

# Komposite: Werkstoffe der Zukunft

## Teil 10: Komposite in der Luftfahrt

### Abstract

---

Seit den Anfängen der Luftfahrt wurden aufgrund ihres geringen Gewichts natürliche Verbundwerkstoffe verwendet. Derzeit ergibt sich die Verwendung von Kompositen mit organischer Matrix aus der andauernden Bemühung um Einsparungen beim Kraftstoff, also bei fossiler Energie. Das geringe Gewicht lässt sich jedoch nur auf Kosten der anderen Eigenschaften erreichen. In mechanischer Hinsicht ermöglicht das Verhältnis zwischen den Eigenschaften und der Dichte einen Vergleich der Werkstoffe untereinander, und dieser Vergleich fällt zugunsten der Komposite aus. Die Stoßfestigkeit (Vögel) und die elektrischen Eigenschaften (Blitzschlag) stellen weitere Eigenschaften dar, die es bei strukturellen Werkstoffen zu optimieren gilt, insbesondere bei Kunststoff-Polymer-Verbundstoffen.

Die Verwendung von Kompositen ist bei sekundären Bauteilen (Profilnase der Tragflächenvorderkante, Auftriebsbeihilfen...) gängig und weitet sich auf Teile der Primärstruktur wie den Rumpf aus. Sogar bei den Motoren greifen die Hersteller nunmehr für Teile, die keinen allzu hohen Temperaturen ausgesetzt sind, zu Kompositen mit organischer Matrix (unter anderem Thermoplaste).

Bei den Anwendungstechniken für Komposite handelt es sich im allgemeinen um Verfahren unter Druck und/oder hohen Temperaturen (Kompression, (SQ)RTM, ATL, AFP usw.) bei Duroplasten und Einspritzverfahren bei Thermoplasten. Für die Zukunft eröffnen Nanokomposite und Multifunktions-Hybridwerkstoffe neue Perspektiven.

### Geschichte

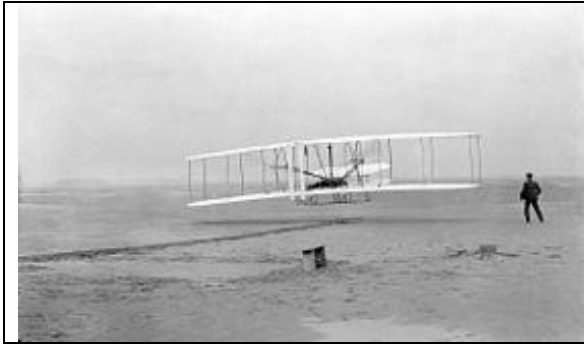
---

Seit den Anfängen der Luftfahrt, das heißt seit dem Flug von Geräten, die „schwerer als Luft“ sind, waren alle Flugzeugbauer bestrebt, das Gewicht ihrer Geräte soweit wie möglich zu reduzieren.

Derjenige, der als einer der Väter der Luftfahrt angesehen wird (der übrigens auch das französische Wort „avion“ (Flugzeug) erfunden hat), Clément Ader (1841-1925), hat 1890 sein erstes Flugzeug (namens „Eole“) fliegen lassen, das mit einer Dampfmaschine, einem Propeller aus Bambus und beweglichen, stoffbespannten Flügeln ausgestattet war und ein Gesamtgewicht von 295kg hatte. Also hat die Luftfahrt von Anfang an (natürliche) Verbundwerkstoffe eingesetzt.

