

# **BMBF – Schwerpunktförderung „SmartPlas“ im Rahmen des Fördergebietes „Plasmatechnik“**

## **Schlussbericht für den Zeitraum 2007 bis 2010**

Zuwendungsempfänger: IBF Electronic GmbH & Co. KG	Förderkennzeichen: 13N9378
Vorhabensbezeichnung: <b>Verbundprojekt: „Grundlegende Untersuchungen zum Einsatz von Atmosphärendruck-Plasmaquellen zur inline-Beschichtung von Solarzellen“ (PLASMACELL)</b> <b>Teilprojekt: „Grundlegende Untersuchungen zur Pulsbarkeit verschiedener Magnetrons für Atmosphärenplasmaprozesse“</b>	
Laufzeit des Vorhabens: 01.11.2007 - 31.10.2010	
Berichtszeitraum: 01.11.2007 – 31.10.2010	
Projektleiter: Reinhard Fischer	

### **1. Ziele**

#### **1.1 Gesamtziel des Vorhabens**

Das Vorhaben wird im Rahmen des Verbundprojektes mit den Partnern FHG-IWS, Centrotherm, Solarworld und IPLAS durchgeführt. IBF übernimmt dabei die Aufgabe grundlegende Untersuchungen zur Magnetron-Pulsung bei unterschiedlichen Frequenzen und Leistungsklassen für den Einsatz im atmosphären Plasmabereich durchzuführen. Ziel des Vorhabens ist es die notwendigen Parameter für den Einsatz der verschiedenen Hochleistungs-Magnetrons im Plasmabetrieb zu untersuchen.

Um die Vorhabensziele zu erreichen wird die Pulsbarkeit verschiedener Magnetrons für die Arbeitsfrequenzen 915 MHz, 2,45 GHz und 5,8 GHz untersucht. Hierbei werden verschiedene Ansteuerungskonzepte für die Magnetrons untersucht. Da die Hersteller der Magnetrons keine Daten über die Pulsbarkeit liefern, können die technologischen Grenzen nur durch Versuche bis zur Zerstörung ermittelt werden. Hierfür ist es notwendig die entsprechenden Spannungs- und Strombereiche zu untersuchen.

Nach erfolgreichem Abschluss des Vorhabens stehen die Grundlagen für die Entwicklung neuer pulsbarer Hochleistungs-Mikrowellengeneratoren zur Verfügung. Diese werden von der Firma IBF gebaut und weltweit vermarktet.

#### **1.2 Bezug des Vorhabens zu den förderpolitischen Zielen**

Das Vorhaben wurde im Rahmen der Bekanntmachung NanoPlas und BioPlas des Fördergebietes Plasmatechnik des PT VDI-TZ gestellt. Ziel der Arbeiten ist es, funktionale Schichten zur Passivierung sowie definierte Oberflächenstrukturen zu erzeugen. Damit soll eine kontinuierliche und kostengünstige Produktionstechnologie für kristalline Siliziumsolarzellen ermöglicht werden. Die grundlegenden anwendungsorientierten Forschungsarbeiten sind im vorwettbewerblichen Bereich

angesiedelt und besitzen ein hohes wissenschaftlich-technisches Risiko. Die im Verbundprojekt beteiligten Partner decken alle erforderlichen Bereiche der Wertschöpfungskette kompetent ab.

### **1.3 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele des Vorhabens**

Um die Vorhabens- und Verbundziele zu erreichen ist es notwendig neuartige Mikrowellen-Generatoren für den Einsatz mit atmosphären Plasmaquellen zu untersuchen und aufzubauen. Hierfür sollen Untersuchungen an Magnetrons mit technisch gängigen Arbeitsfrequenzen untersucht werden. Die Arbeiten werden in enger Zusammenarbeit mit dem Plasmaanlagenhersteller IPLAS und dem Prozessentwicklern IWS/Centrotherm durchgeführt. Wesentliches Ziel hierbei ist es, die in den Prozess eingetragene mittlere Leistung zu reduzieren um die thermische Belastung der Substrate zu reduzieren. Gleichzeitig soll mit hohen Spitzenleistungen eine effiziente Anregung der Plasmen sichergestellt werden. Zusammen mit den Partnern soll nach dem Meilenstein gemeinsam eine Demonstrationsanlage zur Untersuchung des Betriebs unter praxisrelevanten Bedingungen aufgebaut werden.

