

Induktive Vorverklebung von Versteifungselementen bei Luftfahrtstrukturen aus CFK

D. Akin

DLR- Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik, Ottenbecker Damm 12, 21684 Stade, Deutschland

Zusammenfassung

Aktuelle Flugzeugmodelle unterschiedlicher Hersteller haben Strukturbauteile (Rumpf- und Flügelschale, Seitenleitwerk, Landeklappen), die durch spezielle Profile versteift werden müssen. Nach aktuellem Stand der Technik werden diese Profile beispielsweise beim Airbus A350, bei dem kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff (CFK) als Material eingesetzt wird, mit konvektions- und konduktionsbasierten Heizmethoden vorverklebt. Durch die große Anzahl der Vorverklebungen macht der Prozess einen großen Anteil der Gesamtprozesszeit aus und bietet großes Einsparpotenzial. Das vom DLR entwickelte und patentierte Verfahren der induktiven Vorverklebung nutzt die elektrischen Eigenschaften von CFK und erreicht eine Vorverklebung in weniger als 6 Sekunden mittels induktiver Erwärmung. Damit kann der Prozess um einen Faktor von > 10 verkürzt werden.

1 EINLEITUNG

Die moderne Luftfahrtindustrie setzt mehr und mehr auf leistungsfähigere Materialkonzepte wie faserverstärkte Kunststoffe (FVK). Diese neuen Materialien stellen die fertigenden Betriebe vor neue Herausforderungen, um Flugzeugteile in den benötigten Stückzahlen qualitativ hochwertig und kostengünstig herzustellen. Im Gegensatz zu Aluminium und Stählen ist die Verarbeitung von FVK geprägt von zeitlich aufwändigen Prozessen, wie z.B. die chemische Reaktion bei der Aushärtung duroplastischer Epoxidharze. Aber auch viele andere Aspekte der Fertigung von Bauteilen aus FVK beeinflussen den Fertigungstakt negativ und erhöhen damit die Kosten. Hier liegt großes Einsparungspotenzial durch die Entwicklung hochspezialisierter und automatisierter Fertigungstechnologien, die die Prozesse vereinfachen und beschleunigen. Ein Prozessschritt, der die Vorverklebung von Versteifungselementen auf Schalenbauteilen zum Ziel hat, kann durch den Einsatz einer adaptierten elektromagnetischen Erwärmungsmethode bis zu zehnfach schneller durchgeführt werden. Diese Technologie wird in den nachfolgenden Kapiteln vorgestellt und erläutert.

2 STAND DER TECHNIK

An der Nutzung der elektrischen Eigenschaften von Kohlenstofffasern für die Fertigung von Bauteilen aus CFK wird in vielen Bereichen geforscht. Die Vorverklebung von Versteifungselementen mit Rumpf- oder Flügelschalen profitiert jedoch besonders von der schnellen Energieübertragung elektromagnetischer Felder auf Kohlenstofffasern. In dieser Anwendung geht es vor allem um Prozesszeit, während die Leistung und Zieltemperaturen eher moderat sind, wie die nachfolgenden Kapitel zeigen.

2.1 Herstellung versteifter Luftfahrtstrukturen

Primärstrukturen für Luftfahrzeuge wie beispielsweise Rumpf, Flügel sowie Steuerflächen werden typischerweise mithilfe von versteiften Schalenprofilen hergestellt. Dabei bildet die Außenhaut das gewünschte aerodynamische Profil oder die Rumpfform ab, während Bauelemente im Inneren – Stringer und Spante – die Längs- bzw. Querversteifung realisieren [1]. Diese Bauweise setzt sich über viele verschiedene Materialien fort. CFK Schalen werden nach dem Stand der Technik mittels Automated Fiberplacement (AFP) oder Automated Taping (ATL) hergestellt. Anschließend werden die separat gefertigten Stringer positioniert und vorverklebt, damit sie während der Weiterverarbeitung und der Aushärtung in ihrer Position verbleiben.

