

Abschlussbericht

Aufbau und Betrieb eines Pilotzentrums für neuartige höchsteffiziente Solarzellen – „PV SELECT“

von

Jochen Rentsch
Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE

Förderkennzeichen: L75 15004

Laufzeit: 18.11.2014 – 31.12.2015

Die Arbeiten dieses Projekts wurden mit Mitteln
des Landes Baden-Württemberg durchgeführt.

Juni 2016



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

Ausführende Stelle:

Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE)
Dr. Jochen Rentsch
Heidenhofstrasse 2,
79110 Freiburg
Tel.: 0761 4588 5199

Email: jochen.rentsch@ise.fraunhofer.de

Inhalt

1	Zusammenfassung.....	4
2	Stand der Technik zu Projektbeginn und Ziele des Forschungsvorhabens	6
3	Planung und tatsächliche Durchführung des Forschungsvorhabens	8
3.1	Ursprüngliche Planung	8
3.2	Tatsächliche Bewilligung / revidierte Planung	10
4	Ergebnisse	13
4.1	Aufbau Reinraum, Zu- und Abluftsystem.....	13
4.2	Laborchemieversorgung (Gase, Nasschemie)	15
4.3	Laborsicherheitskonzept.....	18
4.4	Integration Prozessanlagen und Erweiterungen (zusätzliche Investitionen)	19
5	Weiterer Forschungs- und Investitionsbedarf.....	23
6	Verwertbarkeit der Ergebnisse, Ergebnis- und Forschungstransfer	26

1 Zusammenfassung

Heutige industriell gefertigte großflächige Solarzellen erreichen in der Spitze Wirkungsgrade im Bereich nahe 19% auf multikristallinem sowie nahe 21% auf monokristallinem Siliziummaterial. Darüber hinausgehende Solarzellenkonzepte mit deutlich höherem Wirkungsgradpotential konnten mit Ausnahme der Rückkontaktsolarzellentechnologie von Sunpower, bislang nur im Labormaßstab entwickelt und demonstriert werden. Ein vielversprechendes innovatives Solarzellenkonzept stellen sogenannte selektive Kontakte dar. Mit einer Solarzelle basierend auf einem solchen selektiven Heteroübergang (amorphes Silizium auf kristallinem Siliziumwafer) konnte die Firma Panasonic im April 2014 mit 25,6% einen Wirkungsgrad-Weltrekord erzielen. Die Übertragung solcher Prozesstechnologien in ein industrielles Produktionsumfeld stellt hohe Anforderungen an

- die Reinheit der Produktionsumgebung sowie
- die Prozesssicherheit und
- Prozessreproduzierbarkeit.

Im Rahmen des Projektes PV Select wurde die in Abbildung 1 dargestellte und für die Umsetzung oben erwähnter hocheffizienter Solarzellentechnologien notwendige Labor-Reinrauminfrastruktur geschaffen. Basierend auf den Reinheitsanforderungen der unterschiedlichen oberflächensensitiven nass- und trockenchemischen Ätz- und Beschichtungsschritte wurde das Labor in einen Bereich mit Reinraumklasse 1000 sowie in abgetrennte Wartungsbereiche mit niedrigerer Reinheitsstufe eingeteilt (Reinraumklasse 100 in Fläche innerhalb hellblauer Markierungslinie). Die Konzeption beinhaltet zudem ein entsprechendes Reinraum-taugliches Schleusensystem, mit dem sowohl Mitarbeiter als auch ein- und ausgehende Waren den geschützten Bereich betreten bzw. verlassen können. Bei der Planung und Umsetzung der Reinrauminfrastruktur wurde insbesondere darauf geachtet, für kritische Prozess- und Probenlagerungsbereiche eine besondere reine Umgebung zu schaffen und somit mögliche Kontaminationsquellen aus der Umgebungsluft auszuschließen bzw. zu minimieren.

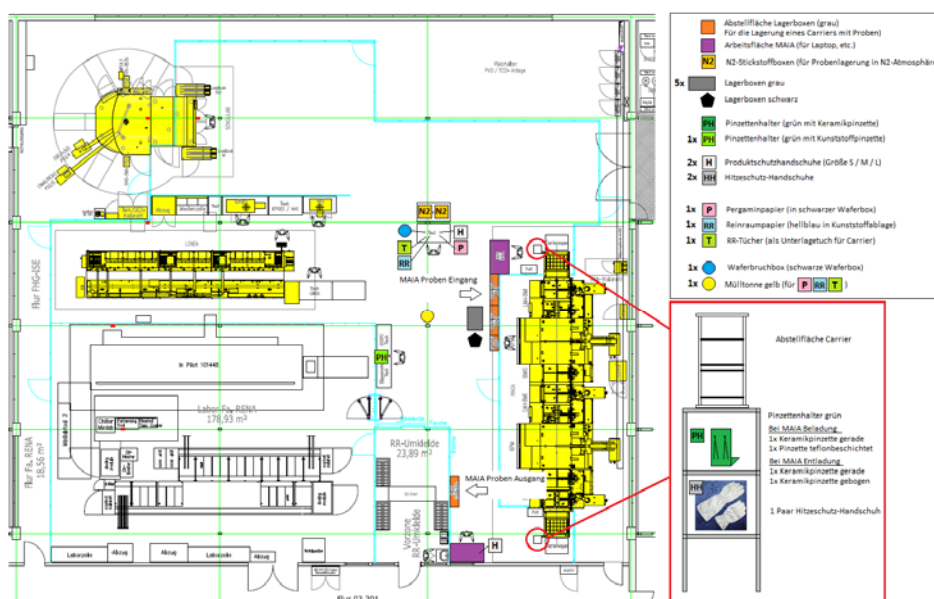


Abbildung 1: Im Rahmen des Projektes PV Select geschaffene Labor-Reinrauminfrastruktur

Die im Rahmen des Projektes zu integrierenden Großbeschichtungsanlagen (Anlagen selbst wurden über parallel laufende Förderprojekte beschafft) erforderten den Aufbau eines umfangreichen Gasver- und Entsorgungssystems, aufgrund der Gefährlichkeit der (teilweise in hoher Konzentration) eingesetzten Gase wie etwa Silan, Phosphin oder auch Diboran wurde des Weiteren eine umfangreiche Sicherheitstechnik installiert (Sicherheitsschränke, Gaswarn- und detektionssysteme, persönliche Schutzeinrichtungen).

2 Stand der Technik zu Projektbeginn und Ziele des Forschungsvorhabens

Die angewandte Solarzellenforschung hat sich in den letzten Jahren insbesondere auf die eher evolutionäre Optimierung und industrielle Umsetzung von beidseitig passivierten Solarzellenkonzepten, wie etwa dem sogenannten „Passivated Emitter and Rear Contact“ (PERC) Konzept auf der Basis des weitverbreiteten Bor-dotierten Siliziums konzentriert. Mittels Prozessieren im Labormaßstab konnten so bereits Wirkungsgrade von über 21%, im industriellen Pilotmaßstab Wirkungsgrade von etwa 20.5% auf p-typ Siliciummaterial erzielt werden. Die Entwicklung dieser Technologie wurde seit dem Jahr 2000 ganz wesentlich durch das Fraunhofer ISE getragen, das hierbei sein Know-How bei der Herstellung von höchsteffizienten Solarzellen genutzt hat, um in Zusammenarbeit mit ihren industriellen Partnern die technologischen Randbedingungen für eine kosten-effiziente industrielle Produktion zu schaffen. Ein Großteil dieser Entwicklung fand am Photovoltaik-Evaluationscenter des Fraunhofer ISE in Freiburg statt, das im Jahr 2005 aufgebaut wurde und in dem Anlagen der deutschen Hersteller eingesetzt, evaluiert und weiterentwickelt wurden. Die am ISE entwickelte industriell umsetzbare PERC-Technologie wurde 2010 an die Firma Q-Cells transferiert, die in Thalheim als erster Hersteller in Europa und vermutlich auch weltweit Anfang 2012 mit der Produktion von Solarzellen mit dieser Solarzellen-Struktur begonnen hat und diese bis heute produziert. Auch die Firma SolarWorld hat als größter Hersteller in Europa bereits einen großen Teil Ihrer Solarzellenproduktion auf die PERC-Struktur umgestellt. Die Forschungs- und Entwicklungserfolge des Fraunhofer ISE auf dem Gebiet der PERC-Technologie wurden mehrfach mit internationalen Preisen gewürdigt (zuletzt 2013 mit dem SolarWorld Einstein Award und 2014 mit dem Innovation Award Laser Technology). Die beiden deutschen PV-Hersteller verfolgen strategisch das Ziel basierend auf der PERC-Technologie die Effizienz Ihrer Solarzellen und Module weiter zu steigern, um in Zusammenarbeit mit der deutschen F&E- und dem Anlagenbau im Wettbewerb gegen die Konkurrenz aus Asien bestehen zu können. Die technische Grenze für diese Entwicklung wird bei einer Effizienz von ca. 22,5% erwartet.

Um nun einen entscheidenden Schritt hinsichtlich des Wirkungsgradpotentials voranzukommen, müssen in Zukunft eher disruptive Technologieansätze bezüglich ihrer industriellen Anwendbarkeit entwickelt und optimiert werden. Ein vielversprechender Ansatz stellt dabei die sogenannte Heterojunction-Technologie dar, eine Mischung aus klassischer kristalliner und Dünnschichttechnologie. Das prinzipielle Potential dieser Technologie konnte erst kürzlich von der Firma Panasonic mit einer Rekorderffizienz von 25,6% auf industrie-relevanter Zellfläche demonstriert werden. In Deutschland wurde diese Technologie in den letzten Jahren insbesondere von der Firma Roth&Rau, größte Tochter der schweizerischen Meyer Burger Gruppe, und seit langem enger Kooperationspartner des Fraunhofer ISE, insbesondere im Bereich der Anlagen- aber auch Prozesstechnologie weiterentwickelt.

Allgemein wird erwartet, dass sich in den nächsten fünf Jahren die Photovoltaik-Produktion und das Angebot auf dem Endkundenmarkt in drei Technologien gliedern wird: Standard-Module auf Siliziumbasis, kristalline Premium-Module aus Halbleitermaterialien und Dünnschichtmodule (siehe Abbildung 1).

