

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Schlussbericht zum Verbundprojekt

PeroQ

Perowskit auf Q.antum- Tandemzellen

Teilvorhaben

Rohrtargets für die Übergangsschicht zwischen Bottom- und Topzellen

Förderkennzeichen	03EE1118C
Laufzeit des Vorhabens	01.06.2021 – 31.05.2023
Berichtsstand	30.11.2023
Zuwendungsempfänger	GfE Fremat GmbH
Projektleitung	Dr. Sven Köther-Becker

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Inhaltsverzeichnis

1	Ziel des Teilvorhabens	3
2	Erforschung der Herstellung von Nickeloxid Targetmaterial	4
2.1	Vorversuche zum Einfluss von Prozessparametern auf Spritzstrahleigenschaften ..	4
2.2	Ermittlung geeigneter Prozessparameter	4
2.3	Untersuchungen zur Eignung unterschiedlicher Rohstoffe	5
2.4	Arbeitssicherheitstechnische Untersuchungen und Bewertung	8
2.5	Versuche zur Erhöhung des DE-Wertes und der Schichtdicke	9
2.6	Versuche zu dotierten NiO- Targetschichten	11
2.7	Fertigung Targetmuster	12
2.8	Ergebnisse in Bezug zur ursprünglichen Teilvorhabensbeschreibung	12
3	Erhöhung der Einsatzgrenze für ZnO Targets	13
3.1	Literaturrecherche zur Werkstoffauswahl	13
3.2	Untersuchungen und Prototypenfertigung	14
3.2.1	Walzversuche zur Halbzeugfertigung	14
3.3	Bondversuche	19
3.4	Ergebnisse im Bezug zur ursprünglichen Teilvorhabensbeschreibung	20
4	Wichtigste Positionen des Zahlenmäßigen Nachweises	20
5	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	21
6	Verwertbarkeit der Ergebnisse und fortgeschriebener Verwertungsplan.....	21
7	Dem ZE bekannt gewordene Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	21
8	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse	22

1 Ziel des Teilvorhabens

In diesem Teilvorhaben liegt der Schwerpunkt auf der Erforschung geeigneter Herstellwege für die Materialquellen der Übergangsschicht (NiO als Lochleiter und ZnO als möglicher Ersatz für das Rekombinations-ITO) zwischen der Silizium-Bottomzelle und der Perowskit-Topzelle, die mittels Sputterns abgeschieden werden sollen.

Für einen kostengünstigen Sputterprozess ist (außer im Fall von Edelmetallen) der Einsatz von Rohrtargets zwingend. Für die Abscheidung einer NiO-Schicht gibt es dazu theoretisch zwei Möglichkeiten: ein Reaktivprozess vom metallischen Ni-Rohr, oder der Einsatz eines keramischen NiO Rohrtargets. Im Fall des magnetischen Nickels ist der Weg über das keramische Oxidrohr deutlich von Vorteil, da man damit die Schwächung des für das Sputtern notwendigen Magnetfeldes nahezu umgeht. Das Plasmaspritzen bietet die Möglichkeit auch solch hochschmelzende Materialien wie Oxide auf einem Edelstahlgrundrohr abzuscheiden. Jedoch war dafür die grundlegende Erforschung geeigneter Prozessparameter in einem iterativen Ansatz durchzuführen. Folgende Hauptzielgrößen standen dabei im Fokus:

- Die abgeschiedene Schicht muss elektrisch leitfähig sein, um in einem DC oder AC-Prozess sputterbar zu sein
- Die Temperaturführung beim Plasmaspritzen muss auf ein Minimum an Spannungen ausgelegt werden, um eine möglichst hohe Schichtdicke der Targets erzielen zu können.
- Die Verunreinigungen im NiO müssen den Erfordernissen der Solarzelle angepasst werden, damit es nicht zu effizienzreduzierender Diffusion in die Solarelle kommen kann.
- Die Minimierung der Kontamination der Umgebung insbesondere mit feinen NiO-Partikeln ist zum Schutz der Mitarbeiter vor dem gesundheitsgefährdenden Stoff zwingend notwendig. Damit einher geht, dass eine maximal hohe Haft rate (möglichst > 70%) des gespritzten Rohstoffs angestrebt werden muss. Damit erreicht man gleichzeitig eine Optimierung der Herstellkosten.

Eine zweite Teilaufgabe bestand in der Entwicklung von ZnO – Rohrtargets mit verbesserter Wärmeabführung als kostengünstige Alternative zu den teuren ITO-Schichten. Im Gegensatz zum NiO sind aluminiumdotierte ZnO-Rohrtargets industriell bereits im Einsatz. Hauptanwendung sind die TCO-Schichten der CIGS-Zellen und die Keimschicht für das funktionsbestimmende Ag bei Wärmedämmschichten auf Architekturglas. Die Temperatur der Sputterkammer bei diesen Prozessen ist mit maximal 200°C bei CIGS-Prozessen und einer ungeheizten Kammer bei den Glasanwendungen im Vergleich zu der hier angestrebten Anwendung (300 - 350°C) viel geringer. Die Wärmeabführung durch die Bondverbindung limitiert die maximale Sputterleistung, womit sich eine heiße Prozesskammer zusätzlich leistungslimitierend auswirkt. Das Ziel ist daher die Erforschung neuer Werkstoffe beim Einsatz in einer Freiloc®-Bondung. Dazu waren nach grundlegender Recherche zur Werkstoffauswahl Bondversuche mit Prototypen geplant.

Durch die Ergebnisse von PeroQ wird das Konsortium technologisch zukunftsfähig aufgestellt, indem aktuelle Ergebnisse aus der Forschung verwertungsfähig gemacht werden. GfE kann damit die Grundlage zur Erweiterung des Produktspektrums für die Zukunft legen. NiO basierte Dünnschichten spielen neben der im Projekt adressierten PV-Anwendung z.B. auch in elektrochromen Schichtsystemen eine wesentliche Rolle. Darüber hinaus eröffnet sich GfE mit den Erkenntnissen zum Handling gesundheitsgefährdender Stoffe zusätzlich auch die Grundlage für die Entwicklung weiterer Sputtertargetmaterialien, die bisher nur metallisch oder planar verfügbar sind.

2 Erforschung der Herstellung von Nickeloxid Targetmaterial

2.1 Vorversuche zum Einfluss von Prozessparametern auf Spritzstrahleigenschaften

Um geeignete Prozessparameter zum thermischen Spritzen von Nickeloxid zu erarbeiten, waren im Vorfeld grundlegende Untersuchungen zum Einfluss von Maschinen- bzw. Prozessparametern wie z.B. Brennerabstand, Brennerleistung und Plasmazusammensetzung auf die Partikeleigenschaften notwendig. Dafür war die Anschaffung und Integration des Messgerätes Accura-Spray zur Bestimmung der Spritzstrahleigenschaften geplant.

Aufgrund der kanzerogenen Eigenschaften des Nickeloxides wurde entschieden in einer gekapselten Anlage zu spritzen. Deshalb wurden zunächst Voruntersuchungen zur Integration des Messgerätes Accura-Spray in die Anlage durchgeführt.

So wurden unter anderem Temperaturmessstreifen in die Anlage geklebt. Dabei wurden schon nach wenigen Minuten Spritzzeit Temperaturen von 90-100°C bestimmt. Der Messkopf vom Accura Spray darf allerdings maximal 55°C heiß werden, wodurch nur ein Zeitfenster von ca. 5 min Messzeit resultiert. Dieses Zeitfenster ist zu kurz, um stabile Messwerte zu erhalten, da insbesondere die Stabilisierung des Spritzstrahles und Pulverflusses schon einige Minuten dauert.

Folgende Punkte führten daher zu der Entscheidung vom Kauf und der Integration des Messsystems Accura Spray abzusehen:

- Zeitfenster für Messung durch hohe Temperaturen in der Anlage ist zu kurz
- Dichtheit der Kabeldurchführung
- ungenügende Absaugung von Spritzstaub aus der gekapselten Anlage, was zu einer starken Verschmutzung der Messsensorik führt

Dadurch konnten die geplanten Arbeiten in diesem Arbeitspaket nicht wie geplant durchgeführt werden. Damit verbunden war eine erhöhte Anzahl der notwendigen iterativen Schritte zur Findung geeigneter Prozessparameter.