Des weiteren sollen mit dem Projektpartner IPLAS alternative Atmosphärenplasmaanlagenkonzepte bei verschiedenen Anregungsfrequenzen untersucht werden. Der Schwerpunkt der Arbeiten von IBF liegen dabei bei der Regelung und Erzeugung der Mikrowellen-Energie.

## **2. Stand der Wissenschaft und Technik; bisherige Arbeiten**

### **2.1 Stand der Wissenschaft und Technik**

Weltweit sind 3 Arbeitsfrequenzen bei den industriellen Mikrowellengeneratoren üblich. Im Bereich 915 MHz stehen Magnetrons mit einer CW-Leistung von 5 kW bis 100 kW, im Bereich 2,45 GHz stehen Magnetrons mit einer CW-Leistung von 300 W bis 30 kW und im Bereich 5,8 GHz stehen Magnetrons mit einer CW-Leistung von 300 W bis 1 kW zur Verfügung.

Alle diese Magnetrons lassen sich mit verschiedenen Stromversorgungskonzepten betreiben.

Bei Generatoren mit kleineren Leistungen (bis 3 kW) sind die LC-stabilisierten Netzteile Standard. Diese Technik liefert eine konstante Ausgangsleistung unabhängig von Netz- und Lastschwankungen. Alle Haushaltsmikrowellengeräte arbeiten mit diesem System. Ist für den Prozess eine regelbare Ausgangsleistung notwendig, wurden in der Vergangenheit Thyristor geregelte Stromversorgungen (bis 6 kW) eingesetzt. Diese werden mehr und mehr durch Schaltnetzteile ersetzt. Die für den Betrieb notwendigen Spannungen liegen im Bereich bis 7 kV und die Ströme im Bereich bis 1 Ampere.

Bei Generatoren im Leistungsbereich von 5 kW bis 100 kW sind E-Magnet geregelte Netzteile üblicher Standard. Bei diesen Netzteilen ist die Ausgangsspannung stabil und der Anodenstrom wird indirekt über den E-Magneten geregelt. Dieser verschiebt die Kennlinie des Magnetrons. Auch in diesem Leistungsbereich gibt es erste Versuche die induktiven Stromversorgungen durch Schaltnetzteile zu ersetzen. Das Problem ist hier die notwendige Hochspannung von bis zu 20 kV bei Strömen von bis zu 6 Ampere.

Alle bisher aufgeführten Systeme liefern eine kontinuierliche Ausgangsleistung (CW) mit unterschiedlich hohem Ripple. Für Plasmaanwendungen wird es aber immer interessanter die mittlere Leistung, bei gleichzeitiger Erhöhung der Spitzenleistung, zu reduzieren um die thermische Belastung des Substrats niedrig zu halten. Bei diesen Generatoren muss die Stromversorgung in der Lage sein, die Leistung im kHz-Bereich geregelt zu pulsen. Dies wird bei induktiven Stromversorgungen durch den Einsatz von zusätzlichen linearen Reglern möglich. Bei kleinen Leistungen können hierfür Halbleiter verwendet werden, bei größeren Leistungen ist der Einsatz einer Elektronenröhre notwendig. Mit diesen Konzepten sind Pulsbreiten von CW bis 10µs realisierbar. Leider ist hier der Einsatz von Schaltnetzteilen nur begrenzt möglich, da zur Zeit, durch die Art der Regelung, nur Pulse im Bereich von CW bis 1ms erzeugt werden können.

Dem Antragsteller sind keine anderweitigen Forschungen, Entwicklungen, Untersuchungen oder Patente / -Anmeldungen bekannt die einer späteren Ergebnisverwertung entgegenstehen.

## **2.2 Bisherige Arbeiten des Antragstellers**

IBF Electronic hat das Ziel die Entwicklung und den Einsatz der industriellen Mikrowelle (915 MHz, 2450 MHz und 5800 MHz) voranzutreiben. IBF liefert ein umfassendes Programm von Stromversorgungen, Generatoren, Hohlleiter-Komponenten und Messtechnik für die Bereiche der MW-Erwärmung und der Plasmaanwendung. IBF verfügt über mehr als 10 Jahre Erfahrung in der Entwicklung, im Bau und in der Integration von Mikrowellen-Komponenten, Geräten und Anlagen. Neben dem Standard-Programm von industriellen Mikrowellen-Anlagen und Generatoren von 150 W bis 100 kW ist IBF in der Lage, auf Wunsch zahlreiche Variationen dieser Baugruppen, z.B. als Kompaktgerät oder zum Einbau in Schaltschränke, anzubieten. Natürlich fertigt IBF auch Mikrowellen-Komponenten, wie z.B. Hohlleiterübergänge, Einkopplungen, Flansche, Tuner für Hand- und Motorbetrieb, Zirkulatoren, Isolatoren, Schlitzantennen, MW-Detektoren usw.

