf der Oberseite ab. Zusätzlich befindet sich oft eine zweite Antireflexschicht an der Oberseite der Einkapselung des Photovoltaikmoduls, der Zelle oder dem Waver selber.

Aufgabe beider Schichten ist es, optische Verluste in der Solarzelle zu reduzieren, indem sie die Spiegelung von Sonnenlicht verringern.

ARC der Solarzelle (Waver)

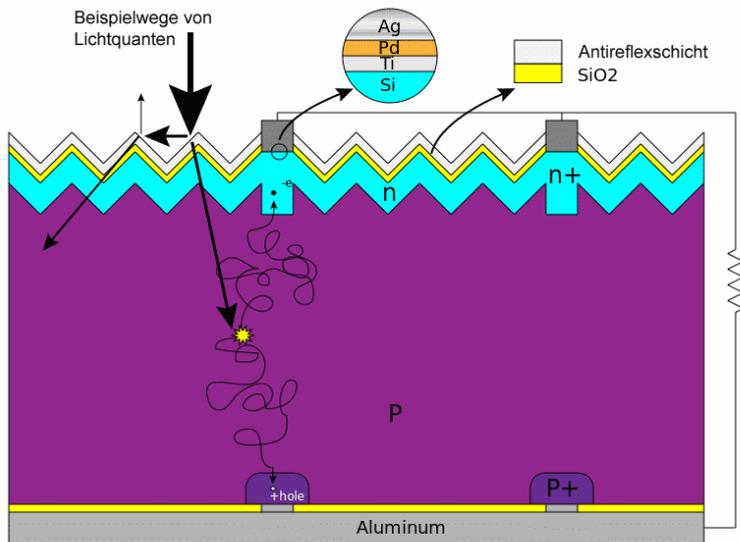


Abb.:Cyferz, GFDL, via Wikimedia Commons

Blankes graues Silizium reflektiert rund 30% des einfallenden Sonnenlichts ungenutzt zurück - Licht, das ohne diese Reflexion für die Solarstrom-Produktion zur Verfügung stünde.

Um den Verlust zu verringern, werden Solarzellen entspiegelt - d.h. sie erhalten eine Antireflexschicht und sie werden zusätzlich mit einer hauchfeinen Pyramiden-Textur an der Oberfläche versehen (ca. 5-10 μm Höhe und Breite). Die Antireflexschicht besteht dabei aus einem hauchdünnen entspiegelten Film, der den Verlust an einfallender Solarstrahlung auf rund 10% reduziert. Damit trägt die AR-Beschichtung wesentlich zu einem verbesserten CTM (Cell-to-Module-Loss) und dies wiederum zu einem verbesserten Wirkungsgrad der Solarzelle bei.

Die reflexionsmindernde Schicht ist für das Auge sichtbar. Sie verleiht den grauen Siliziumwafern ihre typische Farbe: Je nach Beschichtungsmaterial und -stärke schimmert die Antireflexschicht grün, bläulich-schwarz oder violett.

In handelsüblichen Solarzellen (mit einer AR-Beschichtung von 65-80nm Silicium-Nitrid oder ca. 60-100nm Silicium-Oxid) erscheint die Zelle blau.

ARC Beschichtungen der Glasoberflächen

Im Photovoltaikmodul werden mehrere Solarzellen zusammengeschaltet und verkapselt.

Hersteller versehen die frontseitige Glasscheibe ihrer Module mit einer entspiegelnden Textur (V-Gräben, Rillen o.ä.) und/oder zusätzlich mit einer Antireflexbeschichtung, um die Lichteinkopplung ins Glas zu verbessern.

AR Beschichtung in der Praxis

In der Solarzelle soll nicht eine Wellenlänge allein, sondern das gesamte Spektrum des sichtbaren Lichts genutzt werden - mit Wellenlängen zwischen 400 und 800 Nanometer,

Hinzu kommt, dass ein Material mit einem idealen Brechungsindex, das zugleich als hauchdünner, robuster Film auf Silizium oder Glas aufgebracht werden kann, nicht leicht zu finden ist.