2.2 Ermittlung geeigneter Prozessparameter

Der Hauptschwerpunkt dieses Teilarbeitspaketes lag in der Entwicklung geeigneter Prozessparameter des atmosphärischen Plasmaspritzens (APS) zur Herstellung der NiO-Targetschichten. Die Untersuchungen erfolgten auf Rohren mit Ø133mm x 300 mm, worauf jeweils Nickeloxidschichten der Länge 150 mm mit 3 bis 4 mm Schichtdicke abgeschieden wurden. Es wurde zunächst ein Plasmabrenner mit einem Ar/He Plasmagasgemisch verwendet.

Folgende Brennerkomponenten wurden variiert:

- Düsendurchmesser
- Injektordurchmesser
- Position der Pulverinjektion
- Airjetstellung

Der Einfluss dieser Parameter auf die Schichtqualität und auf die Auftragsrate war unerwartet gering. Für die Untersuchungen weiterer Prozessparameter konnte somit aber ein einheitlicher Satz an Brennerkomponenten verwendet werden.

Von den Prozessparametern wurden

- Plasmagaszusammensetzung und Plasmagasmenge
- Eingebachte Plasmaleistung
- Spritzabstand
- und Trägergas

untersucht. Die Spritzversuche erfolgen in einem iterativen Ansatz. Eine Korrelation der Prozessparameter mit folgenden Zielgrößen der Spritzschicht wurde hergestellt:

- Gute elektrische Leitfähigkeit ($< 100 \text{ Ohmcm}$)
- Hohe Dichte ($> 90\% \text{ TD}$)
- Rissfreie Schichten

Das Zwischenziel, bis zum 9. Projektmonat Prozessbedingungen zur Herstellung des ersten Mustertargets geringer Schichtdicke für erste Sputterversuche bei den Projektpartnern entwickelt zu haben, wurde erreicht.

2.3 Untersuchungen zur Eignung unterschiedlicher Rohstoffe

Neben den Prozessbedingungen, die auch auf den eingesetzten Rohstoff angepasst sein müssen, beeinflusst die Rohstoffqualität selbst und dabei insbesondere die Korngröße die Schichteigenschaften ebenfalls wesentlich. Um ein Material thermisch spritzen zu können, muss es zunächst durch dünne Schläuche mit einer Länge von ca. 10 m zum Plasmabrenner gefördert werden. Daraus ergibt sich von selbst, dass nur gut rieselfähige Pulver mit ausreichender Festigkeit überhaupt zum Einsatz kommen können. Weiterhin muss das Pulver auch durch das Trägergas auf eine bestimmte Geschwindigkeit beschleunigt werden, um in den Plasmastrahl injiziert werden zu können. Deshalb ist eine bestimmte Korngrößenverteilung des Pulvers erforderlich. Die Rohstoffrecherchen haben ergeben, dass Nickeloxid im Wesentlichen in drei verschiedenen Korngrößenbereichen erhältlich ist.

1. Korngrößenbereich fein $< 10 \text{ }\mu\text{m}$ (z.B. Rohstoff G in Tabelle 1):

Pulver dieser Korngröße sind nicht rieselfähig und können daher unter den gegebenen Bedingungen weder gefördert noch in das Plasma injiziert werden. Sie sind deshalb als Spritzpulver für den Einsatz ungeeignet. Allerdings kann sehr feines Pulver mittels Granulation zu einem förderfähigen, stabilen Spritzgranulat umgearbeitet werden.

2. Korngrößenbereich mittel $10\text{-}44 \text{ }\mu\text{m}$ (z.B. Rohstoff D in Tabelle 1):

Erfahrungen mit anderen Spritzmaterialien zeigen, dass dieser Korngrößenbereich grenzwertig ist. Das Risiko, dass dieses Material nicht förderfähig ist und es zu Pulverstau in den Schläuchen kommt ist sehr hoch. Außerdem wird ein Großteil der Pulverpartikel nicht hoch genug beschleunigt werden, so dass sie vom Plasmastrahl abprallen. Dementsprechend wird die Auftrags Effizienz (DE%) des Pulvers sehr gering sein. Aus diesem Grund wurden Rohstoffe aus diesem Korngrößenbereich zunächst für Tests zurückgestellt.

3. Korngrößenbereich grob $45\text{-}115 \text{ }\mu\text{m}$ (z.B. Rohstoff C in Tabelle 1):

Pulver in diesen Korngrößenbereich sind in der Regel sehr gut für das thermische Spritzen geeignet. Leider war es nicht möglich Mindermengen ($< 1 \text{ t}$) für erste Versuche kommerziell zu erwerben.

	Kategorie 1	Kategorie 2	Kategorie 3	
Rohstoff	C	D	G	H
Bezeichnung	NiO black	NiO green	NiO black	NiO green
Ursprung	China	China	Europa	Europa
Reinheit NiO	min 99,8%	Min. 99%	min. 99,9%	min. 99%
Reinheit Ni	k. A.	min. 76%	76,6-77,9%	ca. 78,5%
Verunreinigungen:	k.A.	k.A.		
Co max.			<15 ppm	<15 ppm
Fe max.			< 200 ppm	< 200 ppm
Cu max			< 10 ppm	< 10 ppm
S max.			< 10 ppm	< 10 ppm
Kornband	45 - 115 μm	10 - 44 μm	d50 < 1 μm	d50 1-2 μm
Lieferzeit in Wochen:	nicht verfügbar	2 - 6 Wochen	1-2 Wochen	1-2 Wochen
Preisniveau	hoch	akzeptabel	niedrig	niedrig

Tabelle 1: Auszug aus der Liste zur Rohstoffrecherche von Nickeloxid Pulver

Für erste Spritzversuche wurde ein sehr feines schwarzes Nickeloxid (Rohstoff G in Tabelle 1) erworben. Da dieses Pulver für einen direkten Einsatz im Spritzprozess nicht geeignet ist, wurde es im Rahmen eines Unterauftrages granuliert. Die Korngrößenverteilungskurven der verschiedenen Granulationen sind in Abbildung 1 dargestellt

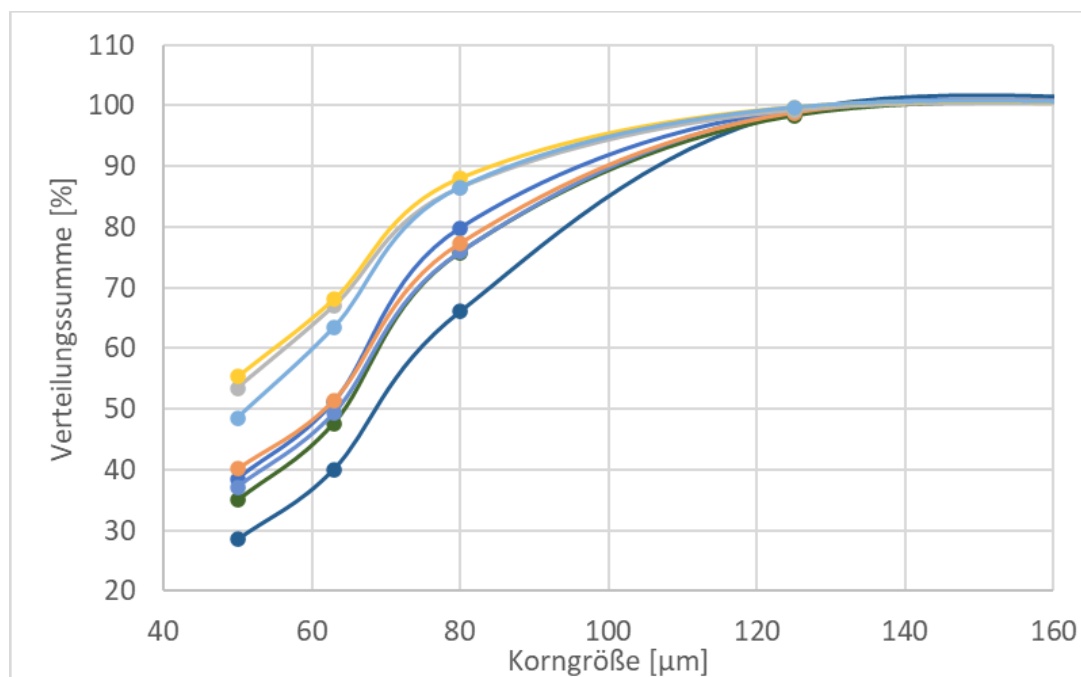


Abbildung 1: Korngrößenverteilung unterschiedlicher NiO Granulat Chargen

Neben der Korngröße hat auch die Kornform einen wesentlichen Einfluss auf die Förderfähigkeit und das Aufschmelzverhalten des Pulvers. In Abbildung sieht man die REM-Aufnahme des NiO- Granulates. Das Granulat liegt größtenteils in einer kugeligen Kornform und in einem breiten Kornspektrum vor. Einige Agglomerate konnten festgestellt werden und die Pulverpartikel weisen eine raue Oberfläche auf, auf der feine Anhaftungen zu beobachten sind.