IBF fertigt Generatoren mit allen im industriellen Umfeld üblichen Stromversorgungskonzepten. Dies sind LC-Netzteile mit Leistungen zwischen 300 W und 3 kW, Thyristor geregelte Netzteile mit Leistungen zwischen 300 W und 6 kW, E-Magnet geregelte Netzteile mit Leistungen zwischen 5 kW und 100 kW, Schaltnetzteile zwischen 300 W und 6 kW und pulsbaaren Netzteile mit Leistungen zwischen 300 W und 15 kW Pulsleistung. Durch die enge Zusammenarbeit mit der Glasindustrie im Bereich PICVD hat IBF sehr viel Erfahrung im hohen Pulsleistungen aus kleinen CW-Magnetrons. Um die Ersatzteilkosten bei großen Stückzahlen niedrig zu halten, ist dies sehr interessant. IBF kann serienmäßig einen Generator liefern, der aus einem 1,2 kW Magnetron bis zu 15 kW Pulsleistung liefert. Dieser Generator ist inzwischen mit über 500 Stück im täglichen Einsatz. Dieses Wissen hat es IBF ermöglicht, Generatoren mit weiteren Kombinationen zwischen CW- und Puls-Leistung zu entwickeln. Dabei wurden aber nur Magnetrons mit einer CW-Leistung bis 6 kW verwendet. Größere Magnetrons und höhere Pulsleistungen sollen im Zuge dieses Projektes untersucht werden.

## **3. Wissenschaftlich-technische Ergebnisse (siehe Anlage)**

### **A) Arbeitspaket 1: Untersuchung von Atmosphärendruck-Plasmaverfahren für die c-Si Photovoltaik**

1.1 Planung, Aufbau und Test von ungepulsten industrietauglichen Mikrowellengeneratoren mit einer Arbeitsfrequenz von 2,45 GHz bis zu einer Leistung von 10 kW.

1.2 Planung, Aufbau und Test von gepulsten Mikrowellengeneratoren mit einer Arbeitsfrequenz von 2,45 GHz bis zu einer Puls-Leistung von ca. 20 kW.

1.3 Grundlegende Untersuchungen der 2,45 GHz Generatoren zum Betrieb an einer Plasmaquelle.

1.4 Planung, Aufbau und Test von gepulsten Mikrowellengeneratoren mit einer Arbeitsfrequenz von 5,8 GHz bis zu einer Puls-Leistung von ca. 4 kW.

1.5 Grundlegende Untersuchungen der 5,8 GHz Generatoren zum Betrieb an einer Plasmaquelle.

1.6 Erarbeitung von grundlegenden Konzepten und Parametern für die Pulsung von Großmagnetron mit einer Arbeitsfrequenz von 915 MHz.

1.7 Erforschung und Aufbau eines geeigneten Mikrowellen-Generators mit CW und Pulsbetrieb mit einer Arbeitsfrequenz von 2,45 GHz für den Aufbau der Demonstrator-Anlage.

## B) Arbeitspaket 2: Aufbau und Erprobung einer Versuchsanlage zur Untersuchung industrierelevanter Parameter beim kontinuierlichen Prozessieren von Si-Solarwafern

2.1 Weiterführende Untersuchungen zur Leistungspulsung an verschiedenen Magnetrons und Arbeitsfrequenzen.

2.2 Weiterführende Untersuchung zum Betrieb des Mikrowellengenerators an der Demonstrator-Anlage und Dokumentation der Ergebnisse.

2.3 Aufbau und Test von gepulsten Mikrowellengeneratoren mit einer Arbeitsfrequenz von 915 MHz bis zu einer Pulsleistung von ca. 75 kW.