1903 haben die Orville und Wilbur Wright ein Segelflugzeug umgebaut und mit einem leichten Automotor ausgestattet. So haben sie ein Flugzeug namens „Flyer“ zum Fliegen gebracht, dessen Eigenschaften in Tabelle 1 aufgelistet sind:

<b>Flyer</b> (Orville und Wilbur Wright)	<b>Merkmale</b>	
--	-----------------	--

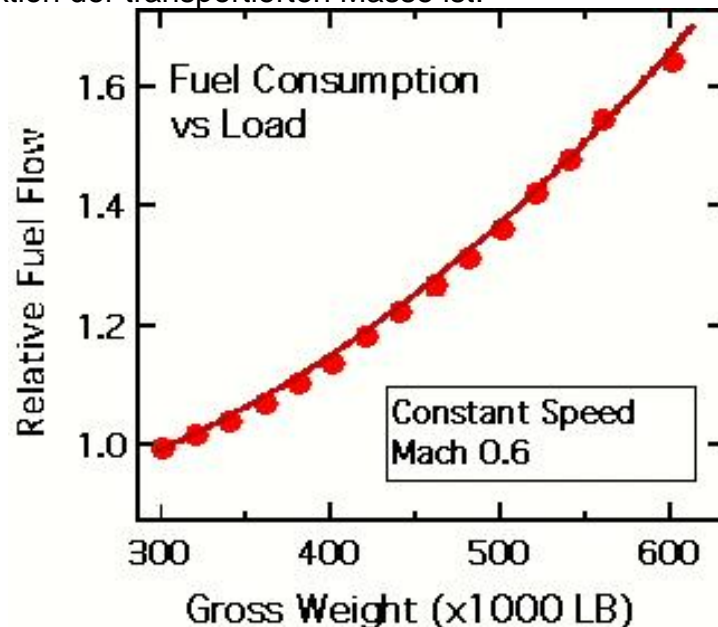


Erster Flug	17. Dezember 1903
Motor	1
Leistung	12CV (9kW)
Spannweite	12,29 m
Länge	6,43 m
Höhe	2,74 m
Flügelfläche	47,5 m <sup>2</sup>
Leergewicht	274 kg
Maximalgewicht (mit 1 Pilot)	338 kg
Höchstgeschwindigkeit	43 km/h

Tabelle 1: Photographie und technische Daten des Flyer der Gebrüder Wright.

Bei diesen ersten „Flugzeugen“, die als Abwandlung von Segelflugzeugen konzipiert wurden, war das Gewicht immer ein wesentliches Problem, hauptsächlich aufgrund der geringen Motorleistung.

Der Kraftstoffverbrauch hängt ebenfalls direkt mit dem Gewicht des Flugzeugs zusammen. Die Kurve in Abbildung 1 zeigt, dass bei einem Linienflugzeug bei gleichbleibender Geschwindigkeit der Treibstoffverbrauch, bis auf eine Konstante, eine Quadratfunktion der transportierten Masse ist.