Die Reinheit des Pulvers und des daraus hergestellten Granulates sind in Tabelle 2 gegenübergestellt. Die Metallische Reinheit beträgt > 99,99%.

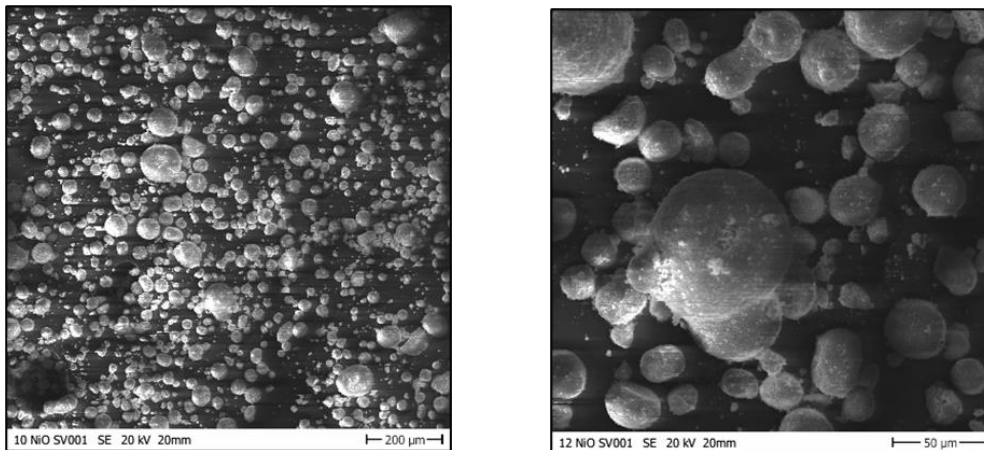


Abbildung 2: REM-Aufnahme eines Nickeloxidgranulates

	Pulver - Lieferantenangabe	Granulat
Ni	76,9%	
Co	< 10 ppm	< 10 ppm
Cu	0,3 ppm	< 10 ppm
Fe	11 ppm	< 40 ppm
S	< 10 ppm	< 10 ppm
Andere Metalle (je Element)	< 10 ppm	< 100 ppm (ICP-Screening)

Tabelle 2: chemische Analyse des Nickeloxid, Angabe in Masseanteil

2.4 Arbeitssicherheitstechnische Untersuchungen und Bewertung

Nickeloxid ist ein kanzerogener Stoff Kategorie 1A. Die Gefährdung besteht durch eine inhalative Exposition von einatembaren Feinstäuben (Stäube $< 10 \mu\text{m}$).

Um den Arbeitsschutz zu gewährleisten, wurden umfangreiche technische und organisatorische Schutzmaßnahmen ergriffen. Dazu zählen unter anderem:

- Abgrenzung des Gefahrenbereiches
 - Handling mit Nickeloxid in einem extra abgetrennten Raum
 - alle kontaminierten Gegenstände bleiben im Raum
- Begrenzung der Exposition
 - Spritzen in geschlossener Anlage
- Lagerung
 - nur Zutritt für fachkundige, unterwiesene Personen
 - Lagermenge $< 1\text{t}$, ansonsten greift die Störfallverordnung
- Persönliche Schutzausrüstung
 - Vollschutz inkl. Atemgebläsesystem (Abb. 3a)

Zusätzlich wurden folgende Maßnahmen zur Vermeidung von Staubbefreiung beim Pulver Handling umgesetzt.

- Umfüllen von Nickeloxid Pulver in entsprechende Gebinde in geschlossener Box (Abb. 3b)
- Anschaffung einer Einfüllhilfe zum staubfreien Befüllen der Pulvertöpfe (Abb. 3c)



Abbildung 3: a) persönliche Schutzausrüstung, b) Box zum staubfreien Umfüllen von NiO Pulver, c) Befüllen von Pulvertöpfen mit Easy Fill

Zur Ermittlung der Gefährdung der Mitarbeiter durch Nickeloxidstäube wurde jeweils eine Arbeitsplatzmessung zu Beginn und gegen Ende des Projektes durchgeführt. Dazu wurde der Mitarbeiter während der Herstellung eines Nickeloxid Targets mit einem Probenahmesystem (Personal Air Sampler) ausgerüstet. Während der Probennahme wurden alle expositionsrelevanten Tätigkeiten ausgeführt. Es ist zu beachten, dass die Messung am Ende des Projektzeitraumes an einer anderen Anlage durchgeführt wurde. Die zunächst genutzte Laboranlage war eine vakuumdicht verschlossene Kammer, bei der jegliche Emission von Nickeloxid während des Beschichtungsprozesses ausgeschlossen war.

Allerdings war dadurch die Absaugleistung von Spritzstaub erheblich limitiert. Dies führte bei längeren Spritzzeiten zu einem erheblichen Belag der inneren Kammerwand mit Nickeloxid. Arbeitsschutztechnisch war die Reinigung der Anlage nicht zumutbar.

Nach erneuter Arbeitsschutztechnischer Bewertung wurde auf Grundlage der bisherigen Untersuchungen entschieden, einen Test an einer Produktionsanlage mit einer vielfach höheren Absaugleistung durchzuführen. Wie sich dabei zeigte kann der Spritzstaub in der Produktionsanlage fast vollständig durch die bessere Absaugung in den Filter abgesaugt werden. Wischproben mit deionisierten Wasser getränkter Tücher zeigten sogar niedrigere Nickeloxid Belastungen als am Standort der Laboranlage. Der Vergleich der Arbeitsplatzmessungen zu Beginn des Projektzeitraumes an der Laboranlage mit Messung am Ende des Projektes an der Produktionsanlage bestätigen die Verringerung der Staubbelastung.

	Laboranlage Projektstart	Produktionsanlage Projektende
Normierter NiO Messwert der Wischprobe	0,5 ppm/m ²	0,05 ppm/m ²
Ni(E) – Staub aus Arbeits- platzmessung	0,026 mg/m ³	0,015 mg/m ³

Tabelle 3: Ergebnisse der Arbeitsplatzmessungen an Laboranlage bzw. Produktionsanlage

2.5 Versuche zur Erhöhung des DE-Wertes und der Schichtdicke

Sowohl aus Kostengründen als auch aus Arbeits- und Umweltschutzgründen wird bei der Erarbeitung der Spritzparameter der Fokus auch auf eine Optimierung des Auftragswirkungsgrades (DE: Deposition Efficiency) gelegt, um Materialverluste zu minimieren und somit Kosten für eine spätere Targetfertigung zu minimieren. Bei den Parameteruntersuchungen an dünnen Spritzschichten wurden schon einige Prozessparameter mit hohem Einfluss auf den DE-Wert ermittelt. Dazu zählen unter anderem Trärgasmenge und der Spritzabstand. Gleichzeitig hatten die Vorversuche gezeigt, dass bei kürzerem Spritzabstand die mechanischen Spannungen im Targetmaterial zunehmen, erkennbar an einer verstärkten Rissbildung. Um diese Spannungen in der Schicht weiter zu reduzieren bei gleichzeitig guten Auftragswirkungsgraden wurde eine weitere Brennertechnologie getestet. Dieser Schritt ist auch durch den Wechsel von der Laboranlage auf die Produktionsanlage möglich geworden. Die Vorteile der Produktionsanlage gegenüber der Laboranlage sind in Tabelle 4 gegenübergestellt.