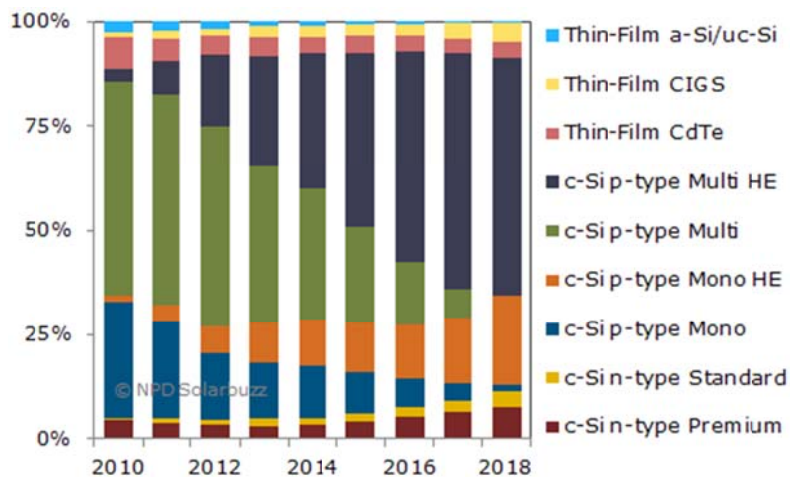


Abbildung 1: Entwicklung der unterschiedlichen PV Produktionsrouten [NPD Solarbuzz, Okt. 2014]

Der Marktanteil der Technologien mit hohem bis höchstem Effizienzpotential wird dabei signifikant zunehmen, als Beispiele für „Neueinsteiger“ innerhalb des Premium-c-Si-Segments, d.h. Zellwirkungsgraden über 21%, können SolarCitys vorgeschlagene Kapazitätserweiterung von Silevo und Pläne von First Solar, mit der Technologie von TetraSun in die Massenproduktion zu gehen, genannt werden. Der Markt für Premiumhersteller wächst nach Berechnungen der Marktforschungsfirma NPD Solarbuzz demnach nach 2015 um 200 Prozent und erreicht 2018 ein Volumen von 7,6 Gigawatt.

Solarzellenkonzepte mit deutlich höherem Wirkungsgradpotential konnten mit Ausnahme der Rückkontaktsolarzellentechnologie von Sunpower, bislang zumeist nur im Labormaßstab entwickelt und demonstriert werden. Ein vielversprechendes innovatives Solarzellenkonzept stellen sogenannte selektive Kontakte dar. Mit einer Solarzelle basierend auf einem solchen selektiven Heteroübergang (amorphes Silizium auf kristallinem Siliziumwafer) konnte die Firma Panasonic im April 2014 mit 25,6% einen Wirkungsgrad-Weltrekord erzielen. Die Übertragung solcher Prozesstechnologien in ein industrielles Produktionsumfeld stellt hohe Anforderungen an

- die Reinheit der Produktionsumgebung sowie
- die Prozesssicherheit und
- Prozessreproduzierbarkeit.

Im Bereich der institutionellen Forschung wurden solche neuartigen Konzepte zumeist in reinen Laborumgebungen mit Anlagen mit geringem Durchsatz und ohne unmittelbaren Massenfertigungsbezug verfolgt und entwickelt. Im Rahmen des Projektes PV Select sollte am Fraunhofer ISE die notwendige Infrastruktur geschaffen werden, um auf massenfertigungstauglichen Prozessanlagen und unter Einhaltung obig erwähnter Anforderungen an die Produktionsumgebung für die Umsetzung oben erwähnter hocheffizienter Solarzellentechnologien zu ermöglichen.

3 Planung und tatsächliche Durchführung des Forschungsvorhabens

3.1 Ursprüngliche Planung

Im Rahmen von PV-SELECT sollten innovative Anlagen- und Prozesstechnologien für höchsteffiziente Solarzellen in eine neuartige Laborumgebung integriert und diese in Bezug auf Ihre Produktionstauglichkeit evaluiert werden. Des Weiteren sollte eine Qualitätssicherungs- und Messmethodik für höchsteffiziente Solarzellen entwickelt werden. Die wissenschaftlichen Ziele des Forschungsvorhabens lagen daher insbesondere im Bereich der Charakterisierung und Meßtechnik, konkret sollten folgende Schwerpunkte gesetzt werden:

- Definition und Evaluierung der Reinheitsanforderungen der Produktionsumgebung bei der Herstellung höchsteffizienter Solarzellen, Identifikation kritischer Schnittstellen und Kontaminationsquellen innerhalb des Produktionsprozesses
- Aufbau der Messtechnik für bifaciale, busbarlose Solarzellen und Definition/ Standardisierung geeigneter Messbedingungen für solche Zellen (Einstrahlbedingungen etc.)
- Entwicklung von Messroutinen zur Charakterisierung und Qualifizierung ultradünner hochpassivierender Schichten in einer Entwicklungsumgebung, Ermittlung von Möglichkeiten zur in-situ Prozesskontrolle

Im Rahmen des Projektes sollten weiterhin die technischen Voraussetzungen für die F&E-Arbeiten auf den verschiedenen wissenschaftlichen Themengebieten des Fraunhofer ISE substanziell verbessert werden und somit laufende und geplante Forschungsvorhaben ermöglicht bzw. unterstützt werden. Im Rahmen darauf aufbauender Projekte sollten zukünftig kristalline Solarzellen mit Wirkungsgraden industrienah hergestellt werden, die deutlich über das heutige Potential von ca. 22% für kristalline Silicium-Solarzellen mit herkömmlicher Kontaktphysik hinausgehen.

In Bezug auf die Anlagen- und Prozesstechnologie sollte der Schwerpunkt der Untersuchungen im Bereich des Solarzellenfront-Ends, d.h. bei nasschemischen sowie Vakuumprozessen insbesondere zur Abscheidung dünner dielektrischer und amorpher Siliziumschichten liegen (AP 1). Im Rahmen von PV SELECT sollten die zur Herstellung von Solarzellen mit selektiven Kontakten notwendigen Anlagen- und Prozesstechnologien hinsichtlich obiger Anforderungen evaluiert und entsprechend notwendige Anpassungen bzw. Modifikationen der Laborumgebung entwickelt werden (AP 2).

Die verwendete Anlagen- und Prozesstechnologie sowie die neuartigen Solarzellenkonzepte erfordern zudem die Anwendung spezifischer Charakterisierungswerkzeuge zur Qualitätskontrolle und Überprüfung der Prozessreproduzierbarkeit (AP 3). Zum Erreichen höchster Wirkungsgrade müssen notwendige Prozessfenster bestimmt und daraus resultierend Auflösungsgrenzen bzw. Genauigkeitsanforderungen für das verwendete Prozesscharakterisierungsequipment ermittelt werden (AP 4).

Nach ursprünglich eingereicherter Planung gliederte sich das Projekt daher über einen Zeitraum von 15 Monaten in folgende Arbeitspakete:

AP1 – Definition der Produktionsumgebung

Anforderungen bzgl. Umgebungsreinheit und Medienqualität der unterschiedlichen, zu integrierenden vorhandenen und geplanten Anlagen- und Prozesstechnologie werden in einer gemeinsamen Factory Utility Matrix (FUM) gesammelt und daraus gegebenenfalls Lastenhefte zur Definition der notwendigen Laborerweiterungen erstellt (Meilenstein 1). Im

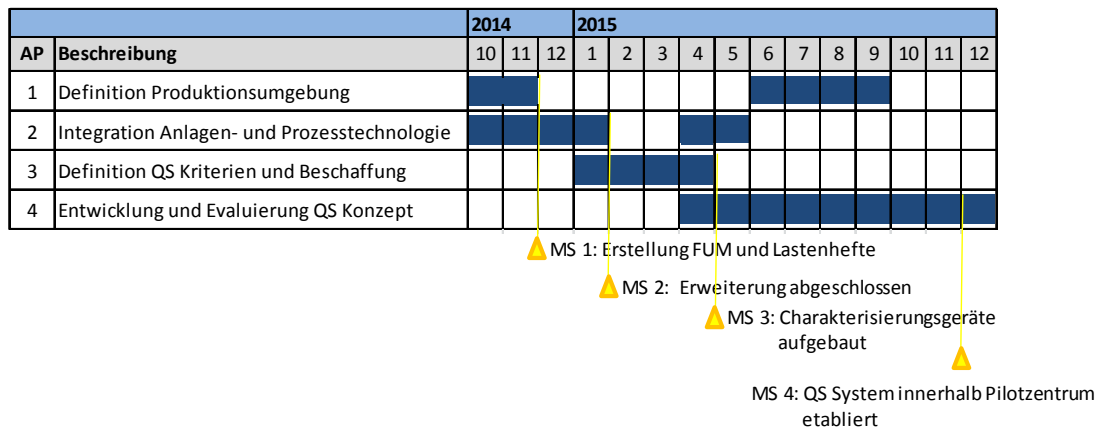
weiteren Projektverlauf sollen mittels der in AP 3 beschafften und den in AP 4 entwickelten Qualitätssicherungsroutrinen die Prozessanforderungen in Bezug auf Prozessreinheit und –robustheit überprüft und schlussendlich definiert werden.

AP2 – Erweiterung der Laborumgebung, Integration der Anlagen- und Prozesstechnologie
Die unter AP1 definierten Erweiterungen zur Evaluierung der notwendigen Prozessumgebung werden innerhalb eines Zeitraums von 4 Monaten durchgeführt und vollständig abgenommen, so dass zum Ende des Arbeitspaketes (Ende Januar 2015) die unter AP 1 genannten Untersuchungen zu Prozessreinheit und –robustheit durchgeführt werden können (Meilenstein 2). Bereits am ISE vorhandene bzw. über die in Tabelle 2 gelisteten Förderprojekte neu beschaffte Großgeräte (großflächige Beschichtungsanlagen, Eingangstester, nasschemische Anlagen) werden innerhalb AP 2 in die Laborumgebung eingebunden. Zur Evaluierung der notwendigen Produktionsumgebung werden dabei einzelne Anlagen mit zusätzlichen, teilweise alternativen Medienversorgungssystemen bzw. mit für die industrielle Fertigung vorteilhafteren und verbrauchsärmeren Erzeugungssystemen (Plasmaquellen) ausgestattet. Mit diesen Erweiterungen soll das ISE in die Lage versetzt werden, die in AP 1 anvisierte Definition einer produktionstauglichen Prozessumgebung und somit den Übergang von einer eher labor-basierten hinzu einer auch industriell einsetzbaren Technologie zu ermöglichen und demonstrieren.

AP3 – Definition QS Kriterienkatalog und Beschaffung Charakterisierungsgeräte
Basierend auf den spezifischen Eigenschaften zukünftig zu charakterisierender teil- und fertigprozessierter Wafer und höchsteffizienter Solarzellen wird ein Anforderungskatalog an die zu beschaffenden Messgeräte erstellt und eine erste Auswahl möglicher, geeigneter Lieferanten getroffen. Anhand von Messsamplings an spezifisch hergestellten Charakterisierungswafern sollen die Messgeräte bewertet und damit eine qualifizierte Entscheidung zur Beschaffung getroffen werden. Zum Ende von AP 3 werden alle innerhalb von PV SELECT beschafften Messgeräte beschafft, aufgebaut und abgenommen sein (Meilenstein 3). Zur Abnahme der Geräte können wieder zuvor zur Vorauswahl erstellten spezifischen Charakterisierungswafer genutzt werden.