In der Praxis ist die Wahl der Schichtstärke und des Schichtmaterials deshalb ein Kompromiss. Letzte Reflexionsverluste lassen sich in der Realität somit nie ganz verhindern.

Antireflexschicht – Dicke

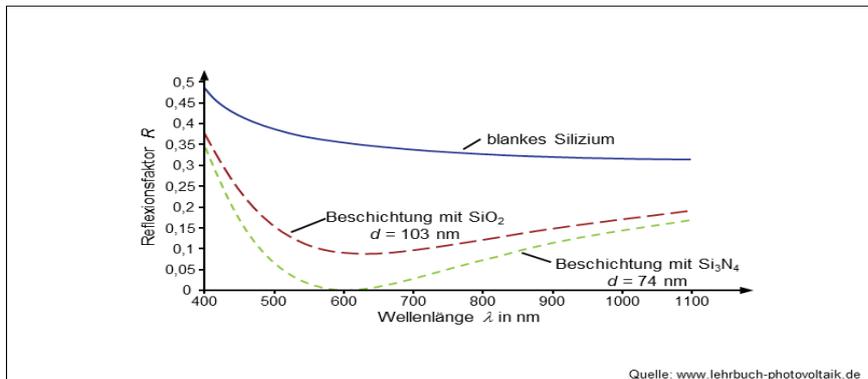
Die Dicke der Antireflexschicht wird daher auf eine Wellenlänge ausgerichtet, bei der die meiste Sonnenenergie verfügbar ist - bei rund 550 bis 600 Nanometer, im Bereich des grünen bis gelb-orangen Lichts. Solarzellen und Solarmodule glitzern deshalb auch nie tiefgrün oder gelb, da dieses Licht vollkommen absorbiert wird.

Für die Antireflexschichten ergeben sich daraus - je nach verwendetem Material - Schichtstärken von rund 70 bis 100 nm. Bei Siliziumnitrid sind es bspw. 74 Nanometer, bei Siliziumoxid 103 Nanometer.

Antireflexschicht – Material

Beim Antireflexschichtmaterial setzen die meisten Hersteller - zumindest bei der Solarzellenbeschichtung - heute auf Siliziumnitrid (Si_3N_4). Die beigefarbene, schwer lösliche Substanz wird auf den Solarzellenwafer mit Hilfe des chemischen Abscheideverfahrens CVD aufgedampft (von engl. Chemical Vapor Deposition). Dank seines Brechungsindexes von 2 können die Reflexionsverluste mit einer Si_3N_4 -Beschichtung unter idealen Bedingungen auf nur 1% gesenkt werden.

Manchmal wird auch noch das früher dominierende Siliziumdioxid (SiO_2) verwendet, das einen Brechungsindex von 1,46 aufweist. Die Reflexionsverluste summieren sich bei SiO_2 -Beschichtungen allerdings auf gut 8%. In der Realität sind die Verluste höher - zumal nicht das gesamte Licht senkrecht auf die Solarzelle trifft. Mit Si_3N_4 -Beschichtung liegen sie bei rund 10%.



Schichtstärken und Reflexionsverluste verschiedener Antireflexbeschichtungen verteilt über das Lichtspektrum - © www.lehrbuch-photovoltaik.de

Fazit

Photovoltaikmodule sind so konstruiert und optimiert um so viel Sonnenstrahlung wie möglich in elektrische Energie umzuwandeln. Dies steht im Gegensatz zur Wärmeschutzverglasung von Dachfenstern oder von Glasfassaden.

Bei Betrachtung der Graphik, Schichtstärken und Reflexionsverluste wird deutlich, dass im Schnitt über 80% der Sonnenstrahlen genutzt werden. Bei direkter senkrechter Einstrahlung werden sogar rund 98% der Sonnenstrahlen absorbiert und genutzt.