	Laboranlage (mit Brenner 1)	Produktionsanlage (mit Brenner 1 oder 2)
Anlage	Komplett geschlossene Kammer (vakuumdicht)	Spritzkabine (nicht vakuumdicht)
mögliche Technologie	1 Plasmabrenner	2 verschiedene Plasmabrenner möglich
Max. Targetlängen	< 2100 mm	< 4000 mm
Auswirkungen auf Qualität	In Regel Durchlaufbetrieb, keine Messung der Schichtdicke und Reinigung des Brenners möglich (Risiko von Rotzer)	Regelmäßiges Öffnen zur Messung der SD und Reinigung des Brenners möglich (Reduzierung Rotzer)
Targetgeometrie	Zyl. / Dogbone	Flexiblere Dogbone Gestaltung (z.B. langsam auslaufender Dogbone)
Reinigung Rohroberfläche	Nicht in Anlage möglich	Direkt in Anlage möglich
Reinigung Anlage	Sehr aufwändig	Aufwand geringer

Tabelle 4: Vergleich Laboranlage und Produktionsanlage für Spritzen von Nickeloxid

Der Einfluss der Prozessparameter von Brenner 2 in der Produktionsanlage ist in einem weitem Prozessfenster hinsichtlich Erhöhung der Schichtdicke und DE% untersucht worden. Wie man dem Vergleich zwischen den beiden Brennertypen der Tabelle 5 entnehmen kann, verhalten sich die Brenner ähnlich. Wie erhofft ist der Einfluss der Änderung vom Spritzabstand auf die Rissanfälligkeit der Schicht bei Verwendung von Brenner 2 etwas geringer. Das eröffnet die Möglichkeit den Spritzabstand zu variieren, ohne dabei die Hafttrate zu verschlechtern.

Erhöhung von ...	Einfluss auf rissfreie Schichtdicke		Einfluss auf Hafttrate	
	Brenner 1	Brenner 2	Brenner 1	Brenner 2
... Brennerleistung	Geringer Einfluss	Geringer Einfluss	positiv	positiv
... Plasmagas	Geringer Einfluss	Geringer Einfluss	Geringer Einfluss	positiv
... Spritzabstand	positiv	Geringer Einfluss	negativ	negativ
... Trägergas	negativ	Geringer Einfluss	positiv	positiv

Tabelle 5: Vergleich zweier Brennertechnologien bei der Herstellung von NiO Schichten

Durch die Verwendung des sehr feinen Nickeloxid Granulates kommt es nach längeren Prozesszeiten zu Anbackungen an den Pulverinjektoren. Wachsen diese Anbackungen Richtung Plasmaflamme können sie spontan abfallen und werden nachfolgend als teilweise unaufgeschmolzene grobe Partikel in die Schicht eingebaut. Sie können in der Folge Löcher in der Schicht verursachen, wenn sie durch einen nachfolgenden Reinigungsschritt herausgerissen werden (Abbildung 4).



Abbildung 4: links) Rotzer auf Targetschicht rechts) Loch in Schicht nach Reinigung der Oberfläche

Um die Prozessstabilität weiter zu erhöhen, wurden deshalb ein zweiter Injektortyp getestet, der eine deutlich verringerte Tendenz zur Bildung von Anbackungen zeigte.

Bei den verwendeten Nickeloxid Granulaten konnte auch durch Parametervariation über einen sehr weiten Bereich die angestrebte Auftragsrate von über 70% nicht erreicht werden. Allerdings stellte sich während der Versuche heraus, dass sich die Auftragsrate bei Verwendung unterschiedlicher Nickeloxid Chargen ändert. Deshalb wurde nochmals die Kornverteilung der verschiedenen Pulverchargen mit der Auftragsrate in Bezug gebracht und die Prozessparameter der Granulation angepasst, um eine geeignete Korngröße zu erhalten.

Die Prozessparameter konnten so weit angepasst werden, dass auf einem Grundrohr der Geometrie $\varnothing 133 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ rissfreie Nickeloxid Schichten mit einer Schichtdicke von 10 mm und einer Haft-rate von knapp 60% hergestellt werden konnten. Damit konnten die Anforderungen dieses Teilvorhabens im Wesentlichen erreicht werden. Lediglich die als Ziel gesetzte Haft-rate von $> 70\%$ wurde nicht erreicht, erscheint aber mit einem verbesserten Nickeloxid Granulat durchaus erreichbar zu sein.

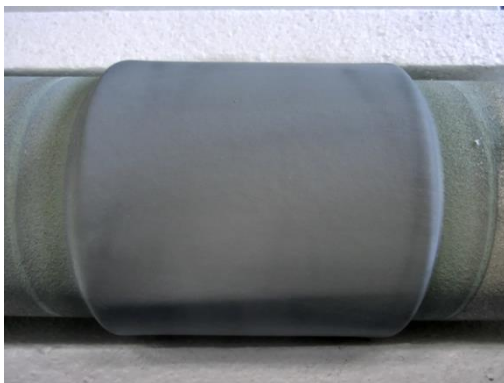


Abbildung 5: Nickeloxid Schicht mit einer Schichtdicke von 10 mm und einer Schichtlänge von 200 mm

2.6 Versuche zu dotierten NiO- Targetschichten

Von den Projektpartnern gab es keine Nachfrage nach einer zusätzlichen Dotierung von Nickeloxid, um die Schichteigenschaften an die Anforderungen der Zelle anzupassen. Deshalb wurde im Rahmen des Projektes nur der zusätzlich erforderliche Prozessschritt des Pulvermischens von kanzerogenen Stoffen untersucht. Dabei musste das Handling des Pulvers, die Zusammenstellung der Mischung und das Mischen ohne Emission von Staub durchgeführt werden. Dazu wurde wie zum Umfüllen des NiO Pulvers eine geschlossene Box genutzt.

2.7 Fertigung Targetmuster

Mit dem geeignetsten Parametersatz wurde ein in erstes Targetmuster \varnothing 142 mm x 950 mm mit der Zielschichtdicke von 4 mm hergestellt.



Abbildung 6: Targetmuster \varnothing 142 mm x 950 mm, Meilenstein 3.1

Das Nickeloxidtarget wurde zum Testen des Sputterprozess mit folgenden physikalischen und chemischen Eigenschaften an den Projektpartner ausgeliefert:

- unterstöchiometrisches $\text{NiO}_{0,9}$
- sehr geringer elektrischer Widerstand mit $< 0,001 \text{ Ohmcm}$
- Dichte $> 93\%$ der theoretische Dichte
- geringer Restmagnetismus

Die Hauptverunreinigungen der Targetschicht sind in Tabelle 6 dargestellt.

Na	Al	Si	S	Ca	Cr	Fe	Cu	C
1,4	1,1	2,2	1,2	1,0	2,5	17	1,5	90

Tabelle 6: Auszug aus chemischer Analyse der NiO Targetschicht, Angabe in ppm wt

2.8 Ergebnisse in Bezug zur ursprünglichen Teilvorhabensbeschreibung

Es konnte ein Nickeloxidrohstoff qualifiziert werden, welcher den chemischen und physikalischen Anforderungen an die Nickeloxid Schicht entspricht und für eine Granulation geeignet ist. Im Rahmen eines Unterauftrages wurde eine geeignete Granulationstechnologie entwickelt. Das daraus hergestellte Granulat ist förderfähig, die Granulationsparameter müssten allerdings im Anschluss an das Projekt weiter optimiert werden, um die Auftragseffizienz beim Spritzprozess zu erhöhen.