AP4 – Entwicklung und Evaluierung Qualitätssicherungskonzept für höchsteffiziente Solarzellen
Mittels der Charakterisierungsgeräte soll eine umfassende Qualitätssicherungs- und Messmethodik für das Pilotzentrum entwickelt worden sein (Meilenstein 4). Hierzu sind neben der Erarbeitung von Messmethodik und -protokollvorlagen, die Durchführung von Muster-Messungen sowie der Bezug und die Herstellung geeigneter Messproben vorgesehen. Als Ergebnis soll eine Qualitätssicherungs- und Messmethodik zur Verfügung stehen, die u.a. erlaubt die Solarzellenparameter in-line, d.h. mit Messzeiten kleiner 1 Sekunde zu bestimmen bzw. im Bereich der in-situ Oberflächen- und Badanalyse die Detektion von Verunreinigungen unterhalb 10^{10} cm² bzw. ng/l. Im Bereich der Schichtanalyse liegt der Schwerpunkt in reproduzierbaren, möglichst auch inline-fähigen Messmethoden zur Schichtzusammensetzung sowie zur Bestimmung der Schichtdicke. Letzteres stellt für die hier betrachteten Schichtsysteme mit Schichtdicken von jeweils nur wenigen Nanometern auf texturierten Siliziumsubstraten die größte Herausforderung dar.

Tabelle 1: Zeitliche Abfolge der Arbeitspakete nach ursprünglichem Projektantrag bei einer Gesamtprojektlaufzeit von insgesamt 15 Monaten, Start zum 01.10.2014



Kostenübersicht laut Antrag vom 21.11.2014:

	Jahr				Gesamtkosten	% der Gesamtkosten
	2014	2015	2016	2017		
Personalkosten	94.266	404.334			498.600	16,7%
Reisekosten	1.000	2.000			3.000	0,1%
Sachkosten / Vergabe von Aufträgen	810.000	430.000			1.240.000	41,6%
Gegenst./Invest.	620.873	620.873			1.241.746	41,6%
Übrige Kosten	0	0			0	0%
Gesamtkosten	1.526.139	1.457.207			2.983.345	100 %

3.2 Tatsächliche Bewilligung / revidierte Planung

In Abstimmung mit dem Projektträger musste aufgrund von Budgetbeschränkungen im Haushaltsjahr 2015 die ursprüngliche Planung angepasst und das Projekt entsprechend verkleinert werden. Trotz Halbierung der Mittel sollten die technischen und wissenschaftlichen Ziele des Vorhabens mit den verbleibenden beantragten Investitions-, Sach- und Personalmitteln im ersten Schritt erreicht werden und das Projekt selbstständig durchführbar sein. Eine Fortführung des Projektes (und somit Bearbeitung der zunächst gestrichenen Arbeitspakete) sollten in einem separaten Aufstockungsantrag 2015 separat und neu beantragt werden. Leider wurde dieser Aufstockungsantrag in 2015 schlussendlich abgelehnt.

Gemäß der revidierten Planung sollten aus dem ursprünglichen Arbeitsumfang im Wesentlichen folgende Arbeiten durchgeführt bzw. beauftragt werden (ebenfalls sind die Arbeiten die aufgrund der Kürzung nicht durchgeführt werden konnten aufgeführt):

AP1 – Definition der Produktionsumgebung

Anforderungen bzgl. Umgebungsreinheit und Medienqualität der unterschiedlichen, zu integrierenden vorhandenen und geplanten Anlagen- und Prozesstechnologie werden in

einer gemeinsamen Factory Utility Matrix (FUM) gesammelt und daraus gegebenenfalls Lastenhefte zur Definition der notwendigen Laborerweiterungen erstellt (Meilenstein 1).

Nicht durchgeführt wurde:

Im weiteren Projektverlauf sollen mittels der in AP 3 beschafften und den in AP 4 entwickelten Qualitätssicherungsrouitinen die Prozessanforderungen in Bezug auf Prozessreinheit und –robustheit überprüft und schlussendlich definiert werden.

AP2 – Erweiterung der Laborumgebung, Integration der Anlagen- und Prozesstechnologie
 Die unter AP1 definierten Erweiterungen zur Evaluierung der notwendigen Prozessumgebung werden innerhalb eines Zeitraums von 4 Monaten durchgeführt und vollständig abgenommen. Bereits am ISE vorhandene bzw. über Förderprojekte neu beschaffte Großgeräte (großflächige Beschichtungsanlagen, nasschemische Anlagen) werden innerhalb AP 2 in die Laborumgebung eingebunden. Zur Evaluierung der notwendigen Produktionsumgebung werden dabei einzelne Anlagen mit zusätzlichen, teilweise alternativen Medienversorgungssystemen bzw. mit für die industrielle Fertigung vorteilhafteren und verbrauchsärmeren Erzeugungssystemen (Plasmaquellen) ausgestattet. Mit diesen Erweiterungen soll das ISE in die Lage versetzt werden, die in AP 1 anvisierte Definition einer produktionstauglichen Prozessumgebung und somit den Übergang von einer eher labor-basierten hinzu einer auch industriell einsetzbaren Technologie zu ermöglichen und demonstrieren.

Nicht durchgeführt wurde:

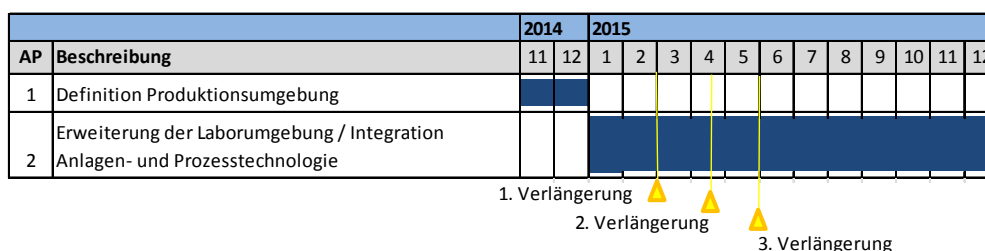
Untersuchungen zu Prozessreinheit und –robustheit (Meilenstein 2).

Die ursprünglich geplanten Arbeitspakete 3 und 4 mussten aufgrund der reduzierten Laufzeit sowie der Mittelkürzungen leider entfallen und waren Bestandteil eines Anfang 2015 gestellten und später aber leider abgelehnten Aufstockungsantrages.

Der zunächst gemäß Bewilligungsschreiben vom 08.12.14 festgelegte Bearbeitungszeitraum musste aufgrund unten erläuteter Verzögerung insgesamt dreimal kostenneutral bis schlussendlich 31.12.2015 verlängert werden.

Insbesondere die Auftragsvergabe für den Laborausbau an die Firma Micronas erforderte mehr Zeit als ursprünglich geplant. Wesentlicher Verzögerungsgrund war hier die Prüfung aller vergabe-rechtlicher Implikationen für eine EU konforme Beauftragung. Zudem bedingte der Aufbau der technischen Infrastruktur für die neue Laborumgebung die Bestellung einer Vielzahl von Einzelkomponenten (Gasschränke, Kühlwasseraggregate, etc.) deren Lieferzeiten in Verbindung mit einem nachfolgenden vollständigen Aufbau und Abnahme den jeweils anvisierten Bewilligungszeitraum zu überschreiten drohte. Eine Übersicht des schlussendlich realisierten zeitlichen Projektverlaufs ist Tabelle 2 zu entnehmen.

Tabelle 2: Realer Projektverlauf mit dreimaliger Verlängerung der Gesamtprojektlaufzeit und Start zum 18.11.2014.



Im Bereich der Investitionen sollten bereits ausgewählte Geräte wie etwa das Spektralellipsometer, ein Prozessrefraktometer sowie eine zusätzliche RF Quelle bereits in 2014 beschafft werden. Im Laufe des Projektes wurde diese Investitionsplanung nochmals

angepasst und anstelle des Spektralellipsometers sowie des Prozessrefraktometers eine Messtechnikerweiterung eines bereits vorhandenen Strom-Spannungskennlinienmessplatzes beschafft, mit deren Hilfe man zukünftig in die Lage versetzt wird, auch beidseitig sammelnde, bifaciale Solarzellenkonzepte zu vermessen.

Kostenübersicht gemäß Bewilligungsschreiben vom 08.12.2014:

		2014
Personal+Overhead		97.442 €
Verbrauchsmaterial		10.000 €
Reise		1.200 €
Sachkosten UA Micronas (gemäß vorliegendem Richtangebot)		
Reinraumdecke		38.600 €
Reinraumwände		82.100 €
PCW		98.300 €
Elektro		125.000 €
Grundgase		72.400 €
Flaschengase		294.000 €
Prozessabluft		36.800 €
DI Wasser		41.300 €
Sicherheit		82.700 €
Statik		28.400 €
MAiA		112.200 €
Invest Geräte		
Ellipsometer		151.835 €
Refraktometer		13.855 €
RF Plasmaquelle MAiA		149.500 €
Summe		1.435.632 €

4 Ergebnisse

Innerhalb des neuen Pilotzentrums für höchsteffiziente Solarzellen sollen für die industrielle Produktion relevante Technologien auf Pilotlevel weiterentwickelt und für einen Transfer in eine skalierte industrielle Produktion vorbereitet werden. Insbesondere die Herstellung von Solarzellen mit selektiven Kontakten u.a. Heterosolarzellen, die Zellwirkungsgrade oberhalb von 25% für Silicium erlauben, ist bislang soweit bekannt, in keiner Laboreinrichtung in Deutschland im Pilotmaßstab möglich.

In Kooperation mit der Universität Freiburg bietet die neue Laborumgebung zudem ein interessantes und industrienahes Arbeitsumfeld für Doktoranden sowie Studenten in Bachelor und Masterstudiengängen (Ingenieurwissenschaften, Chemie, Physik, Informatik).

Die neuen Entwicklungsmöglichkeiten stellen einen wichtigen Baustein zum Erhalt des „High-Tech“ Standortes Baden-Württemberg dar, insbesondere im Bereich der hier besonders stark vertretenen PV Produktionsmittelhersteller (die Branche insgesamt beschäftigte im Jahr 2014 ca. 10.000 Menschen in Baden-Württemberg, was die Bedeutung der Photovoltaik-Industrie hervorhebt).

Mit der Ausrichtung in Richtung der Entwicklung von höchsteffizienten Solarzellen auf Basis von passivierten, selektiven Kontakten kann das ISE zukünftig ein innovatives Entwicklungsangebot für in BW ansässige Kooperationspartner des ISE wie Centrotherm, Schmid, Manz, RENA, ASYS sowie weiteren Firmen insbesondere im Bereich der Produktionsanlagenhersteller anbieten, die selbst nicht über entsprechende Möglichkeiten verfügen solche vielversprechenden Technologieansätze zu verfolgen.