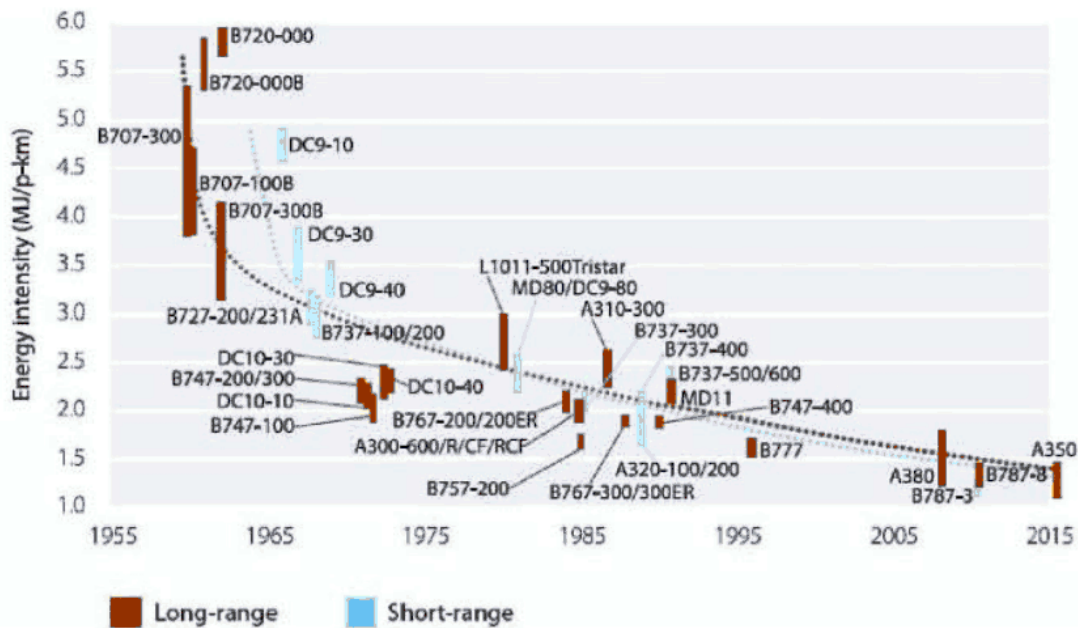


**Abb. 1:** Treibstoffverbrauch im Verhältnis zur Ladung für ein großes Transportflugzeug, das mit konstanter Geschwindigkeit fliegt.<sup>1</sup>

Nach einer Periode mit „billiger“ Energie im Zeitraum 1955 – 1965 haben die aufeinanderfolgenden Ölkrisen dazu geführt, dass der Verbrauch der Flugzeuge heutzutage drastisch reduziert wurde. Die Abbildung 2 zeigt, dass die modernen Flugzeuge bis zu viermal weniger Energie pro Passagier und km verbrauchen als 1960<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> <http://www.aviation-history.com/theory/lift.htm>

<sup>2</sup> <http://www.businessinsider.com/high-fuel-costs-help-boeing-and-airbus-2013-7>



Source: Lee, IATA

Abb. 2: Energieverbrauch der Flugzeuge von 1955 bis 2015.

Es ist interessant, den Anteil an zum Bau der Struktur der modernen Flugzeuge verwendeten Komposite zu vergleichen (Abb. 3) und die Korrelation zwischen diesem Anteil und dem Energieverbrauch zu beobachten.

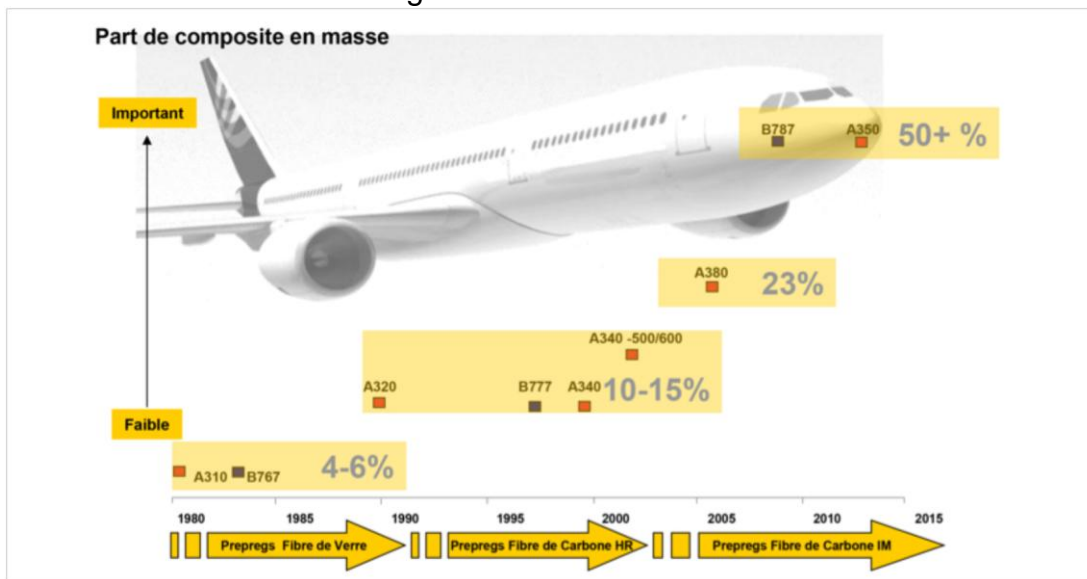


Abb. 3: Komposite-Anteil in der Struktur von modernen Zivilflugzeugen.<sup>3</sup>

Zusammenfassend ist ein geringes Gewicht in der Luftfahrt noch stärker als in anderen Bereichen ein wesentlicher Parameter zur Reduzierung des Energieverbrauchs und somit der Kosten und der ökologischen Auswirkungen.