Abweichend von der Vorhabensbeschreibung wurde das Messgerät Accura Spray zur Messung von Spritzstrahleigenschaften nicht erworben. Dadurch konnten keine Voruntersuchungen zum Einfluss von Prozessparametern auf die Spritzstrahleigenschaften durchgeführt werden. Dies wurde durch eine erhöhte Anzahl iterativer Schritte zur Findung geeigneter Prozessparameter kompensiert. Es konnten geeignete Prozessparameter zur Herstellung von Nickeloxid Targets gefunden werden. Das Zwischenziel, bis zum 9. Projektmonat Prozessbedingungen zur Herstellung des ersten Mustertargets geringer Schichtdicke für erste Sputterversuche bei den Projektpartnern entwickelt zu haben, wurde erreicht

Die Prozessparameter konnten so weit angepasst werden, dass auf einem Grundrohr der Geometrie \varnothing 133 mm x 500 mm rissfreie Nickeloxid Schichten mit

- einer Schichtlänge von 200 mm, sowie
- einer Schichtdicke von 10 mm und
- mit einem DE Wert von knapp 60%

hergestellt werden konnten. Damit konnten die Anforderungen dieses Teilvorhabens im Wesentlichen erreicht werden. Lediglich die als Ziel gesetzte Haftrate von > 70% wurde nicht erreicht, erscheint aber mit einem verbesserten Nickeloxid Granulat erreichbar.

Aus Arbeitsschutztechnischer Sicht ist eine Targetfertigung mit kanzerogenen Rohstoffen an den bisherigen Produktionsanlagen unter Beachtung zusätzlicher Sicherheitsvorkehrungen möglich. Dazu wurden entsprechende Betriebs- und Arbeitsanweisungen und ein Konzept zum thermischen Spritzen kanzerogener Stoffe erstellt.

3 Erhöhung der Einsatzgrenze für ZnO Targets

3.1 Literaturrecherche zur Werkstoffauswahl

Die Einsatzgrenze von Freiloc®- gebondeten Rohrtargets wird vor allem durch die Eigenschaften der Bondverbindung zwischen Grundrohr und Targetmaterial bestimmt. Die Bondverbindung muss so beschaffen sein, dass möglichst viel der beim Sputtern in das Targetmaterial eingebrachten Wärme an das Kühlwasser im Grundrohr abgegeben werden kann. Von großer Bedeutung dafür sind die Eigenschaften der zum Bonden verwendeten Materialien, vor allem die Wärmeleitfähigkeit und die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffes sowie das Design.

Der Schwerpunkt des ersten Arbeitspaketes bestand in der Recherche nach alternativen Werkstoffen zu dem bisher verwendeten niedriglegierten Kupfer. Die alternativen Legierungen sollten eine deutlich höhere Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zu dem bisher verwendeten Material aufweisen, um möglichst viel, der beim Sputtern entstehenden Wärme, ableiten zu können. In der Regel geht dies allerdings einher mit einer schlechteren Performance der mechanischen Eigenschaften. Diese sind vor allem durch das Relaxationsverhalten gekennzeichnet sowie durch die Biege- bzw. Zugfestigkeit. Ist das Relaxationsverhalten ungenügend droht im schlimmsten Fall das Versagen der Bondverbindung und damit eine Havarie des Targets beim Kunden. Von ähnlicher Bedeutung sind auch die Zug- und Biegefestigkeit.

Neben den genannten Eigenschaften ist ein weiterer wesentlicher Aspekt die Verfügbarkeit der Legierung in bestimmten Abmessungen am Markt. Dafür sollten wenigstens drei Lieferanten vorhanden sein, um das Risiko von Lieferengpässen zu minimieren.

Basierend auf diesen Anforderungen wurde eine alternative ebenfalls niedrigdotierte Cu-Legierung ausgewählt. Nachfolgende Übersicht soll eine Einordnung der relevanten Eigenschaften im Vergleich zur bisher verwendeten Legierung geben:

Wärmeleitfähigkeit:	gut, etwa doppelt so hoch wie bei der z.Z. verwendeten Legierung
Umformbarkeit:	sehr gut

Relaxationsverhalten:	noch ausreichend
Mechan. Eigenschaften:	wahrscheinlich noch ausreichend, muss am Bauteil getestet werden
Lötbarkeit:	sehr gut

Die Legierung ist allerdings in den geringen Abnahmemengen nicht in der gewünschten Geometrie zu erwerben. Daher wurde geplant dieses Halbzeug mit Blechdicken zwischen 0,6 und 1,5mm bzw. Bandbreiten bis zu 200 mm, je nach Anbieter, auf einem Reversiergerüst auf die entsprechenden Dicken herunterzuwalzen. Auf einer Längsteilanlage (LTA) sollten die Bänder dann auf die entsprechende Breite konfektioniert werden. Für die beim Walzen erforderlichen Zwischenglühungen sowie für die abschließende Wärmebehandlung zur Einstellung der gewünschten Eigenschaften standen entsprechende Öfen zur Verfügung.

Die Umsetzung dieses Ansatzes ist verbunden mit einem umfangreichen Versuchsprogramm zur Erarbeitung einer entsprechenden Walz- und Wärmebehandlungstechnologie. Der Vorteil dieses neuen Weges bestand vor allem darin, dass damit auf eventuell erforderliche Änderungen selbst schnell Einfluss genommen werden kann.

3.2 Untersuchungen und Prototypenfertigung

3.2.1 Walzversuche zur Halbzeugfertigung

Für erste Walzversuche wurde ein Coil mit einer Blechdicke von 0,6mm, einer Breite von 180mm sowie einer Länge von ca. 13m gekauft.

Da es keine aushärtbare Legierung ist, müssen die mechanischen Eigenschaften über den Verfestigungsgrad eingestellt werden. Der Grad der Verfestigung läuft allerdings konträr zur Leitfähigkeit, so dass ein Kompromiss aus beiden Eigenschaften gefunden werden musste.

Das gelieferte Material wies einen Verfestigungsgrad von nahezu 100% auf. Für eine weitere Umformung war deshalb eine Rekristallisationsglühung erforderlich. Zur Charakterisierung des Ausgangsgefüges wurden metallografische Schliffbilder aufgenommen. Der geätzte Schliff zeigt das typische Verformungsgefüge (Abbildung 7).



Abbildung 7: Band mit Dicke 0,6mm im Anlieferungszustand. Der geätzte Zustand zeigt ein typisches Verformungsgefüge.

Zur Wiederherstellung der Umformbarkeit erfolgten Glühungen mit Blechstreifen aus dem Coil in einem speziellen Vakuumofen. In diesem Ofen erfolgt später nach der entsprechenden Parameterfindung auch die Glühung des ganzen Coils. Aus den Proben wurden die mechanischen Kennwerte sowie die elektrische Leitfähigkeit ermittelt (Tabelle 7). Die Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit erfolgte mit der Vierspitzenmethode. Außerdem wurde jeweils ein metallografischer Schliff angefertigt zur Überprüfung des Rekristallisationsgrades.

Sowohl bei den mechanischen Eigenschaften als auch bei der elektrischen Leitfähigkeit gibt es bei diesen zwei Glühbedingungen kaum Unterschiede. In den Schliffbildern sind zwischen den zwei Glühbedingungen ebenfalls kaum Unterschiede festzustellen (Abbildung 8).

Probe	HV1	Rp0,2 (MPa)	Rm (MPa)	A (%)	El. Leitf.* ¹ (mS/m)
600°C	87,8	151	320	29	35,7
650°C	85	148	320	34,4	35,8

Tabelle 7: Mechanischen Kennwerte sowie die elektrische Leitfähigkeit des Ausgangsmaterials nach 2 Glühbehandlungen.

*1 Elektrische Leitfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit korrelieren, daher wurde aus Kostengründen zunächst nur die elektrische Leitfähigkeit betrachtet.