Im Einzelnen wurden innerhalb des Projektes PV Select zum Aufbau der Laborumgebung folgende Gewerke und Installationen durchgeführt:

- Aufbau Reinraum (Trockenbau, Filter-Fan-Units, etc.)
- Installation Prozesskühlwasserversorgung
- Elektroarbeiten zum Anschluss der vorhandenen Grossanlagen sowie Kapazitätsaufbau für weitere anlagentechnische Erweiterungen in der Zukunft
- Anbindung Grundgasversorgung an vorhandene Infrastruktur am Standort Micronas in Freiburg (Stickstoff, Sauerstoff, Argon, Wasserstoff)
- Installation und Anschluss Flaschengasversorgung für Spezialgase (Silan, Phosphin, Diboran, Lachgas, Ammoniak,...)
- Aufbau entsprechender Sicherheitseinrichtungen für den Betrieb mit Gefahrstoffen
- Installation Prozessabluftentsorgung und –aufbereitung

4.1 Aufbau Reinraum, Zu- und Abluftsystem

Die neu geschaffenen Reinraumflächen mussten unter Berücksichtigung der bei der Firma Micronas bereits bestehenden Gebäudeinfrastruktur geplant und aufgebaut werden. Die für einen Reinraum erforderliche gezielte Zu- und Abluftsteuerung wurde dabei gemäß Abbildung 2 realisiert. In die vorhandene Halle wurde ein in sich geschlossener, separater Raum integriert. Die entsprechend gereinigte Zuluft wird dabei über entsprechende Flowboxen, die über die gesamte Reinraumfläche an der Decke verteilt angeordnet sind, in das Labor geleitet. Durch entsprechende Absaugungsschlitze in Bodennähe der Reinraumwände kann somit ein nahezu laminarer Luftstrom von oben nach unten innerhalb des Labors erzeugt werden. Mit einer solchen gezielten Luftsteuerung konnte somit eine Reinraumklasse 1000 (nach ISO) innerhalb der gesamten Reinraumfläche garantiert werden.

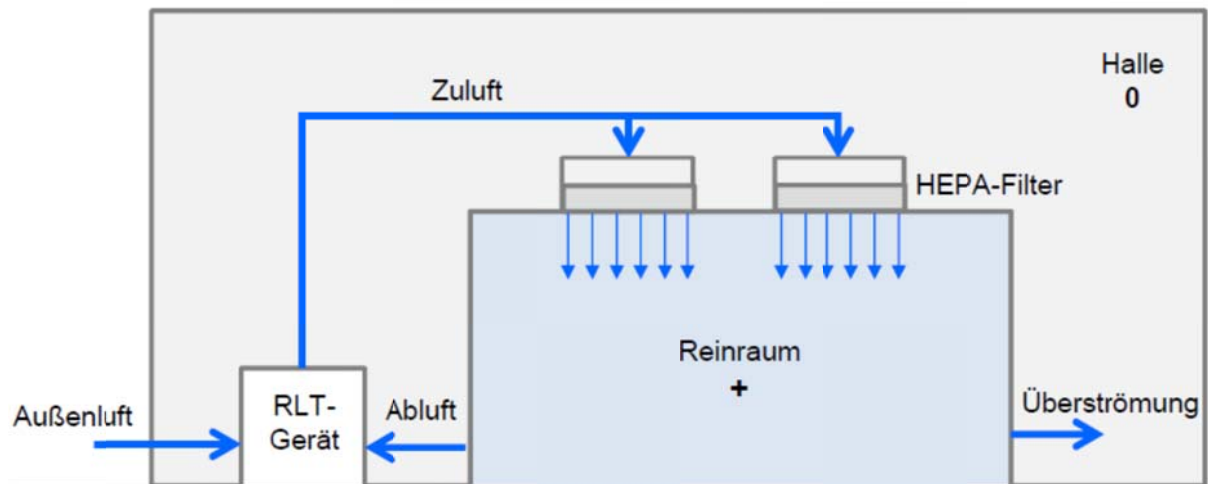


Abbildung 2: Zu- und Ablufführung zur Gewährleistung eines nahezu laminaren Luftstromes innerhalb des Labors. Über ein Raumlufttemperiergerät kann zudem sowohl Temperatur als auch die Feuchte gezielt eingestellt und kontrolliert werden.

Um des Weiteren die Partikelerzeugung innerhalb des Reinraums weitestgehend zu unterdrücken, wurden die bereits vorhandenen (und auch zukünftigen) Großgeräte so angeordnet, dass die jeweiligen Wartungsbereiche der Anlagen (die für gewöhnlich z.B. im Falle einer Kammeröffnung und -reinigung bei einer PECVD Anlage) außerhalb des eigentlichen Reinraums angeordnet wurden (siehe Abbildung 3, graue Flächen). Zusätzlich wurden oben erwähnte Flowboxen insbesondere in Ein- und Ausgabebereichen der Anlagen in höherer Dichte an der Decke installiert um nochmals gerade in diesen sensiblen Prozessbereichen eine höhere Reinheit zu gewährleisten.

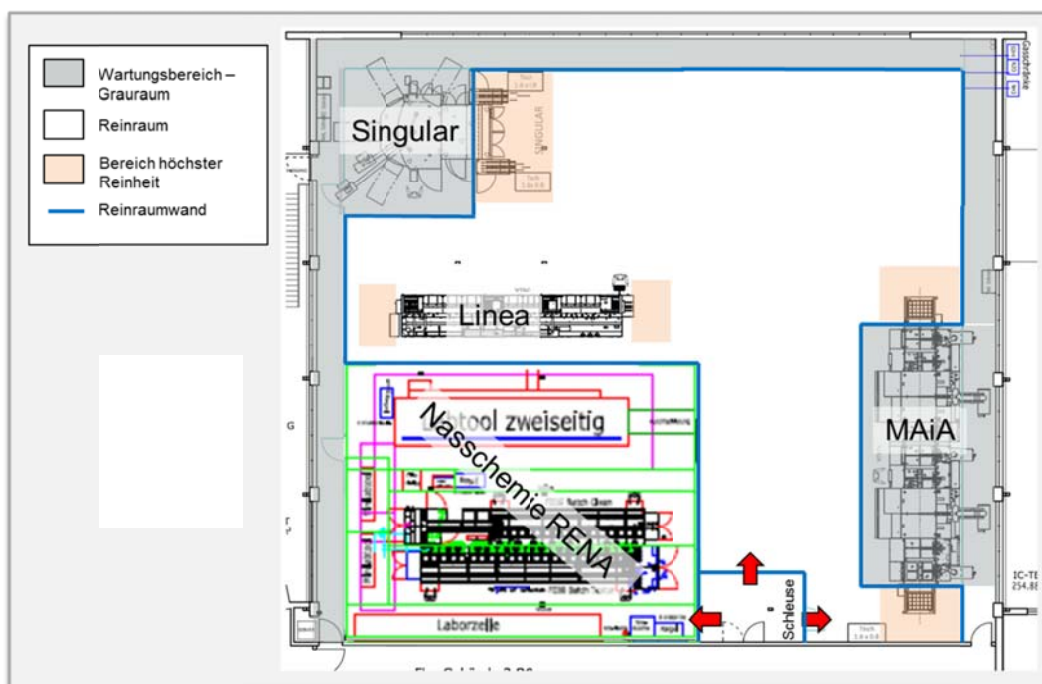


Abbildung 3: Aufteilung der Laborumgebung in Rein- und Grauraumbereiche. An den jeweiligen Anlagen-Ein- und Ausgängen wurden Bereiche besonders hoher Reinheit geschaffen.

Neben dem eigentlichen Reinraum wurde des Weiteren eine zum Gesamtlabor-konzept passende Personen- und Materialschleuse in das Labor integriert, die den üblichen Standards in der Reinraumtechnologie entspricht (Vollschutzanzüge, Reinraumschuhe, Übertritt, etc.).



Abbildung 4: Blick auf die Personen- und Materialschleuse über die der Reinraumbereich betreten und verlassen werden kann.

4.2 Laborchemieversorgung (Gase, Nasschemie)

Innerhalb des Labors wurden (und sollen auch zukünftig) insbesondere nasschemische Anlagen zum Ätzen sowie Anlagen, die mittels Abscheidungen aus der Gasphase (Chemical Vapour Deposition – CVD) dünne Schichten erzeugen können, installiert werden. Anhand der Spezifikationen der bereits für das Labor vorgesehenen Anlagen mussten entsprechende Versorgungseinheiten (Gasschränke, Chemieversorgungs-kabinette) installiert werden:

Spezialgase:

- Silan (SiH_4)
- Lachgas (N_2O)
- Ammoniak (NH_3)
- Stickstofftrifluorid (NF_3)
- Phosphin ($\text{PH}_3\text{:H}_2$)
- Diboran ($\text{B}_2\text{H}_2\text{:H}_2$)
- Methan (CH_4)

Für bereits am Standort durch die Firma Micronas bereitgestellte Standardgase wie Argon, Stickstoff, Sauerstoff und Wasserstoff wurden entsprechende Verbindungen zur Hausversorgung hergestellt. Für die oben aufgeführten Spezialgase wurde außerhalb des Labors eine eigene Gasfarm mit entsprechenden Sicherheitsschränken je nach Gefahrenklasse des jeweiligen Gases aufgebaut (siehe Abbildung 5). Innerhalb des Labors wurden für jedes Gas entsprechende Gasvertei-boxen installiert, die über Massenflußregler schlussendlich das jeweilige Gas zu den unterschiedlichen, angeschlossenen Anlagen verteilt.

In Abbildung 6, Abbildung 7 und Abbildung 8 sind die jeweiligen Gasverteilschemata für die jeweiligen Spezialgase im Detail dargestellt.