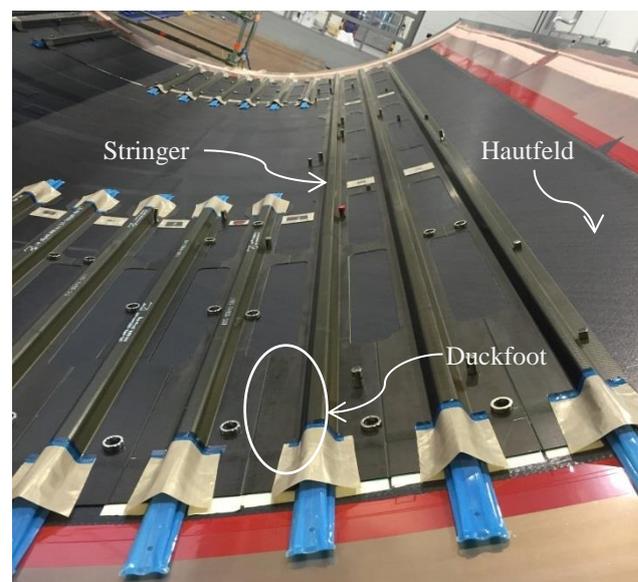


Abbildung 1: CFK Rumpfschale mit vorverklebten Stringern (MAAXIMUS Demonstrator)

Diese Vorverklebung erfolgt an mehreren Stellen des Stringers punktuell durch Wärmeeintrag. Abbil-

Abbildung 1 zeigt eine noch nicht ausgehärtete Rumpfschale mit vorverklebten Stringern. Durch Aufdrücken einer beheizten Fläche wird die Zieltemperatur des Klebefilms von ca. 55°C nach ca. 60 Sekunden erreicht und die Vorverklebung ist abgeschlossen. Diese bewirkt eine temporäre Verbindung und verhindert damit ein Verrutschen des Stringers bei der Weiterverarbeitung. Die Vorverklebung kommt dadurch zustande, dass die Oberflächenbenetzung durch die erhöhte Temperatur verbessert wird. Im nächsten Schritt wird das Bauteil vakuumverpackt und im Autoklav ausgehärtet.

Bei der manuellen Fertigung der Airbus A350-Komponenten werden für die oben beschriebene Vorverklebung viel manuelle Arbeit benötigt, um die einzelnen Stringer mittels eines Laserprojektors auf die Sollposition zu setzen. Nach dem manuellen Andrücken wird der Stringer fixiert, indem ein Heizgerät aufgesetzt wird. Die Erwärmung erfolgt in diesem Fall über eine widerstandsbeheizte Metallplatte und nimmt mehrere Minuten pro Punkt in Anspruch. Die Premium Aerotec GmbH verfolgt auch eine roboterbasierte vollautomatische Lösung zur Integration der Stringer in Rumpfsegmente verschiedener A350 Versionen. Dabei nehmen kooperierende Roboter die Stringer aus einem Magazin auf und positionieren sie über der Schale. Anschließend werden die Stringer beginnend von einer Seite zur anderen angedrückt. Während des Andrückvorgangs werden sie nach und nach vorverklebt. Dabei heizt der Endeffektor des Roboters mit einer beheizten Metallplatte die Verbreiterungen des Flansches („Duckfeet“) flächig auf ca. 60°C auf. Siehe hierzu Abbildung 2. [2]



Abbildung 2: Automatisierte Stringerintegration [3]

2.2 Induktive Erwärmung

Die induktive Erwärmung hat ihren Ursprung in der Metallindustrie und wird dort hauptsächlich zum

Oberflächenhärten eingesetzt. Da Kohlenstofffasern elektrisch leitfähig sind, können diese ebenfalls mittels oszillierender Magnetfelder erwärmt werden. Allerdings geschieht dies nur dann mit einem nennenswerten Wirkungsgrad, wenn globale Leiterschleifen vorhanden sind. Rein unidirektionale Aufbauten, ohne sich berührende Fasern erfahren annähernd keine Erwärmung. Sind Leiterschleifen vorhanden, wird Wärme durch vier verschiedene Mechanismen erzeugt:

- Joul'sche Verluste
- Verluste durch den Kontaktwiderstand zwischen Fasern
- Kapazitive Effekte zwischen Fasern
- Dielektrische Effekte zwischen den Fasern

Es herrscht Uneinigkeit darüber in welchem Verhältnis diese Effekte zueinander auftreten. Dies ist jedoch für die hier beschriebene Anwendung nicht relevant. [4]

Nach dem sogenannten Skin-Effekt ist die Eindringtiefe von Wirbelströmen über die Formel

$$(1) \quad \delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi * \mu * f}}$$

definiert, wobei

δ: Eindringtiefe

ρ: Spezifischer Widerstand

μ: Absolute Permeabilität

f: Wechselstrom Frequenz

entspricht [5]. Dies gilt für isotrope Materialien wie z.B. Metalle. Ob dieser Effekt auf anisotrope Materialien wie beispielsweise einem Aufbau aus UD Prepreg anwendbar ist, ist zum jetzigen Zeitpunkt unbekannt.