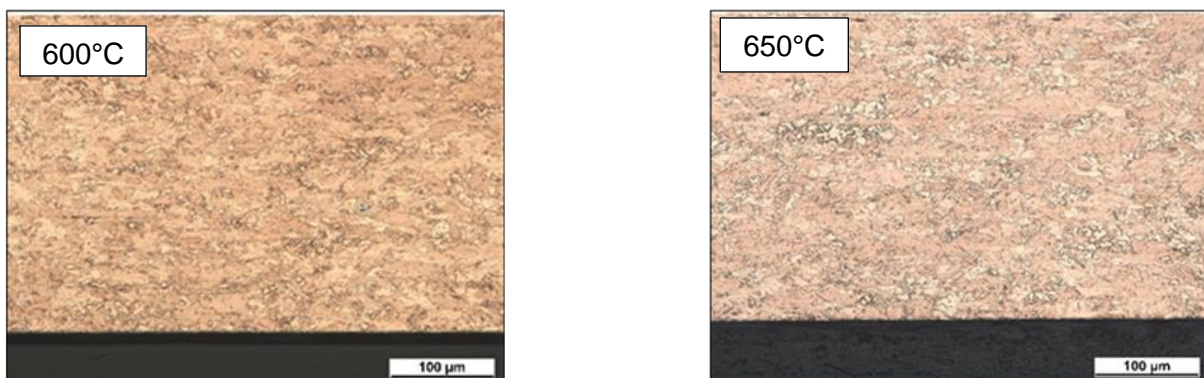


Abbildung 8: Rekristallisationsglühung des Bandes mit Dicke 0,6mm im Anlieferungszustand bei 600°C bzw. 650°C im Vakuumofen.

Da die Einflussgrößen auf die Blecheigenschaften sehr vielfältig sind und damit die Anzahl der Versuche entsprechend hoch sein muss, wurden zunächst Walzversuche an kurzen Blechstreifen (60x300mm) durchgeführt, um die Materialkosten in Grenzen zu halten. Die Versuche sind auf dem reversierenden Quarto-Gerüst der GfE Fremat durchgeführt worden mit dem später, nach entsprechender Parameterfindung, auch die Coils gewalzt werden. Abbildung 9 zeigt das Walzgerüst mit Auf- und Abhaspel.



Abbildung 9: Reversierendes Quarto- Walzwerk der GfE- Fremat.

Bleche mit Dicken von 1 - 6 mm lassen sich hiermit bis zu einer Breite von max. 350 mm verarbeiten und Bänder mit Dicken von 0,6 bis 2mm bis zu einer Breite von max. 200mm.

Zunächst sollten die zwei rekristallisationsgeglühten Blechstreifen (60x300mm) auf die Zielenddicke gewalzt werden.

In Abbildung 10 ist beispielhaft das gewalzte Blech gezeigt.



Abbildung 10: Blech gewalzt ohne Zwischenglühung.

Für die mechanischen Eigenschaften der späteren Verbindungselemente ist ein möglichst hoher Verfestigungsgrad anzustreben da diese Legierung nahezu nicht aushärtbar ist. Der Grad der Verfestigung wurde im Zugversuch über die Zugfestigkeit und Bruchdehnung ermittelt. Zur zusätzlichen Bewertung erfolgte jeweils eine Härtemessung. Neben den mechanischen Eigenschaften ist vor allem die Leitfähigkeit des Materials von großer Bedeutung. Erwartungsgemäß nimmt diese im verfestigten Zustand ab. In Tabelle 8 sind alle ermittelten Werte der gewalzten Bleche zusammengestellt.

Probe	ϵ (%)	HV1	$R_{p0,2}$ (MPa)	R_m (MPa)	A (%)	El. Leitf. (mS/m)
Gewalzt auf 0,30mm	51	145	148	320	34,4	32
Gewalzt auf 0,12mm	81	156	500	523	1,3	29

Tabelle 8: Mechanische Kennwerte und elektrische Leitfähigkeit für zwei Blechdicken

Man erkennt, dass besonders bei dem dünneren Blech das Umformvermögen nahezu vollständig ausgeschöpft ist. Der Gesamtumformgrad lag hier bei etwas über 80%. Die elektrische Leitfähigkeit hat etwa um ein Viertel abgenommen. Die mechanischen Eigenschaften der anderen Probe korreliert gut mit dem Umformgrad. Die Proben, die auf eine höhere Blechdicke gewalzt wurden, weisen einen

ähnlich hohen Verlust an elektrischer Leitfähigkeit auf. Die Abbildung 11 zeigen die entsprechenden Gefügebilder dieser Proben.

Alle Proben weisen ein typisches Verformungsgefüge auf. Bei der auf 0,12mm gewalzten Probe ist keine Kornstruktur mehr zu erkennen was gut mit den ermittelten mechanischen Eigenschaften korreliert.

Wie aus Tabelle 8 ersichtlich geht ein hoher Verfestigungsgrad einher mit einem Verlust von ca. 25% an sowohl elektrischer als auch thermischer Leitfähigkeit. Um letztere wieder zu verbessern erfolgte an den umgeformten Proben eine entsprechende Glühung im Vakuumofen.

Durch eine Optimierung der Glühparameter konnte schließlich ein Kompromiss zwischen den mechanischen Eigenschaften und elektrischen Eigenschaften eingestellt werden.

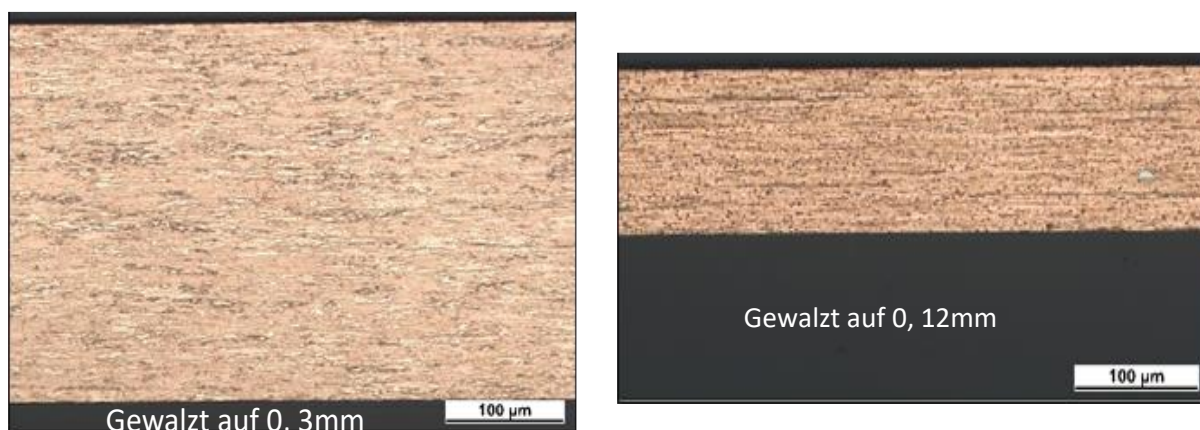


Abbildung 11: Gefügebilder der gewalzten Proben

Das Walzen der Halbzeuge für die Fertigung der Verbindungselemente erfolgte später von einem Coil unter Zugspannung. Die aufgebrachte Zugspannung reduziert die notwendigen Walzkräfte und hat auch Einfluss auf das sich ausbildende Gefüge. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse aus den Versuchen mit den Blechstreifen wird dennoch als gegeben angesehen. Um trotzdem sicherzugehen erfolgten mit den ermittelten Parametern Walzversuche unter Zug. Dazu wurden aus dem vorhandenen Coil 2 Streifen mit den Abmessungen 90x 1000mm herausgetrennt und unter einer angelegten Zugspannung von 2000N mit den zuvor an den kurzen Blechstreifen ermittelten Parametern gewalzt. In Abbildung 12 ist eines der beiden Bänder in dem Quarto- Walzwerk gezeigt.



Abbildung 12: Reversierendes Walzen einer 1m- Probe unter Zug auf dem reversierenden Quarto- Walzwerk der GfE- Fremat.

Eines der beiden gewalzten Bänder wurde anschließend einer Wärmebehandlung unterzogen, um die Leitfähigkeit zu verbessern. Die Steigerung der Leitfähigkeit war dabei gering. Die mechanischen Eigenschaften haben sich jedoch deutlich verschlechtert. Von einer Schlussglühung wurde aus diesem Grund und auch wegen des relativ hohen Aufwandes abgesehen.

Der nächste Schritt bestand darin das 13kg- Coil mit der erarbeiteten Technologie auf die Zielbanddicke zu walzen.

Anschließend wurde das 180mm breite Coil auf der LTA längsgeteilt in zwei 90mm breite Streifen. Abbildung zeigt das gewalzte und gehaspelte Coil mit einer Bandlänge von 30 Metern.