Innerhalb des Labors selbst wurden zudem zwei Gasversorgungseinheiten für Flüssiggase installiert, zum einen für

- Tri-Methyl-Aluminium (TMA) sowie für
- Di-Ethyl-Zink (DEZ)

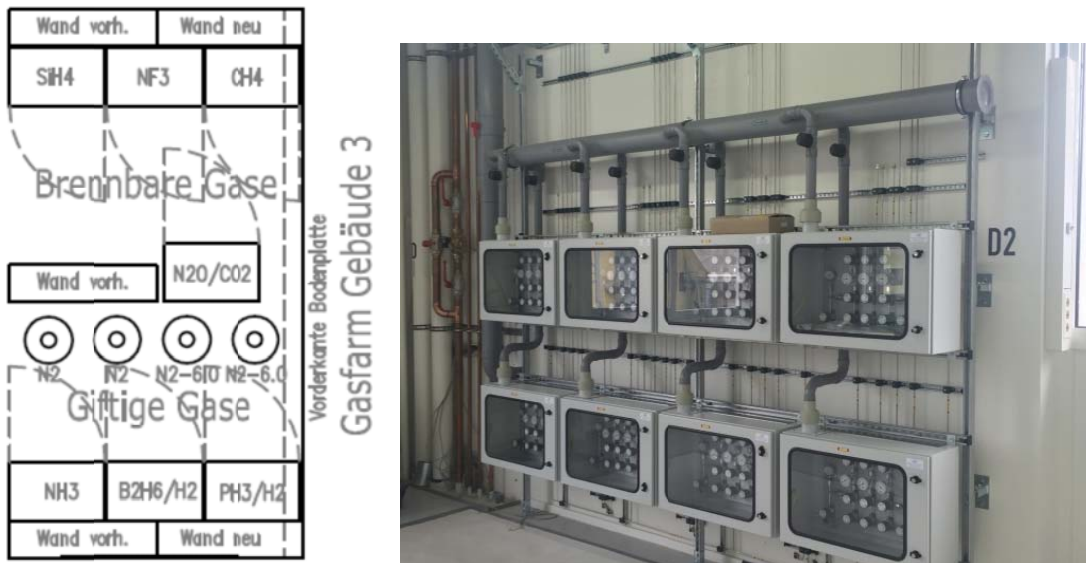


Abbildung 5: Installierte Gasfarm ausserhalb des Gebäudes (links) und Gasverteilsystem (Spezial- und Hausgase, rechts)

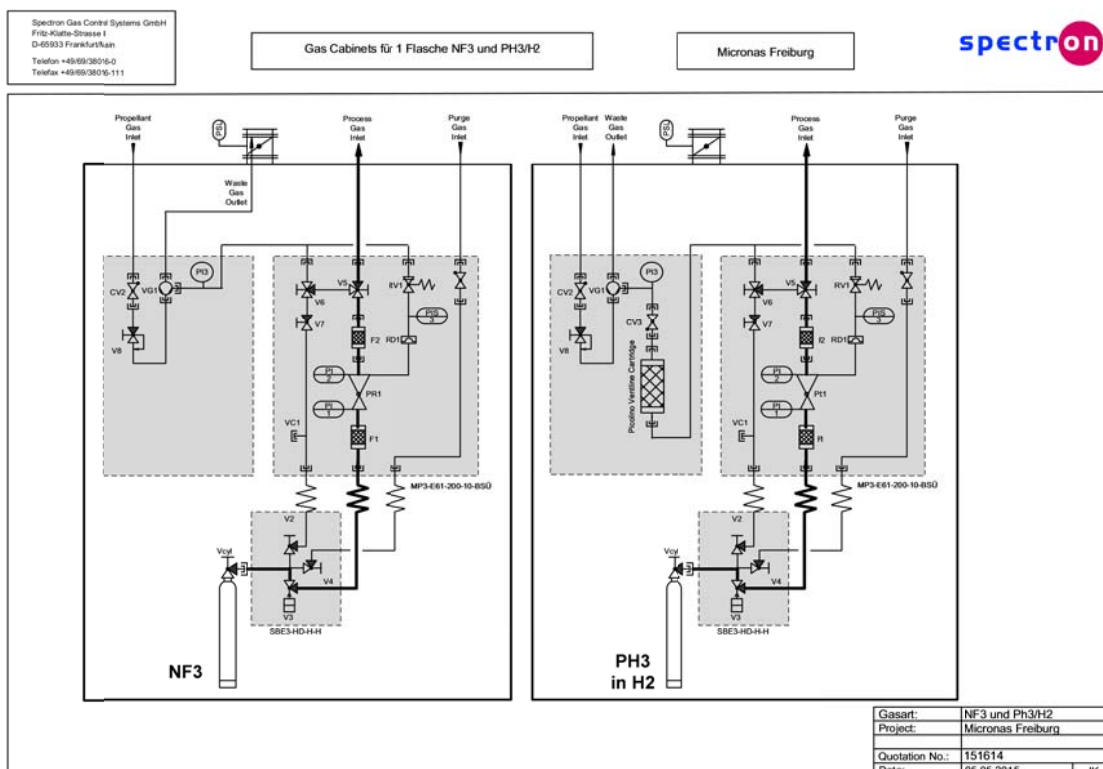


Abbildung 6: Gasverteilschema für die Gase Stickstofftrifluorid und Phosphin.

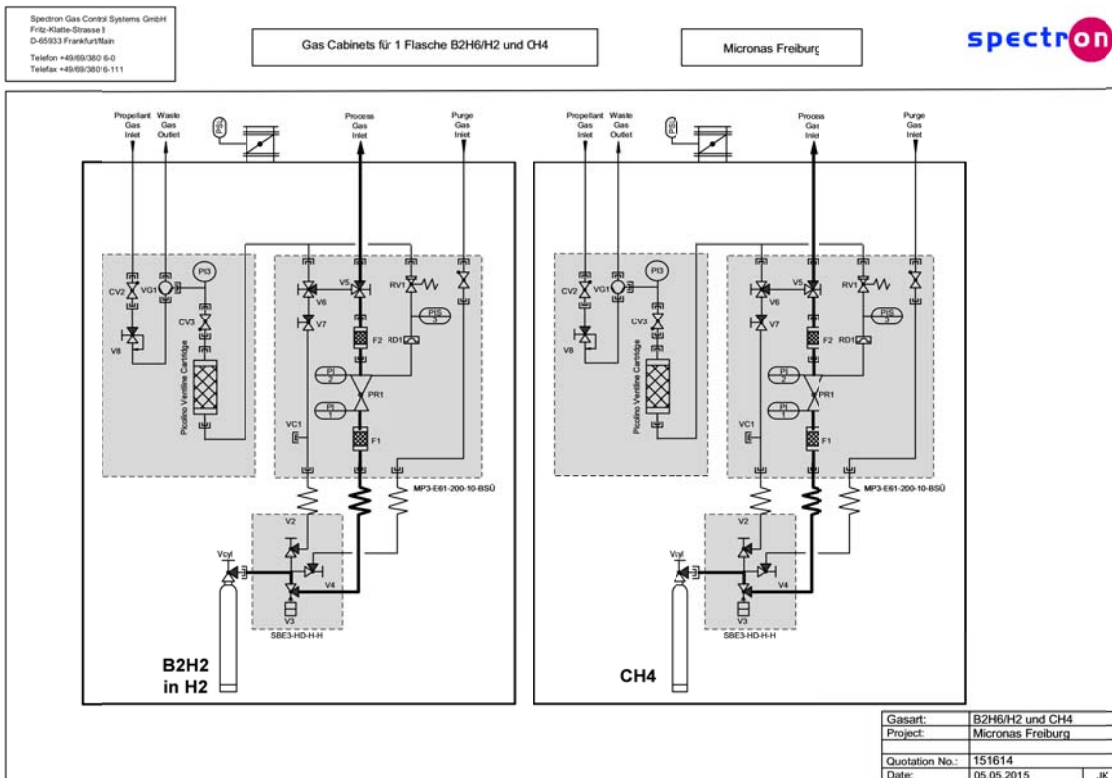


Abbildung 7: Gasverteilschema für die Gase Diboran und Methan

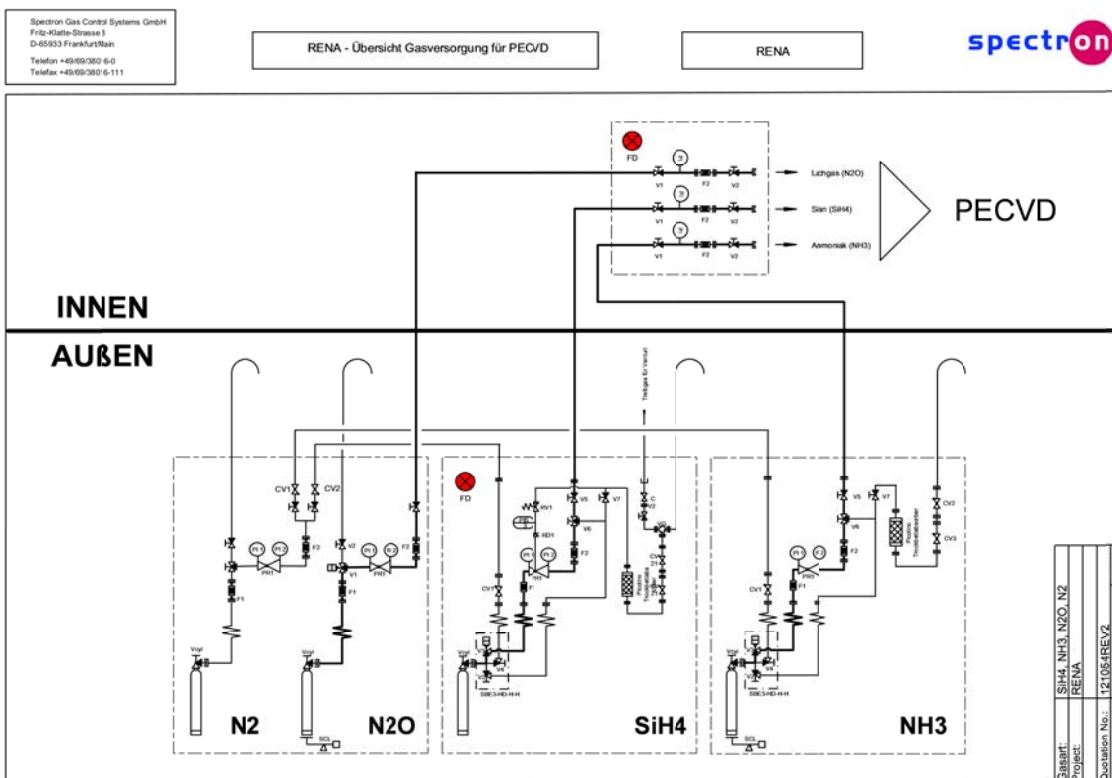


Abbildung 8: Gasverteilschema für die Gase Lachgas, Silan und Ammoniak sowie Spülnstickstoff.

Im Bereich der nasschemischen Medien mussten lediglich Anschlüsse an die bereits vorhandenen Chemieverorgungskabinette der Firma Micronas gelegt werden. Anhand der Anlagenspezifikationen wurden Medienversorgungsleitungen für

- Kalilauge (KOH)
- Salpetersäure (HNO₃)
- Fluorwasserstoffsäure (HF)
- Ammoniumhydroxid (NH₄OH) und
- Wasserstoffperoxid (H₂O₂)

vorgesehen.

4.3 Laborsicherheitskonzept

Das Arbeiten mit einer solchen Vielzahl von Gefahrstoffen erforderte eine sorgfältige Planung des Sicherheitskonzeptes für das gesamte Labor. Abbildung 9 gibt eine Übersicht aller im Labor installierten Sensor- und Meldesysteme (Rauch- und Gasmelder, Gas-, Leckage und Strömungssensoren, sowie die vorgesehenen Notfalleinrichtungen (Notduschen, Notfallkoffer, Atemschutzmasken, etc.).