3 ADAPTION INDUKTIVER ERWÄRMUNG ZUR VORVERKLEBUNG VON CFK BAUTEILEN

Das Ziel der induktiven Vorverklebung ist es den Klebefilm zwischen Stringer und Bauteil so schnell wie möglich auf ca. 55°C zu erwärmen. Dabei muss darauf geachtet werden, dass die Materialien lokal die Temperaturlimitierungen nicht überschreiten. Da bei der induktiven Erwärmung die Wärme im Material erzeugt und nicht übertragen wird, müssen die Temperaturen im Vorfeld ermittelt werden. Ausschlaggebend für die Temperaturverteilung ist vor allem die Frequenz, wie u.a. in den folgenden Unterkapiteln gezeigt wird.

3.1 Temperaturgrenzen

Da der Klebefilm selbst nicht elektrisch leitfähig ist, kann dieser nicht direkt erwärmt werden. Stattdessen werden die umgebenden Materialschichten erwärmt. Allen voran wird der Stringer oberhalb des

Klebefilms erwärmt. Dabei handelt es sich um ausgehärtetes unidirektionales Prepreg in einem quasi-isotropen Aufbau. Je nach Auslegung wird jedoch auch das darunterliegende, in der Regel unausgehärtete Hautfeld erwärmt. Das bedeutet die Wärme wird von oben und unten durch Konvektion in den ca. 0,2 mm dicken Klebefilm übertragen. Aufgrund der geringen Wärmekapazität des Klebefilms und dadurch, dass die Komponenten komprimiert werden entsteht hier kein relevanter zeitlicher Verzug. Eine Skizze des Aufbaus bei der induktiven Vorverklebung ist Abbildung 3 zu entnehmen.

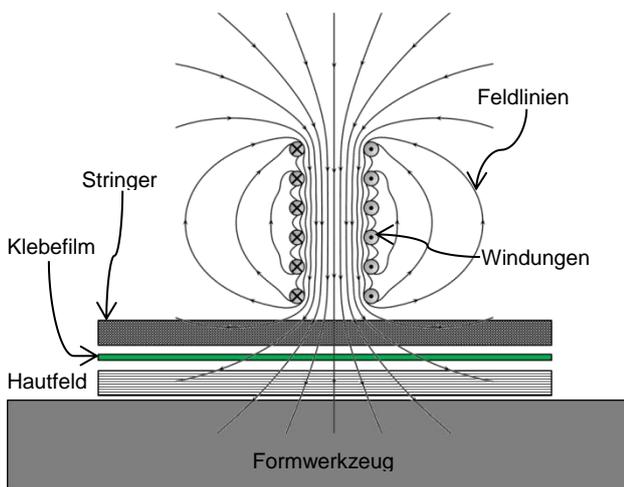


Abbildung 3: Aufbau induktive Vorverklebung

Um die Qualität der Bauteile nicht negativ zu beeinflussen und die Fertigungsstandards in der Luftfahrt nicht zu verletzen, dürfen manche der Komponenten eine Temperatur von $55^{\circ}\text{C} \pm 5\text{K}$ zu keinem Zeitpunkt überschreiten. Sowohl beim Klebefilm als auch bei einem noch nicht ausgehärteten Hautfeld würde anderenfalls der Aushärtprozess frühzeitig einsetzen. Da die Komponenten nicht immer direkt zum Aushärten in den Autoklav können, sondern mitunter mehr als eine Woche gelagert werden, bewirkt das frühzeitige Einsetzen der Aushärtung eine nicht reversible Materialschädigung. Sowohl der Stringer als auch das Formwerkzeug dürfen theoretisch höheren Temperaturen ausgesetzt sein. Jedoch stehen sie in direktem Kontakt zu Klebefilm und zum Hautfeld, sodass das Risiko besteht, dass der schnelle Wärmeübergang aufgrund der großen Fläche auch hier eine Überschreitung der Temperatur hervorruft.