Der Entwicklungstrend zu noch effektiveren Photovoltaikmodulen wird neben der Weiterentwicklung der Halbleitertechnik auch immer mit dem Reflexionsverhalten von Modul- und Zellenoberflächen einhergehen. Bei Beobachtung der aktuellen Modulreihen diverser Hersteller zeichnet sich aktuell der Trend zum schwarzen Modul, also einen nahezu 100%igen Lichtabsorber ab.

Auf Basis der Erkenntnisse ist am Standort Tagebau Wilhelm in Heinsberg wird es keine signifikante Sonnenblendung durch den Solarpark geben. Auch Immissionspunkte innerhalb des Stadtgebietes Heinsberg oder Aphoven werden durch ihre Lage und Entfernung zum Solarpark keine Reflexion feststellen können.

Weiterhin wird keine Blendwirkung eintreten, da die exponierte Lage und Eingrünung des Solarparks eine direkte Sicht auf den Solarpark ausschließt.

Der Flughafen, „NATO-Airbase“ in Teveren liegt rund 10 km Luftlinie vom Solarpark entfernt und wird ebenfalls keinerlei Blendwirkung durch den Solarpark erfahren.

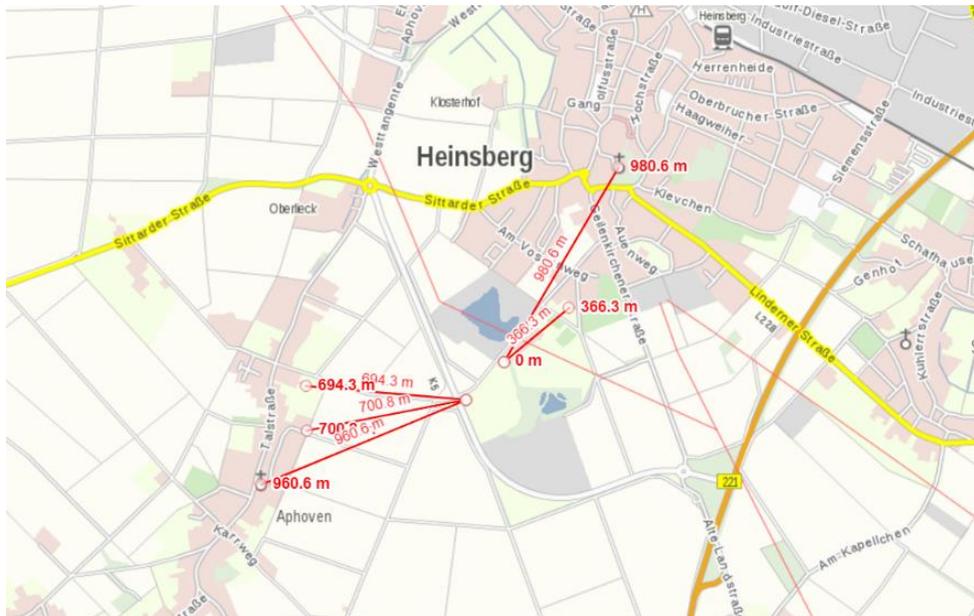


Abb.: Lageplan Solarpark „Tagebau Wilhelm“, Immissionspunkte

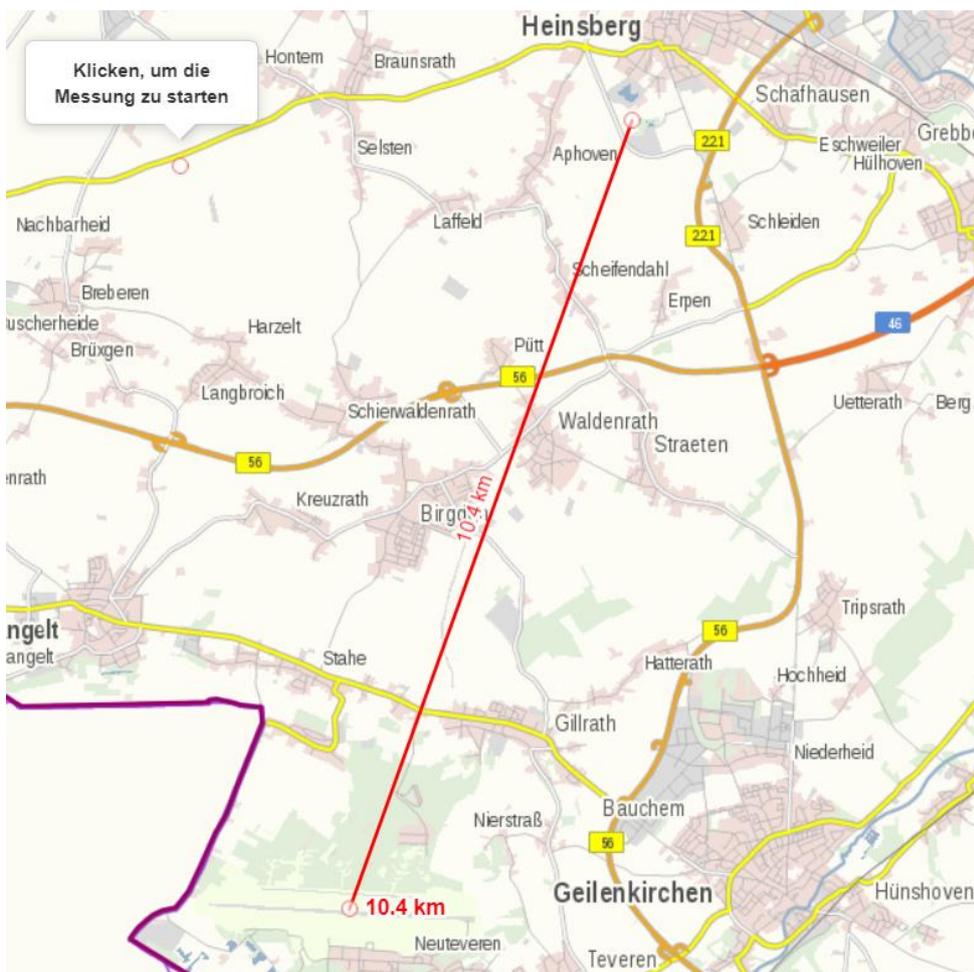