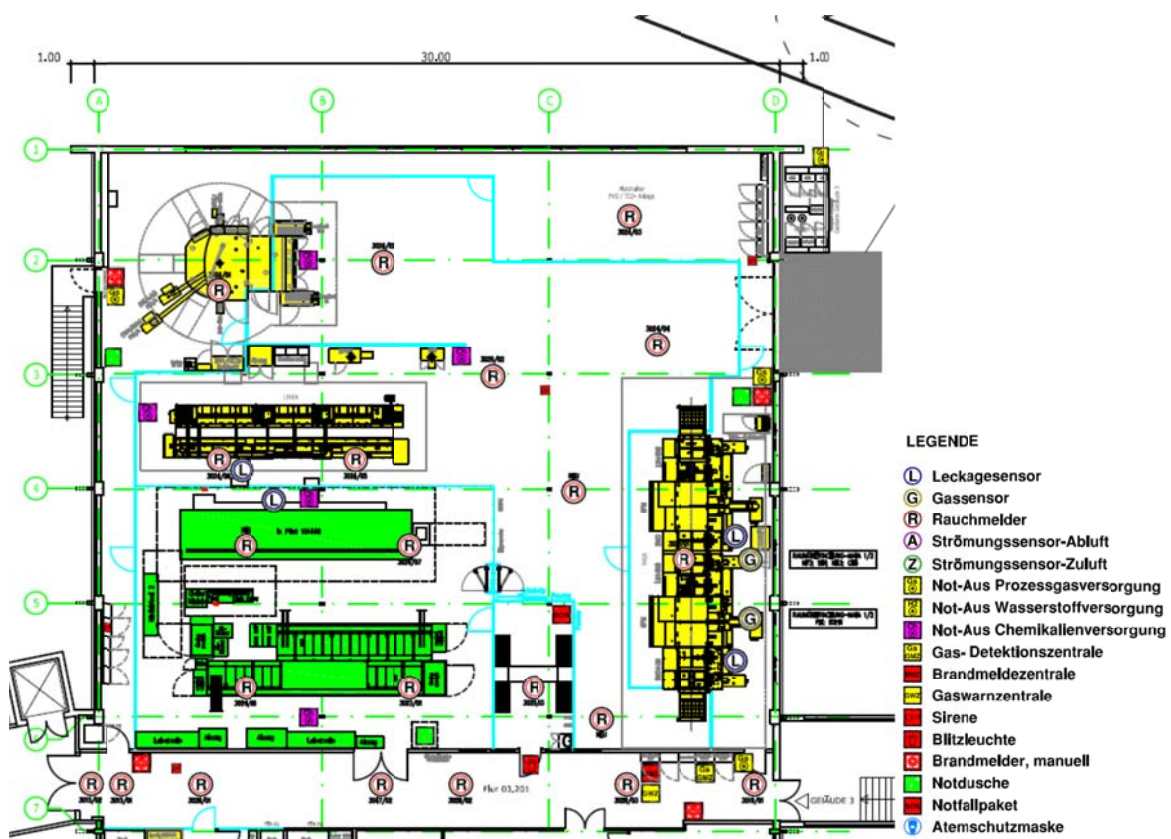


Abbildung 9: Übersicht der im Laborbereich installierten Sicherheitstechnik.

Des Weiteren mussten für den Betrieb insbesondere der Beschichtungsanlagen aufgrund der Gefährlichkeit und Giftigkeit der dort eingesetzten Gase (Diboran, Phosphin, etc.) entsprechend angepasste Prozess- und Arbeitsroutinen zur Wartung und Reinigung der Anlagen entwickelt werden. Vor Öffnung der einzelnen Prozesskammern wurden daher

gezielte Spül- und Rückätzroutinen an den Anlagen entwickelt die gewährleisten sollen, dass nach Öffnung der Anlagen keine, über den kritischen Grenzwerten liegenden Gaskonzentrationen austreten können.

4.4 Integration Prozessanlagen und Erweiterungen (zusätzliche Investitionen)

Innerhalb der Projektlaufzeit wurden bereits zwei große Prozessanlagen innerhalb des Labors aufgestellt und an die Infrastruktur angeschlossen. Im Folgenden sollen die beiden Anlagen sowie die durch die Infrastruktur geschaffenen Prozessmöglichkeiten vorgestellt werden. Die Anlagen selbst wurden über begleitende, BMWi geförderte Verbundprojekte beschafft.

Multikammer-PECVD Beschichtungsanlage (MAiA):

Bei dieser Anlage handelt es sich um eine Anlage zur plasmagestützten Gasphasenabscheidung (engl. Plasma-enhanced physical vapour deposition – PECVD). Die Anlage verfügt über zwei separate, über eine Transferkammer voneinander getrennte Prozesskammern, womit unterschiedliche Beschichtungsprozesse ohne Unterbrechung des Vakuums hintereinander durchgeführt werden können. Innerhalb der Kammern stehen unterschiedliche Möglichkeiten zur Plasmaanregung zur Verfügung (Mikrowellenanregung bei 2.45 GHz, rf-Anregung bei 13,56 MHz). Die Wesentlichen, zunächst prioritär an dieser Anlage verfolgten Prozessansätze sind die Folgenden:

- Rückseitenpassivierung von rückseitenpassivierten Solarzellen (PERC) bestehend aus einem Schichtstapel aus Aluminiumoxid (AlO_x) und Siliziumnitrid (SiN_x). Die verwendeten Grund- und Spezialgase sind hier TMA, Argon, Sauerstoff, Silan und Ammoniak.
- Abscheidung von dotierten Siliziumnitrid/Siliziumoxid Schichtstapeln als Dotierstoffquelle zur Bildung eines vorderseitigen Emitters. Hierzu werden $\text{SiN}_x:\text{P}$ bzw. $\text{SiO}_x:\text{P}$ Schichten unter Verwendung von Silan, Ammoniak bzw. Lachgas und Zugabe von Phosphin verwendet.
- Abscheidung eines Schichtstapels aus AlO_x und Bor-dotiertem amorphen Silizium welcher ebenfalls als Dotierstoffquelle zur Bildung eines BackSurfaceFields bei p-typ PERT Solarzellen bzw. als rückseitiger Emitter bei n-typ PERT Solarzellen verwendet werden kann. Als Gasquellen kommen hier neben Silan insbesondere auch Diboran sowie TMA, Argon und Sauerstoff zum Einsatz.
- Schichtstapel aus intrinsischem amorphen Silizium und entweder Bor- oder Phosphor dotiertem amorphen Silizium für Heterojunction-Solarzellen



Abbildung 10: Integration einer großflächiger PECVD Beschichtungsanlage (MAiA).

In der bestehenden Konfiguration der Plasmaanlage existierte lediglich eine RF-Plasmaquelle für die Erzeugung der dotierten Schichten. Die Nachrüstung mit einer weiteren Quelle war daher aus verschiedenen Gründen wünschenswert. Wird lediglich eine RF-Plasmaquelle für die Herstellung von dotierten Schichten genutzt, muss die Plasmaquelle vor der Abscheidung des zweiten, anders dotierten Schichtstapels stets rückgeätzt und konditioniert werden. Dies ist sehr zeitaufwändig und birgt ein erhöhtes Risiko von Querkontaminationen auf, welche für die gewünschten elektrischen Eigenschaften der erzeugten Schichten sehr kritisch sind. Ein Verzicht auf diese Konditionierung zwischen den unterschiedlichen Dotierprozessen ist zudem zeitsparend und senkt das bestehende Risiko von Querkontaminationen deutlich, da die verschiedenen Dotierprozesse räumlich voneinander getrennt stattfinden können. Außerdem konnte aufgrund des entfallenden Rückätzprozesses eine erhöhte Lagerzeit vor der Abscheidung des zweiten Schichtstapels vermieden werden, was den hohen Ansprüchen bezüglich der Oberflächenreinheit zuträglich ist. Durch das Hinzufügen der weiteren RF-Plasmaquelle konnten folglich Verlässlichkeit und Durchsatz der Plasmaanlage deutlich erhöht werden, was dem Ziel des Einsatzes der Plasmaanlage, den wichtigen Schritt zwischen Forschung und Entwicklung zur Fertigung im industriellen Maßstab darzustellen, Rechnung trägt.

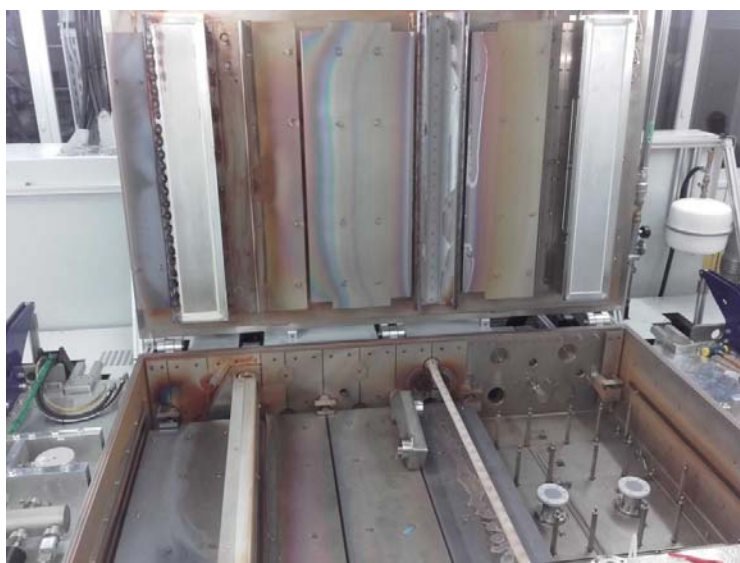


Abbildung 11: Zusätzlich über PV SELECT beschaffte rf-Plasmaquelle für die Multikammer-PECVD Beschichtungsanlage.

Inline Nasschemieanlage (LINEA):

Bei dieser nasschemischen Prozessanlage handelt es sich um eine Durchlaufanlage zum Ätzen von Siliziumwafern. Innerhalb der Anlage stehen Prozessbecken zur einseitigen Bearbeitung in einer wässrigen Ätzmischung aus Fluss- und Salpetersäure sowie zur beidseitigen Tauchätzung in wässriger Kalilauge sowie verdünnter Fluss- und Salzsäure zur Verfügung. Die Anlage selbst wurde bislang am Fraunhofer ISE in einem anderen Labor zur einseitigen Entfernung des rückseitigen parasitären Emitters (sogenannte Kantenisolation) für Standard- als auch rückseitenpassivierte Solarzellen (sog. PERC Solarzellen) eingesetzt. Mit dem Umzug in das neue Labor können die Entwicklungsaufgaben an dieser Anlage zukünftig auf den Bereich der Waferreinigung im Durchlaufverfahren für hocheffiziente Solarzellenkonzepte wie z.B. der Heterojunction-Solarzellentechnologie konzentriert werden. Zu diesem Zweck wurden im Rahmen von parallel laufenden bundes-geförderten Projekten bereits Erweiterungen an der Anlage vorgenommen, wie beispielsweise die Integration eines Ozongenerators oder aber auch ein Aufbau zur Integration einer UV-Lampeneinheit.