3.2 Geeigneter Frequenzbereich

Um mit der Induktionstechnologie eine geeignete Temperaturverteilung zu erreichen müssen die richtigen Prozessparameter bestimmt werden. Bei Induktionsanlagen kann die Frequenz, Leistung, Dauer und Spulenform angepasst werden. Untersuchungen haben gezeigt, dass bei einer zu niedrigen Frequenz (10-30 kHz) ein Großteil der Leistung in das metallische Formwerkzeug fließt und dann das Hautfeld eine zu hohe Temperatur erfährt, bevor der Klebefilm die Zieltemperatur erreicht. Das liegt zum

einen an der höheren Eindringtiefe bei niedrigen Frequenzen aufgrund des Skin Effekts und zum anderen daran, dass die Energieabsorption bei CFK im Allgemeinen mit der Frequenz steigt. Im DLR durchgeführte Untersuchungen zur Temperaturverteilung haben gezeigt, dass Frequenzen von 200 kHz bis 400 kHz für diese Anwendung geeignete Temperaturverteilungen liefern. Diese hohen Frequenzen sind u.a. mit der am Markt verfügbaren Anlagentechnologie basierend auf Oszillatoren, die mithilfe von Resonanzschwingkreisen und insulated-gate bipolar Transistor (IGBT) arbeiten, zu erreichen.

3.3 Temperatursensorik für Vorversuche

Eine besondere Herausforderung bei den Vorversuchen ist die Ermittlung der Temperaturverteilungen. Da jede Art von metallischer Temperatursensorik ebenfalls durch Induktion erwärmt wird, muss auf eine alternative Sensortechnik zurückgegriffen werden.

Pyrometer und Thermokameras können hier eingesetzt werden, da sie berührungslos sind und nicht den elektromagnetischen Feldern ausgesetzt werden müssen. Allerdings können sie nicht direkt in einem Versuchsaufbau messen, sondern können nur die Oberfläche abtasten. Trotzdem können durch geeignete Versuchsaufbauten verwertbare Messungen durchgeführt werden.

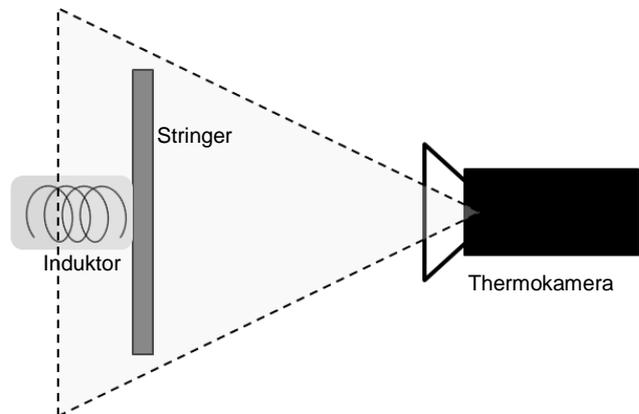


Abbildung 4: Versuchsaufbau zur Ermittlung des Erwärmungsmusters

Zwar beeinflusst jede Veränderung der Materialkomposition die auftretenden Temperaturen, doch kann der in Abbildung 4 skizzierte Versuchsaufbau Aufschlüsse über das Erwärmungsmuster liefern. Das Betrachten der Unterseite eines Stringers mit einer Thermografie Kamera und induktiver Erwärmung von der anderen Seite, kann dabei helfen die auftretende Maximaltemperatur am Klebefilm zu ermitteln und Induktorgeometrien auf Temperaturhomogenität im Material hin zu optimieren. Es gibt verschiedene Möglichkeiten optische Temperatursensorik anzuordnen. Eine weitere Möglichkeit Einblicke in die Temperaturen im Inneren zu erhalten bietet beispielsweise das Einbringen von Bohrungen

mit unterschiedlichen Tiefen, durch die mithilfe einer Thermografie Kamera im Inneren eines Aufbaus gemessen werden kann.