2.4 Grundlegende Untersuchung der 915 MHz Puls-Generatoren zum Betrieb an einer Plasmaquelle.

## 4. Vergleich des Standes des Vorhabens mit der gültigen Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung

Arbeitspaket	Ifd. Nr. aus Arbeitsplan	planmäßig begonnen						
		planabweichend begonnen						
		planmäßig abgeschlossen						
		planabweichend abgeschlossen						
		Beginn	Ende	Aufwand [MM] im Berichtszeitraum				
Planung, Aufbau und Test von ungepulsten industrietauglichen Mikrowellengeneratoren mit einer Arbeitsfrequenz von 2,45 GHz bis zu einer Leistung von 10 kW.	1.1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	11/07	08/08	4
Planung, Aufbau und Test von gepulsten Mikrowellengeneratoren mit einer Arbeitsfrequenz von 2,45 GHz bis zu einer Puls-Leistung von ca. 20kW	1.2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	11/07	02/09	6
Grundlegende Untersuchungen der 2,45 GHz Generatoren zum Betrieb an einer Plasmaquelle.	1.3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	11/07	02/09	2
Planung, Aufbau und Test von gepulsten Mikrowellengeneratoren mit einer Arbeitsfrequenz von 5,8 GHz bis zu einer Puls-Leistung von ca. 4 kW.	1.4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	01/08	12/08	4
Grundlegende Untersuchungen der 5,8 GHz Generatoren zum Betrieb an einer Plasmaquelle.	1.5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	04/07	02/09	2
Erarbeitung von grundlegenden Konzepten und Parametern für die Pulsung von Großmagnetron mit einer Arbeitsfrequenz von 915 MHz.	1.6	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	01/08	06/09	8
Erforschung und Aufbau eines geeigneten Mikrowellen-Generators mit CW und Pulsbetrieb mit einer Arbeitsfrequenz von 2,45 GHz für den Aufbau der Demonstratoranlage.	1.7	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	04/08	08/09	10

Weiterführende Untersuchungen zur Leistungspulsung an verschiedene Magnetrons und Arbeitsfrequenzen in enger Kooperation mit den Verbundpartnern.	2.1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	02/09	10/10	12
Weiterführende Untersuchungen zum Betrieb des Mikrowellengenerators an der Demonstratoranlage und Dokumentation der Ergebnisse.	2.2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	04/09	10/10	10
Aufbau und Test von gepulsten Mikrowellen-Generatoren mit einer Arbeitsfrequenz von 915 MHz bis zu einer Puls-Leistung von ca. 75 kW.	2.3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	01/09	10/10	12
Grundlegende Untersuchungen der 915 MHz Puls- Generatoren zum Betrieb an einer Plasmaquelle.	2.4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	09/09	10/10	6
		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			
		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			
<b>Summe:</b>								<b>= 76</b>

**5. Haben sich die Aussichten für die Erreichung der Ziele des Vorhabens innerhalb des angegebenen Berichtszeitraums gegenüber dem ursprünglichen Antrag geändert (Begründung)?**

Nein.

**6. Sind inzwischen von dritter Seite FE-Ergebnisse bekannt geworden, die für die Durchführung des Vorhabens relevant sind (auch Darstellung der aktuellen Informationsrecherche nach Nr. 6.1 NKBF 98)?**

Nein.

**7. Jährliche Fortschreibung des Verwertungsplans.**

- **Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen** und erteilte Schutzrechte, die vom ZE oder von am Vorhaben Beteiligten gemacht oder in Anspruch genommen wurden sowie deren standort-bezogene Verwertung (Lizenzen u.a.) und erkennbare weitere Verwertungsmöglichkeiten.

Im Berichtszeitraum gab es keine Aktivitäten hinsichtlich Erfindungen und Patentanmeldungen.

- **Wirtschaftliche Erfolgsaussichten** nach Projektende (mit Zeithorizont) – z.B. auch funktionale/wirtschaftliche Vorteile gegenüber Konkurrenzlösungen, Nutzen für verschiedene Anwendergruppen/-industrien am Standort Deutschland, Umsetzungs- und Transferstrategien (Angaben, soweit die Art des Vorhabens dies zulässt).

Es werden inzwischen von IBF die Pulsgeneratoren im Frequenzbereich 915 MHz, 2,45 GHz und 5,8 GHz als eigenständiges Produkt für den Einsatz in Plasma- und Erwärmungs-Anlagen weltweit verkauft.

- **Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten** nach Projektende (mit