Die wesentlichen Entwicklungsschwerpunkte an dieser Anlage liegen in der

- Entwicklung von kosteneffizienten Reinigungsprozessen im Durchlaufverfahren mit möglichst geringer Oberflächenberührung
- Entwicklung von Prozessen zur Abscheidung dünnster Siliziumdioxidschichten (sog. Tunneloxide) für passivierte Kontakte. Hierbei können die Oxide sowohl nass- als auch trockenchemisch (UV Lampe) erzeugt werden.

Zur Überwachung der Reinigungseffizienz der Nassprozesse selbst sowie zur Beurteilung der resultierenden Reinheit der Siliziumoberflächen stehen in unmittelbarer Nähe zur Anlage mit der optischen Emissionsspektroskopie sowie der Atom-Absorptionsspektroskopie zwei geeignete Analyse-Verfahren zur Verfügung.



Abbildung 12: Integration einer Inline-Nasschemieanlage sowie entsprechender Spurenanalytik-Messtechnik (rechte Bildhälfte).

IV Messtechnikerweiterung für bifaciale, hocheffiziente Solarzellen:

Die über PV SELECT beschafften Komponenten als Erweiterung eines bestehenden automatisierten IV Kennlinienmessplatzes der Firma JRT bilden die Basis für präzise Kennlinienmessungen von Solarzellen, die beidseitig Licht sammeln können. Die Erweiterung besteht aus zwei wesentlichen Komponenten:

- Der Xenon cell flasher XF3: Mittels der neuen Xenon-Blitzlampe können zum einen längere Blitze realisiert werden, dies ist entscheidend bei der zuverlässigen Messung von Solarzellen mit hoher offenen Klemmspannung. Zum anderen ist das neue Blitzsystem dafür ausgelegt, mit einer noch zu beschaffenden zweiten Blitzlampe zur Beleuchtung der Solarzellenrückseite bei bifacialen Solarzellen synchronisiert werden zu können. Diese zweite Blitzlampe wird aktuell in einem Anfang 2016 anlaufenden BMWi geförderten Projekt zur Evaluierung und Charakterisierung von Bifacialzellen beschafft (Projekt BiZeps).
- Curve Tracer cetisPV-CT-Lbifacial: Die generalisierte Auswertung der SunsVoc-Kennlinie erlaubt insbesondere bei hocheffizienten Zellen eine genauere Bestimmung des Pseudofüllfaktors. Mit der cetisPV-GR2 ist es erstmals möglich die Leitungsverluste der Gridfinger bei Solarzellen mit bis zu 5 Busbars gleichzeitig zu messen.

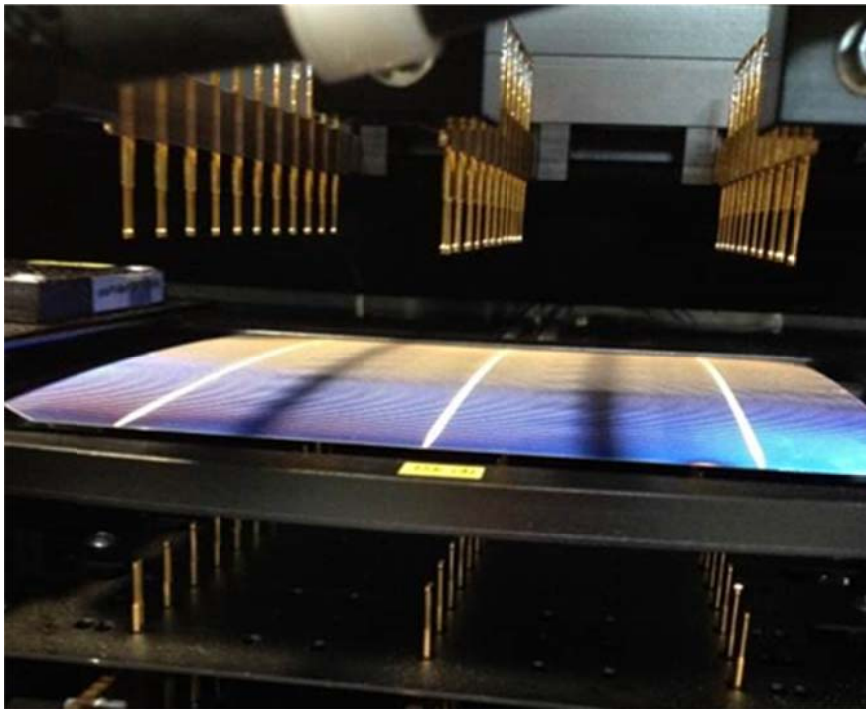


Abbildung 13: Messaufbau zur beidseitigen Kontaktierung und Beleuchtung für bifaciale Zellaufbauten.

5 Weiterer Forschungs- und Investitionsbedarf

Die originäre Projektidee mit der Schaffung einer Produktionsumgebung zur Herstellung höchsteffizienter Solarzellen auf Basis selektiver Kontakte wurde innerhalb des Projektes PV SELECT begonnen und stellt ein nach wie vor hochaktuelles Thema innerhalb der deutschen und europäischen Forschungslandschaft dar. Das Land Baden-Württemberg hat Anfang 2015 eine neuerliche Initiative der EU zur Stärkung der europäischen PV Industrie- und Forschungslandschaft mit initiiert, in dem dort diskutierten Kontext wurde PV SELECT als Beispiel für eine zukunftsgerichtete Investition in neuartige Forschungsumgebungen des Landes BW dargestellt.

Innerhalb des Projektes wurden in Folge alle notwendigen Voraussetzungen geschaffen, um die Evaluierung der Laborumgebung hinsichtlich der Eignung zur Herstellung höchsteffizienter Solarzellen durchführen zu können. Aufgrund der signifikanten Mittelkürzung zu Beginn des Projektes konnten die ursprünglich im Projekt vorgesehenen Forschungsarbeiten zum Einfluss der Reinheit der Laborumgebung auf das Prozessergebnis bei hocheffizienter Solarzellenfertigung nicht in Angriff genommen werden. Nichts desto trotz stellt gerade diese Fragestellung nach wie vor ein sehr interessantes Gebiet für die angewandte und industrienaher Solarzellenforschung und –entwicklung dar. Zukünftige Produzenten solcher Solarzellenkonzepte sind mit der Fragestellung, welche Minimalanforderungen an die Infrastruktur zur Herstellung oberflächensensitiver Hocheffizienz solarzellen gestellt werden müssen, konfrontiert. Die innerhalb von PV SELECT geschaffene Laborumgebung schafft dazu den idealen Rahmen zur Erforschung solcher Fragestellungen, da hier in einem zunächst perfekten Umfeld gezielt Verunreinigungen aufgebracht und deren Auswirkungen untersucht werden können.

Innerhalb des Projektes PV SELECT ist somit zwar der Aufbau der Laborumgebung selbst weitestgehend abgeschlossen, die wesentlichen weiter unten nochmals näher erläuterten wissenschaftlichen Ziele

- Definition und Evaluierung der Reinheitsanforderungen der Produktionsumgebung bei der Herstellung höchsteffizienter Solarzellen, Identifikation kritischer Schnittstellen und Kontaminationsquellen innerhalb des Produktionsprozesses
- Entwicklung von Messroutinen zur Charakterisierung und Qualifizierung ultradünner Schichten in einer produktionsnahen Entwicklungsumgebung, Ermittlung von Möglichkeiten zur in-situ Prozesskontrolle

konnten jedoch in einem Regelbetrieb der Produktionsumgebung bislang nicht ermittelt werden. Die erwarteten Projektergebnisse zu diesen Fragestellungen geben jedoch erst Aufschluss über die effiziente Planung und den Aufbau zukünftiger industrieller Fertigungsprozesse und –prozessketten. Aufbauend auf den Erfahrungen, die mittels des zwischenzeitlich fast 10jährigen Betriebs von PV-TEC zur Unterstützung der Solarzellen- und Zulieferindustrie für die Silizium-Solarzellen der 1. und 2. Generation (AI-BSF und PERC) gesammelt werden konnten, kann nun durch die Fortführung für die erwartete nächste Generation der Silizium-Solarzellen mit selektiven Kontakten eine ausgezeichnete Plattform für die industrienaher Forschung und Entwicklung geschaffen werden. Durch den Aufbau von PV-TEC im Zeitraum 2006-2015 konnte der Umfang der Forschungsarbeiten im Bereich der PV Produktionstechnologie am Fraunhofer ISE von ca. 2 Mio. Euro auf über 9 Mio. gesteigert werden. Die schwierige Situation in der Photovoltaik hat nun zu einer substanziellen Konsolidierung der F&E- am Fraunhofer ISE aber noch stärker bei den Industrieunternehmen geführt, so dass bei dem derzeit Wiederanziehen der Nachfrage insbesondere nach „Next-Generation“-Technologien insbesondere das Interesse an der Unterstützung durch das Fraunhofer ISE spürbar zunimmt.

Aus diesem Grund wird der Maschinenpark innerhalb des Labors auch weiterhin im Rahmen von bilateralen Industrieprojekten bzw. bundes-geförderten Verbundvorhaben konsequent erweitert. In Abbildung 14 ist der derzeitige Planungsstand abgebildet. Kurz nach Ende der Projektlaufzeit von PV SELECT wurde bereits eine weitere Großbeschichtungsanlage in das Labor integriert (PECVD-Clusteranlage oben rechts in Abbildung 14), welche bzgl. ihrer Infrastrukturanforderungen bereits voll in der ursprünglichen Planung der Laborumgebung berücksichtigt wurde. Entwicklungsziele an dieser Anlage sind analog zu den in Abschnitt 4.4 beschriebenen Zielen an der Multikammer-PECVD Beschichtungsanlage.

Innerhalb des nächsten Jahres sollen des Weiteren folgende zusätzliche Anlagen integriert werden, mit deren Hilfe zum einen der Prozesskreis zur Herstellung von Solarzellen auf Basis selektiver Kontakte vollends geschlossen bzw. zum anderen Referenzprozess-technologie zur Verfügung gestellt werden kann.