## Struktur-Werkstoffe

Die Werkstoffe, die beim Bau von Flugzeug-Strukturen verwendet werden, müssen nicht nur leicht sein, sondern auch steif, widerstandsfähig und belastbar (stoßfest).

<sup>3</sup> [http://asso-acit.fr/wp-content/uploads/2013/07/GROUPE\\_HEXCEL\\_ACIT\\_20132.pdf](http://asso-acit.fr/wp-content/uploads/2013/07/GROUPE_HEXCEL_ACIT_20132.pdf)

Die Tabelle 2 zeigt jedoch, dass im allgemeinen die leichtesten Metalle auch die geringste Steifigkeit und Widerstandsfähigkeit haben.

	Dichte $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> )	Steifigkeit E (GPa)	Festigkeit $\sigma$ (MPa)	Spezifische Steifigkeit (E/ $\rho$ )
C (Diamant)	3,5	1000	1050	285
(CH <sub>2</sub> ) <sub>n</sub> Polyethylen	0,95	1	10-50	1,05
Aluminium (Al)	2,7	72	200-550	26,6
Titan (Ti)	4,5	110	800-1200	24,4
Stahl (Fe)	7,8	200	400-1800	25,6

Tabelle 2: Dichte, Steifigkeit, Zugfestigkeit und spezifische Steifigkeit von Strukturwerkstoffen.

Faser	Ex-PAN <sup>4</sup>			Ex-Pitch <sup>5</sup>	
	Ultra-hohe Festigkeit	Hohe Festigkeit	Hoch-Modul	Ultra- Hochmodul	Hohe Dehnbarkeit
Steifigkeit E (GPa)	291	221	521	940	41
Festigkeit $\sigma$ (GPa)	5,69	3,20	3,38	3,21	1,10
Spezifische Steifigkeit	146	111	261	470	21

Tabelle 3: (Zug)-Steifigkeit, Zugfestigkeit und spezifische Steifigkeit von elementaren Kohlenstofffasern<sup>6</sup> (Dichte: 2 kg/dm<sup>3</sup>).

Um Masse und Steifigkeit in Übereinstimmung zu bringen, sollte allerdings in spezifischen Größen gearbeitet werden, also bei gleicher Dichte. Damit erhält man die vierte Spalte der Tabelle 2. Dort kann man feststellen, dass die üblichen Metalle eine ähnliche spezifische Steifigkeit aufweisen, Kohlenstoff (Diamant) jedoch eine mehr als zehnmals höhere spezifische Steifigkeit hat als Metalle. Bei sp<sup>2</sup>-Kohlenstoffen (aus Graphen-Ebenen bestehende Kohlenstofffasern), die nach den C-C – Verbindungen ausgerichtet sind, sind die Werte auch sehr hoch, wie Tabelle 3 zeigt. Die beste spezifische Steifigkeit ist also von Werkstoffen zu erwarten, die gerichteten Kohlenstoff verwenden. Darauf beruht der massive Einsatz von Verbundwerkstoffen auf Kohlenstofffaserbasis in der Luftfahrt.