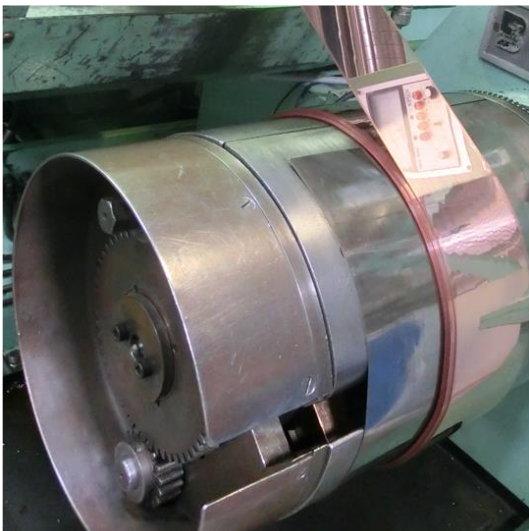


Abbildung 13: Gewalztes und gehaspeltes Coil mit einer Bandlänge von 30 Metern.

Von dem Coil wurden Proben jeweils aus der Innen- sowie Außenseite genommen zur Ermittlung der mechanischen Eigenschaften sowie der Leitfähigkeit. Damit sollte geprüft werden, ob es bei der vorangegangenen Wärmebehandlung aufgrund der Lage im Ofen zu Unregelmäßigkeiten gekommen war. Sowohl bei den mechanischen Eigenschaften als auch bei der Leitfähigkeit sind kaum Unterschiede zwischen Innen- sowie Außenseite des Coils zu erkennen. Auch stimmen die Werte gut mit

denen der zuvor unter Zug gewalzten 1m- Proben überein. Damit ist die gute Reproduzierbarkeit der Technologie nachgewiesen.

Parallel zu den Walzungen erfolgte die Konstruktion der ersten Prototypen. Im Hinblick auf die seit längerem bei GfE erfolgreich angewandte freiloc- Bondtechnologie gab es dabei bezüglich der Geometrie gewisse Grenzen, die einzuhalten waren. Die Konstruktion erfolgte unter dem Aspekt einer maximal möglichen Wärmeableitung bei gleichzeitiger Wahrung der mechanischen Eigenschaften, die für die Funktion unabdingbar sind.

Es wurden zunächst 18 Verbindungselemente gefertigt, um zu prüfen, ob die Projektidee erfolgversprechend ist.

3.3 Bondversuche

Mit der Hälfte der Verbindungselemente wurde ein kraftschlüssiges AZOY- Versuchstarget hergestellt für die Tests zur Sputtersimulation bzw. zur Ermittlung des Wärmedurchganges (Abbildung 14).

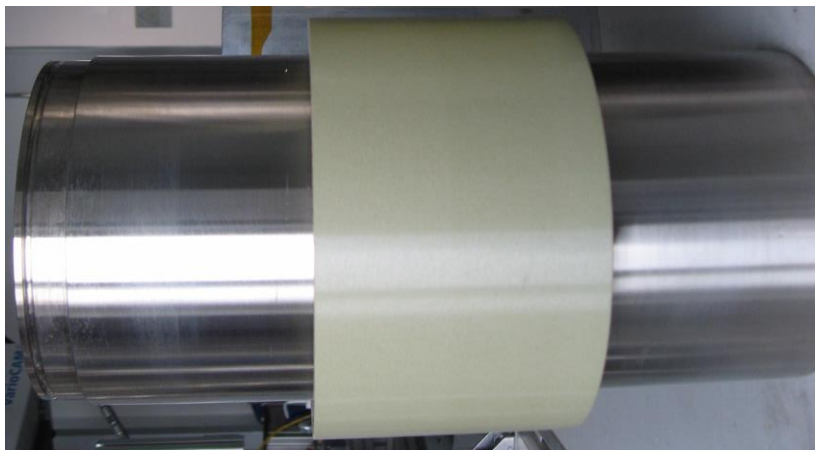


Abbildung 14: Kraftschlüssiges AZOY- Versuchstarget mit neuen Verbindungselementen.

Die Belastbarkeit und Zuverlässigkeit im Beschichtungsprozess ist ein wesentliches Qualitätsmerkmal von Sputtertargets. Im Sputterprozess werden erhebliche Wärmemengen in das Target eingebracht, die im Idealfall nahezu vollständig über das Kühlwasser abgeführt werden. Je nach Material, Targetart und Anlagenparametern kann sich die Targetschicht teilweise stark erhitzen. Bei oxidischen Targets können dabei je nach Art der Anbindung zum metallischen Grundrohr Temperaturen bis zu 400°C auftreten. Aufgrund der zumeist deutlich unterschiedlichen Materialeigenschaften zwischen dem metallischen Grundrohr und dem Targetmaterial kann dies mit erheblichen Spannungen verbunden sein, die im schlechtesten Fall zum Versagen des Targets führen können. Die Kenntnis über das Verhalten der Targets unter thermischer Belastung ist daher ein ganz wesentlicher Aspekt bei der Produktentwicklung. In einem speziellen Versuchsstand kann dazu die Homogenität der Oberflächentemperatur, die Rückschlüsse auf die Schichtanbindung, auf Materialfehler sowie auf Spannungen zulässt, geprüft werden.

Mit diesem Versuchsstand ist auch das Versuchstarget mit den neuen Verbindungselemente getestet worden analog zu Targets die mit dem bestehenden Federmaterial gefertigt wurden.

Die durchgesetzte Wärmeleistung beim Testtarget konnte durch die neuen Verbindungselemente gegenüber einem Versuchstarget mit aktuellen Verbindungselementen um über 50% gesteigert werden. Auch die Homogenität der Oberflächentemperatur lässt auf eine durchgängig gute Anbindung schließen: Die radiale Temperaturabweichung bei einer Leistung von 20kW/m lag nur bei ca. 10°C. Abbildung 1 zeigt das Thermographiebild des wassergekühlten Versuchstargets bei einer Leistung von 20kW/m und einer Drehzahl von 10min⁻¹.

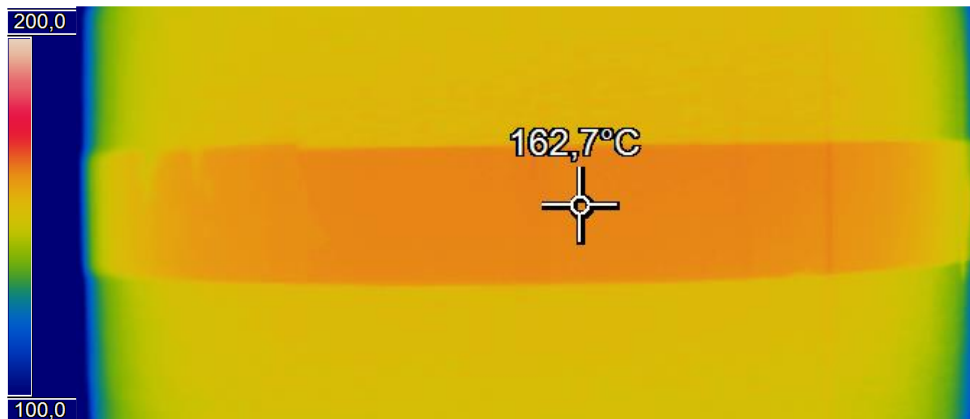


Abbildung 1: Thermographiebild des Versuchstargets bei einer Leistung von 20kW/m und einer Drehzahl von 10min⁻¹.

3.4 Ergebnisse im Bezug zur ursprünglichen Teilvorhabensbeschreibung

Über Literaturrecherchen konnte potenzielle Werkstoffgruppen mit entsprechenden mechanischen und physikalischen Eigenschaften als Verbindungselement zwischen Grundrohr und keramischen Schicht gefunden werden. Kommerziell waren diese Werkstoffe leider in den gewünschten Abmessungen nicht verfügbar. Deshalb musste entgegen ursprünglichen Planungen die Halbzeugfertigung der Bänder bei der GfE Fremat GmbH selbst durchgeführt werden. Die Umsetzung war verbunden mit einem umfangreichen Versuchsprogramm zur Erarbeitung einer entsprechenden Walz- und Wärmebehandlungstechnologie. Der Vorteil dieses neuen Weges bestand vor allem darin, dass damit auf eventuell erforderliche Änderungen selbst schnell Einfluss genommen werden konnte.