- Rohrofen-CVD Anlage zur Abscheidung von (dotierten) poly-Si Schichten. Diese Anlage wird im Rahmen eines europäischen Verbundprojektes mit nationaler Förderung beschafft.
- PVD Anlage zur Abscheidung von transparent leitfähigen Schichten sowie Metallschichten. Diese Anlage komplettiert die Prozesssequenz für das Frontend selektiver Kontakttechnologien. Die Anlage wird zunächst als Dauerleihgabe vom Anlagenhersteller zur Verfügung gestellt, das ISE wird sich im Rahmen weiterer Forschungsprojekte um den endgültigen Kauf der Anlage bemühen.
- Labor PECVD Referenzabscheideanlage zur Abscheidung von intrinsischen und dotierten amorphen Siliziumschichten. Zur Bewertung und Einordnung der Entwicklungsergebnisse innovativer Prozess- und Anlagentechnologien im Bereich der Heterojunctionstechnologie muss fast zwingend auch eine stabile Referenztechnologie vor Ort zur Verfügung stehen, mit der die neuartigen Entwicklungen fortwährend verglichen und somit die Entwicklungserfolge nachgewiesen werden können. Die geplante Labor-PECVD Anlage soll mit entsprechenden Prozesskammern zur Abscheidung von intrinsischen und dotierten a-Si Schichten ausgestattet werden, die bzgl. ihrer Qualität (Homogenität, Oberflächenpassivierung) den Anforderungen zur Herstellung einer großflächigen (156x156 mm) Heterojunctionsolarzelle mit einem Wirkungsgrad grösser 21.5% genügen müssen. Zur Referenzprozessierung ist ein Durchsatz der Anlage von etwa 50 Solarzellen pro Tag ausreichend. Die Anlage muss mit allen für diese Prozesse relevanten Prozessgasen (SiH_4 , PH_3 , B_2H_6 , etc.) sowie Ätzgasen (NF_3) zur Kammerreinigung ausgestattet sein. Entsprechende Referenzprozesse müssen vom jeweiligen Anbieter bereits vorinstalliert und getestet sein, so dass kein zusätzlicher Aufwand bzgl. der Prozessoptimierung entsteht.

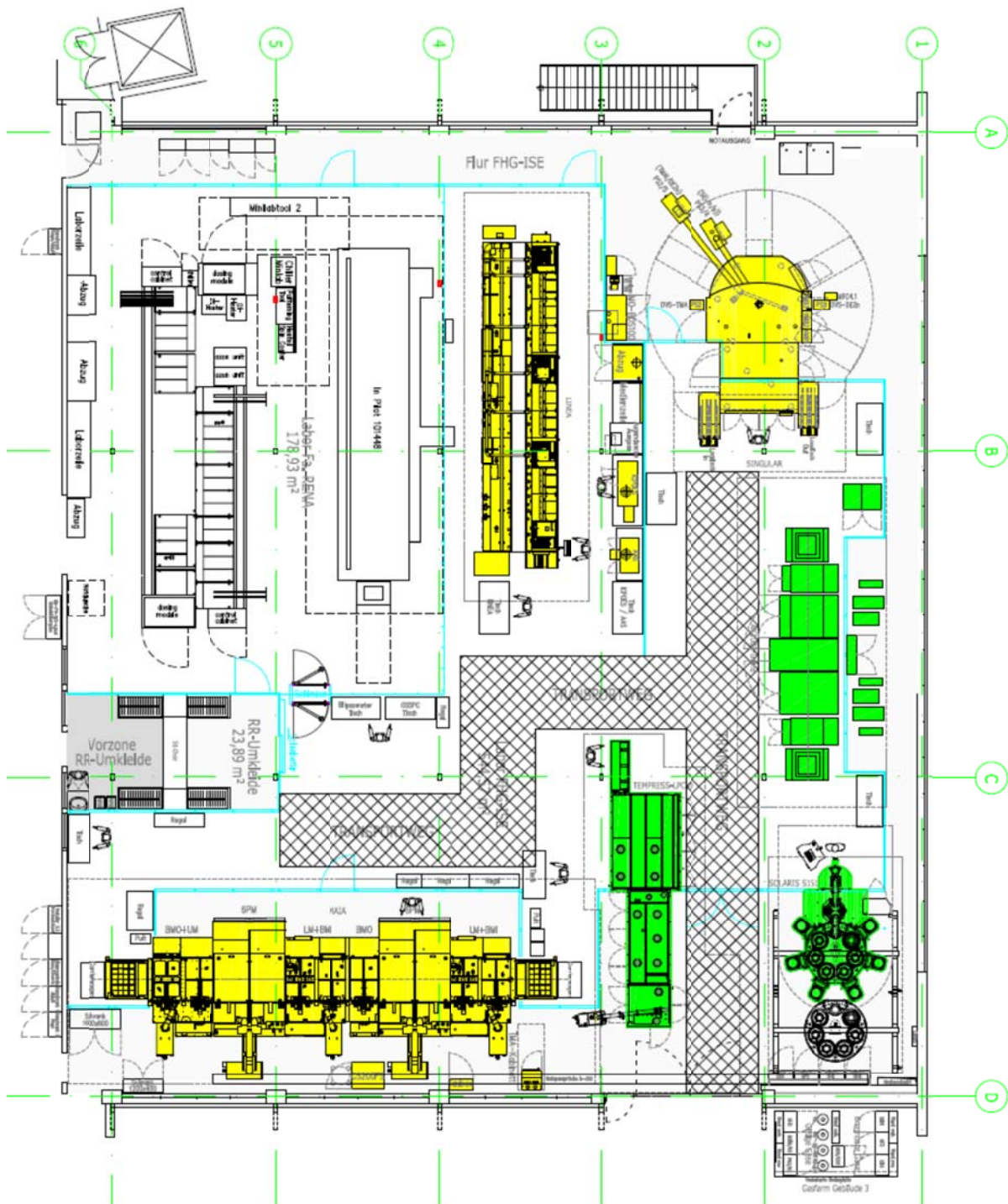


Abbildung 14: Erweiterungsplanung zur Komplettierung der Prozesskette innerhalb der neuen Laborumgebung.

6 Verwertbarkeit der Ergebnisse, Ergebnis- und Forschungstransfer

Die Etablierung und Weiterentwicklung der innovativen Anlagen- und Prozesstechnologie wird insbesondere im Rahmen von weiterführenden Verbundprojekten mit Industriepartnern aus Deutschland, speziell auch vielen Baden-Württembergischen Firmen, umgesetzt. Eine Auflistung bereits in das Pilotzentrum eingebundener Projektvorhaben findet sich in Tabelle 1.

Spezifische Themenstellungen innerhalb dieser und zukünftiger Projekte, für die das Projekt PV SELECT die entsprechende Laborumgebung und Charakterisierungsumgebung geschaffen hat, sind unter anderem:

- Evaluation von innovativen Prozessen und Prozesstechnologien zur Herstellung von höchsteffizienten Si-Solarzellen der nächsten und übernächsten Generation (basierend auf selektiver Kontakt-Technologie).
- Evaluation von Anlagen und Anlagenmodifikationen neuester Generation zur Solarzellenherstellung, insbesondere im Bereich des Solarzellen-Frontends (nass- bzw. trockenchemische Ätzung und Beschichtung) (Ansprechpartner vor allem Gerätehersteller).
- Potential von neuen Silizium-Materialien für höchste Wirkungsgrade und Yield (Ansprechpartner sind hier gleichermaßen Zellen, Anlagen- und Materialhersteller).
- Integration neuer Messtechnik zur Prozessdatenerfassung und Prozess- und Produktionskontrolle (Ansprechpartner vor allem Solarzellen- und Gerätehersteller) sowie Gewinnung von Daten für genaue Kostenmodelle (Ansprechpartner vor allem Zellenhersteller).
- Vergleich von unterschiedlichen Vakuumtechnologien für die Herstellung hochpassivierender amorpher bzw. mikrokristalliner intrinsischer und dotierter Siliciumschichten zur Erzeugung von Heteroübergängen.
- Umsetzung ganzer Prozessfolgen (wie die am Fraunhofer ISE in Entwicklung befindliche TOPCON-Technologie).
- Qualifizierung neuartiger Verfahren zur Oberflächenpassivierung, beispielsweise die Erzeugung von ultradünnen Tunneloxidschichten unter Einsatz von Ozon (UV/O₃ bzw. DI/O₃).
- Vergleich von nasschemischen und trockenen, plasmatechnischen Oberflächenbehandlungen zur Oberflächenreinigung, Sägeschadenentfernung und Texturierung. Hierbei lassen sich weitere wichtige Fragestellungen wie die Verwendung von in-line oder batch-Systemen bearbeiten.
- Untersuchung von neuartigen Automatisierungskonzepten insbesondere unter dem Aspekt der hohen Reinheitsanforderungen bei der Prozessierung höchsteffizienter Solarzellen.

Tabelle 3: Überblick laufender Projekte im Themenfeld des Pilotzentrums

Projekt / Partner	Förderung durch	Förderbetrag ISE	Zeitraum
INNOHET - Alternative Anlagen- und Prozesstechnologie für Heterojunctionsolarzellen und deren Umsetzung in innovativem Zell- und Modulkonzept Fkz: 0325634B Partner: Singulus, teamtechnik, Astex	BMWi (industriekofinanziert)	2,8 M€	10/13 – 09/17
PLASMAMAX - Entwicklung einer hocheffizienten beidseitig kontaktierten Siliciumsolarzelle mittels plasmabasierter Herstellungsverfahren Fkz: 0325624A Partner: Roth&Rau	BMWi (industriekofinanziert)	2,2M€	08/13 – 12/16
SIMPLEX - Entwicklung hocheffizienter kostengünstiger Vakuum-Beschichtungsverfahren Fkz: 0325754D Partner: Singulus, Plasmetrex, Sentech, Plasus, Hüttinger	BMWi (industriekofinanziert)	710 T€	10/14 – 09/17
THESSO - Technologien für Höchst-Effiziente Silicium Solarzellen in PV TEC Fkz: 0325491	BMWi	6,6 M€	04/12 – 03/16
HERCULES – High efficiency rear contact solar cells and ultra-powerful modules GA-Nr.: 608498	EU	1,6 M€	09/13 – 08/16
HERA – Fertigungskonzepte für eine effiziente, kostengünstige Produktion von langlebigen PV-Modulen basierend auf Heterojunction-Zellen mit rückseitig sammelndem amorphen Emitter Partner: u.a. Roth&Rau, Somont, Hennecke, ASYS, RENA, Solarwatt, Helmholtz Zentrum Berlin, Next Energy	BMWi (industriekofinanziert)	1,9M€	10/15 – 09/18
PEPPER – Passivated Emitter and passivated rear contact cell Partner: Centrotherm, Hanwha Q-Cells, Heraeus	BMWi (industriekofinanziert)	2,0M€	11/15 – 10/18
IdeAI – Industrielles PVD Al für hocheffiziente kristalline Si-Solarzellen und Module Partner: Singulus, teamtechnik, Hanwha Q-Cells, ISC Konstanz	BMWi (industriekofinanziert)	1,6 M€	10/15 – 09/18