Die Stoßfestigkeit (Belastbarkeit) der in der Luftfahrt verwendeten Strukturwerkstoffe ist ein wichtiger Parameter. Bei den Geschwindigkeiten, mit denen die heutigen Flugzeuge fliegen, kann der kleinste Gegenstand Schäden verursachen, die manchmal fatale Folgen haben können (Abb. 4). Der bekannteste Fall sind die Vögel, die bei Start oder Landung gegen die Flugzeuge prallen. Die Belastbarkeit der Kohlenstoff-Epoxid-Komposite, die wesentlich geringer ist als bei Metallen, ist ein Problem, das derzeit Gegenstand von Forschungen ist. Ein Lösungsweg besteht

<sup>4</sup> Fabriquée à partir de PolyAcryloNitrile (PAN)

<sup>5</sup> Fabriquée à partir de brai (Pitch)

<sup>6</sup> Naito K., Tanaka Y., Yang J.M., Kagawa Y., from : <http://www.iccm-central.org/Proceedings/ICCM17proceedings>

darin, die Belastbarkeit der Thermoplaste mit der Steifigkeit und der einfachen Verarbeitung von Duroplasten zu verbinden<sup>7, 8</sup>.



Abb. 4: Aufprall eines Vogels auf die Tragfläche eines Flugzeugs mit Metallstruktur.

Andere Eigenschaften wie die elektrische Leitfähigkeit der Strukturen werden immer wichtiger, sobald in der Struktur der Anteil an Metallen, die eine gute Leitfähigkeit haben, abnimmt. Somit wird das Verhalten von Flugzeugen bei Blitzschlag durch die weniger leitfähigen neuen Verbundwerkstoffe derzeit zum Problem (Abb. 5). Die Beständigkeit gegen Blitzschlag, wobei zusätzliches Gewicht soweit als möglich vermieden werden soll, ist ein Thema, das noch einigen Forschungsaufwand erfordert. Die derzeit angebotenen Lösungen werden in Tabelle 4<sup>9</sup> aufgeführt.

Lösungen	Aluminium	Kupfer	Bronze
Metallgitter		X	X
Streckmetall	X	X	X
Metallfolie	X	X	
Metallisierung	X	X	X

Tabelle 4: Zur Blitzbeständigkeit von Kompositen vorgeschlagene Lösungen.

<sup>7</sup> PRIFORM® de CYTEC <https://www.cytec.com/businesses/aerospace-materials/brands/priform>

<sup>8</sup> SKYWIN, projet « Plan Marshall », projets APC, ECOM, ECOTAC, ICOGEN

<http://www.skywin.be/?q=fr/projets-labelisés>

<sup>9</sup> Bréchet Y., cité dans : « Matériaux aéronautiques d'aujourd'hui et de demain ». Académie Air espace, Dossier #39 juin 2014 (<http://www.academie-air-espace.com/publi/newDetail.php?varID=235>)



a)



b)



Abb. 5 :a)\_Verteilung der elektrischen Ladung eines Blitzes auf einem Flugzeug mit Metallstruktur. b) Spur eines Blitzeinschlags, der im Labor an einer Komposite-Struktur ausgeführt wurde<sup>10</sup>.

## Flugzeugteile aus Komposite

---

In den modernen Linienflugzeugen erhöht sich ständig der Anteil an Kompositen mit organischer Matrix (CMO) bei den Strukturteilen. Die Profilnasen der Tragflächenvorderkante, die Querruder und Auftriebsbeihilfen werden schon seit langem aus Kompositen hergestellt (Abb. 6).

<sup>10</sup> <http://blog.dexmet.com/>



Abb. 6: Montage des hinteren Querruders der Boeing 787 Dreamliner

Derzeit ist die Struktur des Flugzeuges betroffen. In der BOEING 787 DREAMLINER wird der Rumpf selbst weitgehend aus Kompositen hergestellt (Abb. 7)  
Die europäischen Flugzeugbauer stehen dem in nichts nach, der AIRBUS A350, ein Konkurrent der BOEING 787, hat selbst auch einen Rumpf aus Komposite (Abb. 8).



Abb. 7: Teil des Rumpfes der BOEING 787 Dreamliner







Abb. 9: Prototyp eines Gleichrichters aus Komposite für Niederdruckkompressor (TechSpace aero, Safran Gruppe)<sup>11</sup>

Komposite werden jedoch bei Triebwerken deutlich immer mehr verwendet, wie die Abbildung 10 zeigt.