Aus dem somit hergestellten Halbzeug konnten erfolgreich erste Verbindungselemente hergestellt werden. Der Belastungstest eines damit hergestellten AZOY- Testtargets zeigte eine um 50% verbesserte durchgesetzte Wärmeleistung. Damit konnte der Meilenstein 3.3 erfolgreich abgeschlossen werden.

4 Wichtigste Positionen des Zahlenmäßigen Nachweises

Der größte Anteil der finanziellen Zuwendung wird durch die Personalkosten verursacht. Die hohe Anzahl der iterativen Schritte zur Findung und Optimierung der Prozessparameter bedingt einen erheblichen Zeitaufwand zur Versuchsplanung, -durchführung und Auswertung. Die Planung und der Umgang mit kanzerogenen Stoffen erforderte einen abteilungsübergreifenden Personaleinsatz von Arbeitsschutzbeauftragten, Technikern, Ingenieuren und Anlagenbedienern.

Neben den Personalkosten bilden die Materialkosten und sonstigen Dienstleistungen, hauptsächlich für die Granulation des Nickeloxid, die Positionen mit den höchsten finanziellen Zuwendungen. Die Rohstoffe wurden in diesem Umfang benötigt, um die geplanten Versuche und Targetmuster für die

Projektpartner durchzuführen. Die Materialkosten wurden dabei in dem geplanten Umfang nicht vollständig ausgeschöpft, da abweichend von der ursprünglichen Planung ein kommerziell verfügbares und preiswertes Nickeloxid genutzt werden konnte. Verbunden damit war ein erhöhter Aufwand für die Granulation des Materials, um es spritzbar zu machen. Dadurch wurde die Position sonstige unmittelbare Vorhabenskosten leicht überschritten.

Die Position Abschreibung auf Investitionen konnte deutlich reduziert werden, da das Messgerät Accura Spray für einen Einbau und Betrieb in der Laboranlage nicht geeignet war und nicht angeschafft wurde.

5 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Im Rahmen des Verbundprojektes PeroQ „Perowskit auf Q.antum- Tandemzellen“ entwickelte die GfE Fremat GmbH als Hersteller von Target Materialien ein kommerziell nutzbares keramisches NiO Rohr-Target für die Perowskit basierten Solarzelle. Ohne eine Kooperation wie im Rahmen des Projektes ist eine Entwicklung von solchen kanzerogenen Targetmaterialien und eine Überführung in den Produktionsprozess nicht möglich. Die Projektmittel wurden dafür im notwendigen Umfang verwendet.

Aufgrund der kurzen Projektlaufzeit bestand die Notwendigkeit zur parallelen Verfolgung mehrerer Lösungsansätze zur Optimierung der Spritzparameter für Nickeloxid. Durch die jahrelange Tätigkeit in der Entwicklung thermisch gespritzter Targetmaterialien konnte jedoch die Anzahl der Versuche aufs Wesentliche reduziert werden. Alle durchgeführten arbeitsschutztechnischen Untersuchungen, Spritzversuche und Analysen an den Rohstoffen und Spritzschichten waren für einen sicheren Umgang mit dem Material notwendig und werden daher als angemessen betrachtet.

6 Verwertbarkeit der Ergebnisse und fortgeschriebener Verwertungsplan

Die in der Antragstellung geschilderten wirtschaftlichen Erfolgsaussichten sind am Ende des Berichtszeitraum zeitlich verschoben. Nach Projektende ist durch die Pilotproduktionslinie bei QC ab 2025 von einem Umsatzvolumen von 250 T€ pro Jahr auszugehen. Damit können die weiteren Arbeiten zum Skalieren auf 3 m lange Rohrtargets querfinanziert werden. Nach industrieller Umsetzung der Technologie durch QC wird 2030 von einem Umsatzzuwachs von ca. 0,5 – 1,0 Mio.€ durch die Fertigung von 3 m langen NiO-Rohrtargets bei GfE Fremat ausgegangen.

Die ZnO-Rohrtargets mit verbessertem Wärmedurchgang werden darüber hinaus den Verkauf in CIGS-Anwendungen auf dem Niveau von 2 – 3 Mio. €/a stabilisieren. Bei erfolgreicher Evaluierung des ZnO als ITO-Alternative ist von einem Zusatzumsatz von 1 – 2 Mio. €/a ab 2030 auszugehen.

7 Dem ZE bekannt gewordene Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Projektlaufzeit sind der GfE Fremat GmbH keine Veröffentlichungen bzw. Patente Dritter bekannt geworden, die sich auf das Vorhaben beziehen.

8 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Aus Gründen des Wettbewerbsvorteils sind die Ergebnisse des Teilvorhabens von schützenwertem Interesse und werden daher nicht veröffentlicht. Sie werden jedoch im Rahmen von vertriebsseitigen Tätigkeiten zur technischen Unterstützung bzw. Akquise eingesetzt.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht	
3. Titel Rohrtargets für die Übergangsschicht zwischen Bottom- und Topzellen im Verbundprojekt: Perowskit auf Q.antum- Tandemzellen (FKZ 03EE1118C)		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Dr. Köther-Becker, Sven Dipl.-Ing. Steinert, Folke Dr. Hüttl, Grit	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.05.2023	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation Document Control Sheet	
	8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) GfE Fremat GmbH Gewerbegebiet Süd 20 09618 Brand-Erbisdorf	
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz	9. Ber.-Nr. Durchführende Institution	
	10. Förderkennzeichen 03EE1118C	
	11. Seitenzahl 22	
	13. Literaturangaben 0	
	14. Tabellen 8	
	15. Abbildungen 15	
	16. DOI (Digital Object Identifier)	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)		
18. Kurzfassung Im Projekt wurden Nickeloxid Rohrtargets als Materialquelle für eine Beschichtung in Perowskit basierte Tandemzellen entwickelt. In einem iterativen Ansatz wurden durch Parametervariationen die geforderten Materialeigenschaften, wie z.B. elektrische Leitfähigkeit, Dichte oder geringer Restmagnetismus eingestellt. Es wurde ein Konzept zur industriellen Herstellung von Rohrtargets aus kanzerogenen Stoffen erarbeitet. Im zweiten Arbeitspaket wurden grundlegende Untersuchungen zur Erhöhung der Einsatzgrenze gebondeter Zinkoxid Rohrtargets um 50% durchgeführt.		
19. Schlagwörter Beschichtung, Sputtertarget, Nickeloxid, Zinkoxid, Bondung		
20. Verlag	21. Preis	

Entwurf

Document control sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Veröffentlichung (Publikation)	
3. title Rohrtargets für die Übergangsschicht zwischen Bottom- und Topzellen im Verbundprojekt: Perowskit auf Q.antum- Tandemzellen (FKZ 03EE1118C)		
4. author(s) (family name, first name(s)) Dr. Köther-Becker, Sven Dip.-Ing. Steinert, Folke Dr. Hüttl, Grit	5. end of project 31.05.2023	
	6. publication date	
	7. form of publication Document Control Sheet	
8. performing organization(s) name, address GfE Fremat GmbH Gewerbegebiet Süd 20 09618 Brand-Erbisdorf	9. originators report no.	
	10. reference no. 03EE1118C	
	11. no. of pages 22	
12. sponsoring agency (name, address) BMWK	13. no. of references 0	
	14. no. of tables 8	
	15. no. of figures 15	
16. DOI (Digital Object Identifier)		
17. presented at (title, place, date)		
18. abstract In the project, nickel oxide tube targets were developed as a material source for a coating in perovskite-based tandem cells. In an iterative approach, the required material properties, such as electrical conductivity, density or low residual magnetism, were set by parameter variations. A concept for the industrial production of tube targets made from carcinogenic substances was developed. In the second work package, fundamental investigations were carried out to increase the application limit of bonded zinc oxide tube targets by 50%.		
19. keywords coating, sputtering target, nickel oxide, zinc oxide, bonded		
20. publisher	21. price	

Nicht änderbare Endfassung mit der Kennung 2142750-12