Abb.: Lage Solarpark und Flughafen „NATO-Airbase“ Teveren

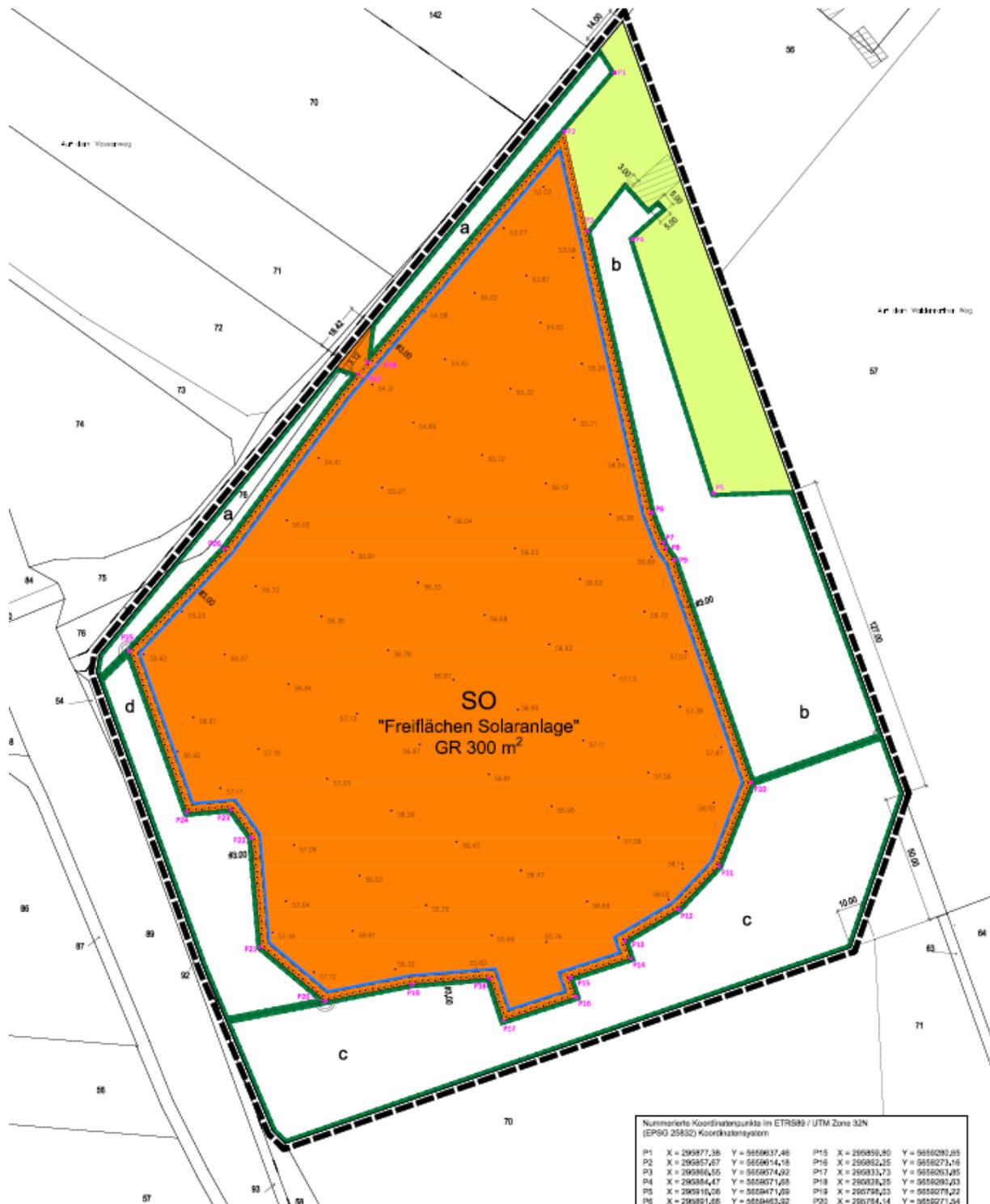


Abb.: Vorranggebiet „Tagebau Wilhelm“

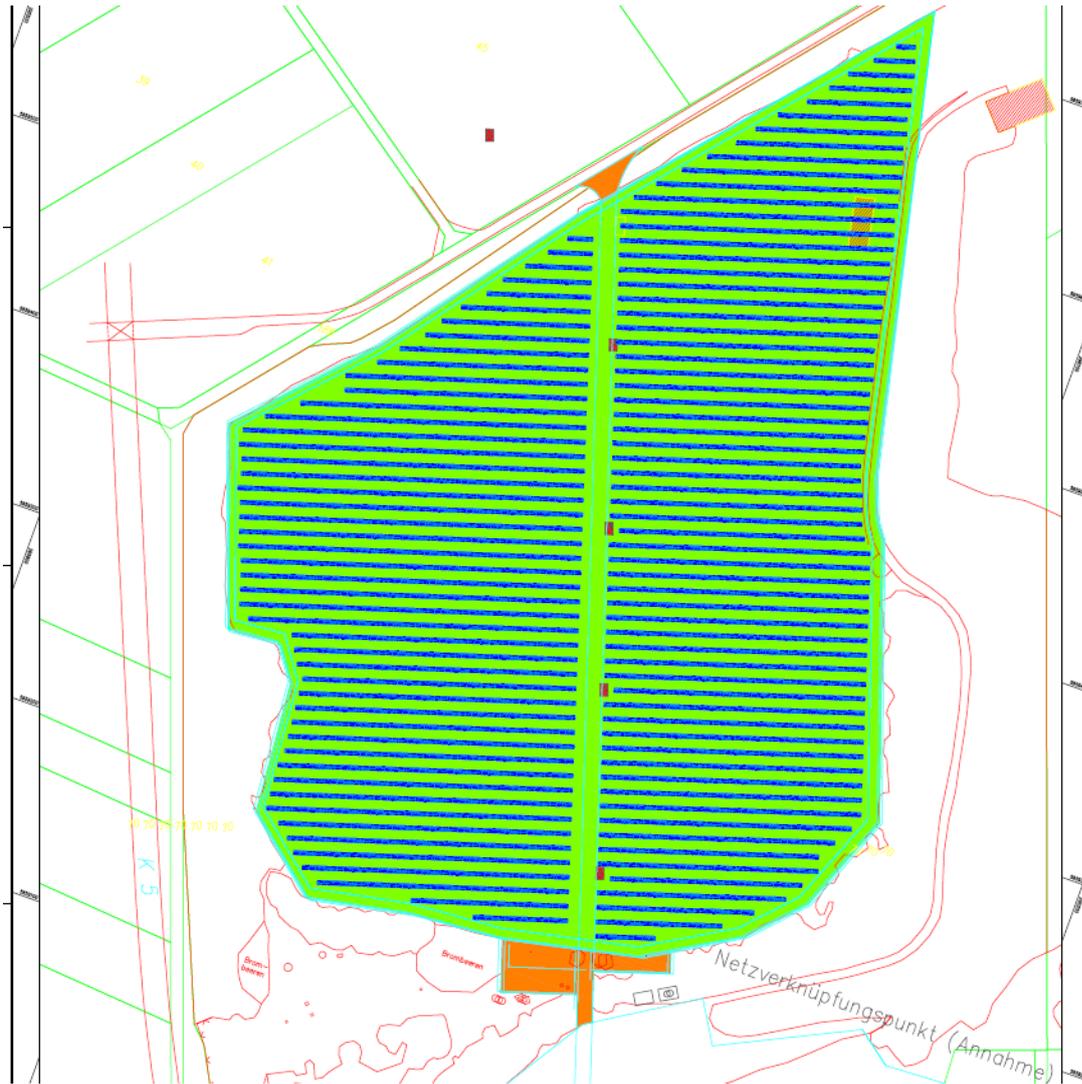


Abb.: Aufstellungsplan Solarpark

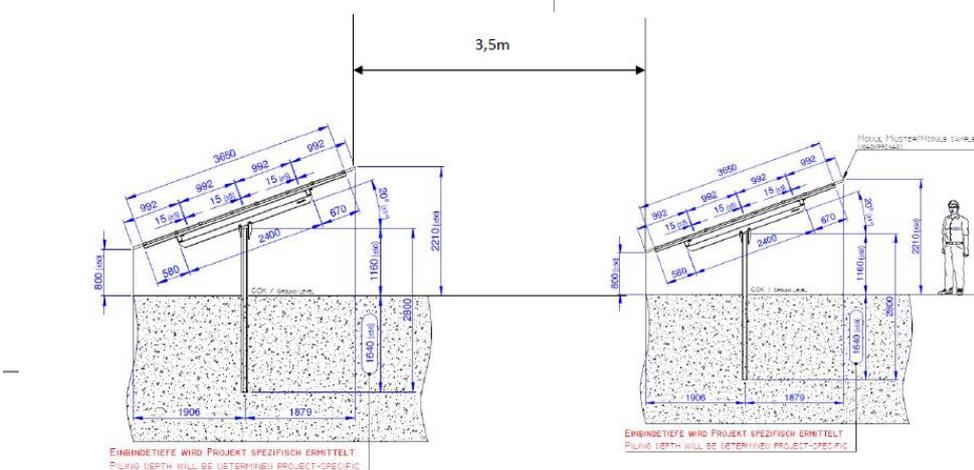


Abb.: Modultische (abbildungsähnlich)

Viersen, den 02.10.2019

Stefan Bartels, Dipl.-Ing. (FH)