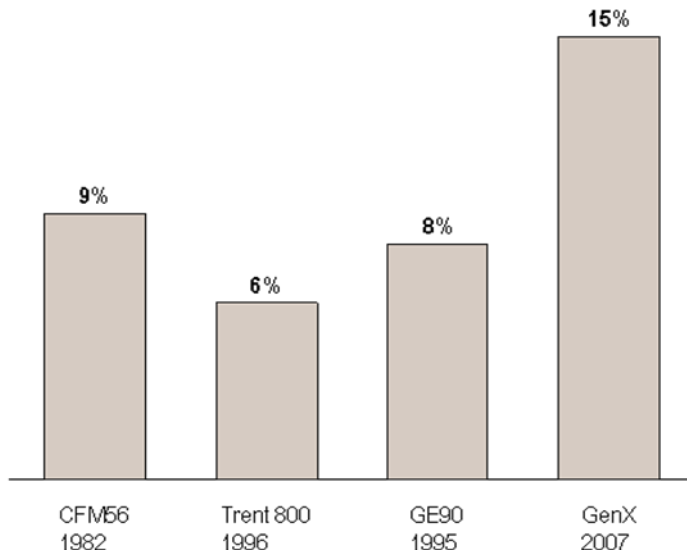


Abbildung 10: Komposite-Anteil bei Flugzeugmotoren<sup>12</sup>

CFM56 : Safran Gruppe: Lüfterflügel

Trent 800 : RollsRoyce : Lüfterflügel

GE90 : General Electric : Lüfterflügel

GenX : General Electric : Lüfterflügel und –Gehäuse

## Herstellungstechniken

---

Die in der Luftfahrt verwendeten Duroplaste hängen von den Auflagen der Leistungshefte des jeweiligen Teils ab (mechanische Widerstandsfähigkeit, Betriebstemperatur, Feuerfestigkeit...) (Abb. 11).

<sup>11</sup> <http://www.techspace-aero.be/-composites->

<sup>12</sup> Source : Company websites; Industry literature

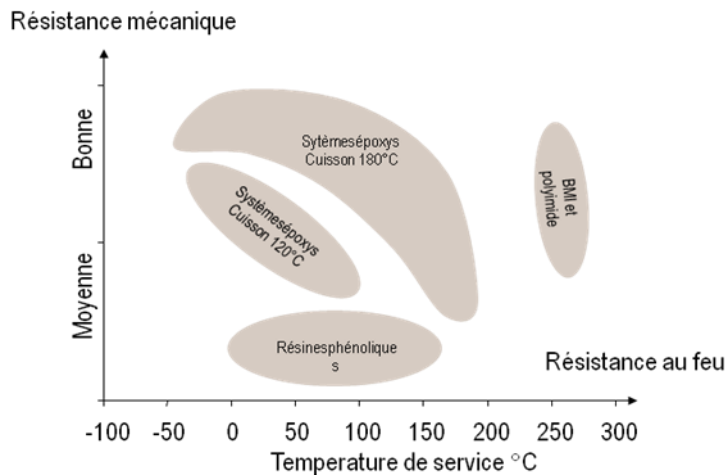


Abb. 11: in der Luftfahrt verwendete Duroplast-Arten<sup>13</sup>

Die Phenoplaste werden eher für Teile im Flugzeuginneren eingesetzt, die Epoxidharze für Sekundärstrukturen und immer öfter auch in Primärstrukturen und die BMI-Harze dort, wo die Temperaturbeständigkeit kritisch ist, in der Umgebung der Motoren.

Die Beschichtungstechniken im Handlegeverfahren (Hand Layup) können bei großen Strukturteilen nicht eingesetzt werden, sie werden immer öfter durch automatische Auflegetechniken, die sogenannte Prepreg-Technologie (ATL Automated Tape Layup) oder die automatisierte Faserpositionierung (AFP Automated Fibre Placement) (Fig. 12) ersetzt.