Eine binäre, dafür jedoch sehr flexible Art der Temperaturmessung bieten Temperatursensoren. Sie bestehen aus einem Material, das je nach Stift bei einer bestimmten Temperatur schmilzt. Wird das Material z.B. auf ein Blatt Papier aufgetragen und in den Aufbau gelegt, so kann festgestellt werden ob nach einem Erwärmungsvorgang die spezifische Temperatur des Stiftes überschritten wurde und an welcher Stelle. Diese Technik hilft vor allem bei der Validierung vorhandener Induktionsparameter. Wird ein 60°C Stift ausgewählt und eine Vorverklebung durchgeführt, ist auf dem Blatt Papier zu erkennen, wo das Material des Stiftes ggf. kurz geschmolzen ist und damit ob die zulässige Temperatur überschritten wurde. Solche Temperatursensoren (und -Streifen) werden z.B. von „Omega Engineering“ vertrieben [6].

BISHERIGE ANWENDUNGEN

Beim Bau zweier Demonstratoren konnte gezeigt werden, dass die Nutzung der Induktionstechnologie zur Vorverklebung von Versteifungselementen auch unter Fertigungsbedingungen funktioniert. Es eignet sich sowohl für die Einbindung in automatisierte Anlagen als auch für den manuellen Prozess. Eine weitere Anwendung ergibt sich zusätzlich im Bereich der Faser-Metall-Lamine (FML), bei denen Versteifungselemente aus Aluminium ebenfalls auf Schalenstrukturen vorverklebt werden müssen.

3.4 Rumpfschalen Demonstratoren

Das Verfahren der induktiven Stringer Vorverklebung ist bereits erfolgreich bei der Herstellung zweier Demonstratoren eingesetzt worden. Im Rahmen der Projekte SARISTU und MAAXIMUS sind im DLR Stade vollständige Rumpfsegmente eines Airbus A350 gebaut und anschließend zu unterschiedlichen Zwecken getestet worden. Die fertig montierte MAAXIMUS Schale zeigt Abbildung 5.



Abbildung 5: Fertig montierte MAAXIMUS Schale

Der SARISTU Demonstrator ist im Secondary Bonding Verfahren hergestellt worden, während bei der MAAXIMUS Fertigung Schale und Klebefilm in einem Autoklavzyklus ausgehärtet worden sind (Co-

Bonding). Bei der Stringerintegration beider Rumpfsegmente wurden die Stringer mithilfe der Induktion innerhalb von 4 Sekunden pro Klebepunkt paar vorverklebt. Abbildung 6 zeigt die Induktorspulen beim manuellen Vorverklebungsprozess.



Abbildung 6: Induktive Stringerheftung bei Demonstratorfertigung

3.5 Einsatz bei Strukturbauteilen aus FML

Der Verbundwerkstoff aus Aluminium und glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) ist u.a. bereits für einige Primärstrukturen des Airbus A380 im Einsatz. Derzeit wird im Rahmen verschiedener Projekte (Bsp: DLR Projekt ProfiRumpf) an der automatisierten Fertigung solcher Strukturen geforscht, um den Grundstein für eine mögliche Ausweitung hin zum Einsatz in einem neuen Kurzstreckenflugzeug zu legen. Nach dem Stand der Technik sind die Stringer aus Aluminium und werden mit einem Klebefilm auf das Hautfeld geklebt. Dieses besteht aus mehreren aufeinanderfolgenden Schichten aus Aluminiumblech und vorimprägnierten Glasfasern. Es wird in einem manuellen Ablegeprozess aufgeschichtet und ausgehärtet. Anschließend werden die Stringer positioniert und angedrückt, wobei Bolzen und/oder Vorrichtungen sie in Position halten. In einem zweiten Temperzyklus wird dann die Klebeverbindung ausgehärtet.

Um den Prozess schneller und günstiger zu gestalten, wird auf das Wissen aus dem CFK Bereich zurückgegriffen und das Co-Bonding Verfahren auf FML übertragen. Ferner sollen die Stringer ohne strukturschwächende Bolzen und aufwändige Vorrichtungen auskommen, indem sie thermisch vorverklebt werden. Hier lässt sich die Induktion als Wärmequelle sehr gut einsetzen. Mit geeigneten Anpassungen der Hardware und der Prozessparameter können die Stringer und damit auch der Klebefilm schnell und homogen erwärmt werden. Mit den vorbehandelten Aluminium Oberflächen des Stringers und des Hautfeldes gehen die verwendeten Klebefilme eine sehr gute temporäre Vorverklebung ein. Abbildung 7 zeigt den Prozess mit einem speziellen Linieninduktor.