Abb. 12: Automatische Faserpositionierung (AFP) (Dok. Sonaca)

Die Autoklav-Techniken (Abb.13), eine verbesserte Variante der Infusionstechnik (bag-moulding), welche die Herstellung von Teilen mit einem Minimum an Mängeln (voigts) ermöglichen, sind weit verbreitet.

<sup>13</sup> Source: Hexcel, press reports, expert interviews



Abb. 13: für Luftfahrtteile verwendete Autoklaven (Dok. Sonaca)

Die Einspritzverfahren unter Druck wie das RTM (Resin Transfer Molding) (Abb.14) und seit kurzem das SQRTM<sup>14</sup>(Same Qualified Resin Transfer Molding) sind ebenfalls weit verbreitet.

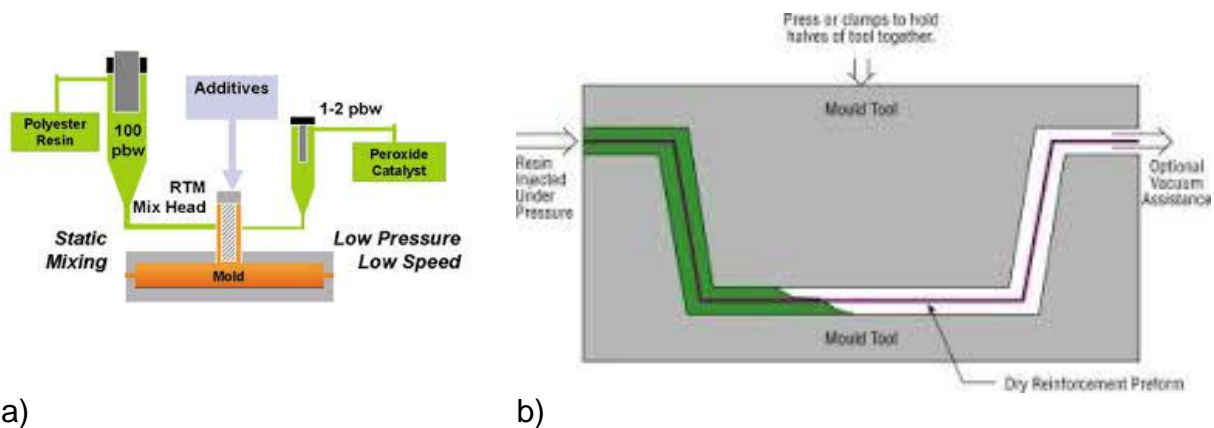


Abb. 14: RTM : a) Anlagenschema b) Funktionsprinzip

Das SQRTM ist eine neue Technik, die aus dem RTM abgeleitet wurde und bietet die Möglichkeit, einen zusätzlichen Qualifizierungsschritt zu sparen, indem beim Druckaufbau ein Harz verwendet wird, das mit dem für Prepregs benutzten identisch ist. Diese Qualifizierung ist eine detaillierte Prozedur (also zeitaufwendig), die zur Kontrolle der Materialeigenschaften und Verfahren dient, die bei primären und sekundären Flugzeugstrukturen umgesetzt werden<sup>15</sup>.

<sup>14</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Out\\_of\\_autoclave\\_composite\\_manufacturing](http://en.wikipedia.org/wiki/Out_of_autoclave_composite_manufacturing)

<sup>15</sup>: Report available at the Federal Aviation Administration. William J. Hughes Technical Center's Full-Text Technical Reports : [http://www.faa.gov/about/office\\_org/headquarters\\_offices/ang/offices/tc/library/](http://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ang/offices/tc/library/)



## Ausblick

---

Der Bereich der Verbundwerkstoffe für die Luftfahrt wird sich weiterhin stark entwickeln, insbesondere aufgrund der Einführung von Nanokompositen, Hybridwerkstoffen, Aerogels, usw.<sup>16</sup>

Copyright +Composites Konsortialpartner

---

<sup>16</sup> Meador, M., A., NASA, Polymeric Materials for Aerospace Power and Propulsion- NASA Glenn Overview