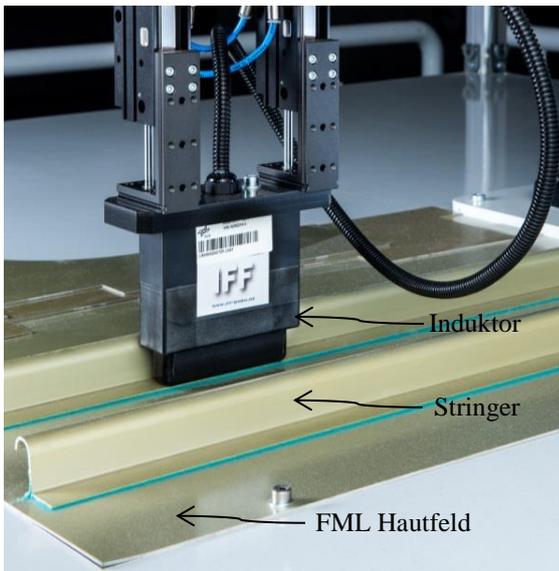


Abbildung 7: Induktive Stringerheftung FML

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In den vorangegangenen Kapiteln wird dokumentiert, dass die induktive Erwärmung eine Technologie ist, mit dessen Hilfe die Vorverklebung von Verstärkungselementen um den Faktor 10 schneller realisiert werden kann. Der Prozess und die Bedingungen wurden in den Kapiteln 2 und 3 ausführlich beschrieben. Hier werden auch die zu beachtenden Besonderheiten dieser Erwärmungsmethode dargestellt, die sich deutlich von anderen Wärmequellen unterscheidet. Dies gilt auch für die Möglichkeiten der Temperaturmessungen während der Erwärmung, auf die in Kapitel 3.3 eingegangen wurde. Das DLR in Stade entwickelt die Technologie kontinuierlich weiter konnte die Technologie bereits mehrfach erfolgreich beim Bau zweier Demonstratoren einsetzen. Außerdem wird zurzeit an dem Einsatz der induktiven Vorverklebung bei der Fertigung von FML Strukturen geforscht.

Um den Weg für den Einzug in die Serienfertigung zu ebnen, gilt es die Unversehrtheit des Materials in mechanischen und chemischen Untersuchungen nachzuweisen. Da bei der induktiven Erwärmung große Leistungen übertragen werden, besteht das Risiko, dass in lokal - beispielsweise am Faser-Matrix Übergang - Überhitzungen auftreten können. Um sicherzustellen, dass keine makroskopischen Überhitzungen auftreten wird zurzeit daran gearbeitet Vorkehrungen zu treffen diese auszuschließen. Während der Prozess in seiner jetzigen Form nur gesteuert ist, könnte ein geregelter Prozess die Sicherheit deutlich erhöhen.

REFERENZEN

1. **R. W. Johnson, L.W. Thomson, R.D. Wilson.** *Study on Utilization of Advanced Composites in Fuselage Structures of Large Transports.* Washington : NASA, 1985.
2. **Roboterbasierte Fertigung von CFK-Flugzeugstrukturen. FFT EDAG Produktionssysteme GmbH & Co. KG.** Hannover : Robotics Kongress, 2013.
3. **FANUC Austria GmbH.** Fanuc. [Online] [Zitat vom: 19. 10 2017.] <http://www.fanuc.eu/at/de/fallbeispiele-von-kunden/fft-edag>.
4. **Ströhlein, Dr. Tobias.** *Volumetrische Erwärmung von Kohlenstofffaserhalbzeugen.* Braunschweig : Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 2012.
5. **Fasholz, Jörg.** *Induktive Erwärmung - Physikalische Grundlagen und technische Anwendungen.* Essen : Energie-Verlag GmbH, 1984. 3-87200-612-6.
6. **Omega Engineering GmbH.** [Online] [Zitat vom: 01. 10 2017.] https://www.omega.de/pptst/OMEGAMARKER_NEW.html.