

# Zusammenfassung der Arbeiten an der JetCat P60 SE S/N 7184

Die hier beschriebenen Abläufe umfassen alle Arbeiten die getan wurden um das Triebwerk S/N 7184 wieder auf ein höheres Schubniveau zu bringen.

## Historie

Das Triebwerk JetCat P60 SE S/N 7184 wurde bei ebay gebraucht gekauft. Der Verkäufer gab an, dass das Triebwerk frisch aus der Wartung bei JetCat kommen würde. Eine Sichtinspektion nach Erhalt der Lieferung ergab einen gewissen Zweifel an dieser Aussage. Der Verdichter hatte Einschlagmarken von kleineren Fremdkörpern an den Laufschaufelvorderkanten ( Abbildung 2). Das Triebwerk wurde teilzerlegt, d.h. die Schubdüse und das Brennkammergehäuse sowie der Einlauf wurden entfernt, siehe Abbildung 1.



Abbildung 1 zerlegtes Triebwerk nach Kauf

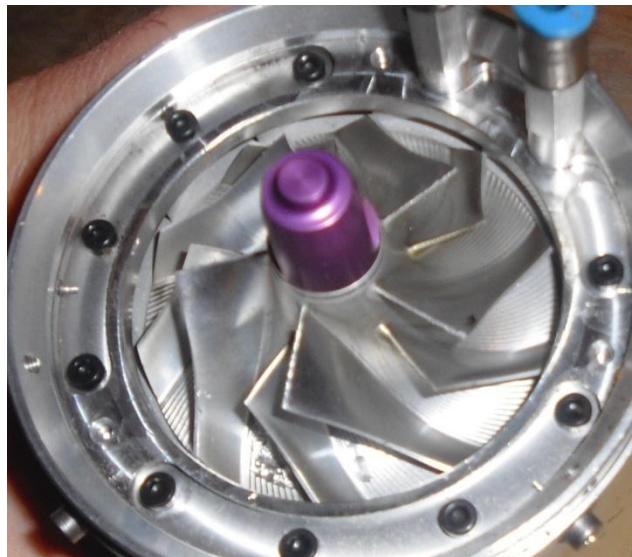


Abbildung 2 Verdichter mit Einschlagsmarken

Dabei wurde im Inneren des Brennkammergehäuses braune bis schwarze Ablagerungen gefunden (Abbildung 3).

Diese ließen sich mit einem Lappen im vorderen Teil entfernen. Im hinteren Teil, im Bereich des Flansches zur Turbine hin, konnte ein Teil mit Hilfe von Schleifleinen entfernt werden, siehe Abbildung 4. Da das Brennkammergehäuse eine Aufdickung an der Innenseite hat, wurde hier ein Druckanschluss gesetzt. Dazu wurde ein M3 Gewinde als Durchgangsgewinde in das Brennkammergehäuse gebohrt und ein Festoanschluss eingeschraubt. Anschließend wurde das Triebwerk wieder zusammengebaut. Es wurde ein Testlauf auf einem Prüfstand durchgeführt. Gemessen wurde dabei nur, was die ECU an Werten ermittelt: Drehzahl, EGT. Das Triebwerk startete problemlos und ließ sich im gesamten Drehzahlbereich regeln. Der Druckluftanschluss war dabei verschlossen.



**Abbildung 3 Ablagerungen innen im Brennkammergehäuse**



Aufdickung in die der Druckanschluss  
eingebracht wurde

**Abbildung 4 Brennkammergehäuse nach Reinigung**

Daraufhin wurde das Triebwerk in ein Flugzeug (Sting EVO) eingebaut. Beim ersten Probelauf im Flugzeug kam es zu einer Havarie durch einen Brand. Im Rahmen der Reichweitentests sollte das Triebwerk gestartet werden. Allerdings gelangen die Starts nicht und wurden manuell abgebrochen.

Es wurden ca. 4 Startversuche unternommen. Das Flugzeug wurde nach den Startversuchen senkrecht aufgestellt und es lief überschüssiges Kerosin aus dem Schubrohr. Anschließend wurde das Flugzeug auf dem Rücken aufgebockt und der Flügel abgenommen, da nur so ein direkter Zugang zum Triebwerk möglich ist. Der folgende Startversuch erfolgte unter Flammenbildung aus der Schubdüse des Triebwerks in das Schubrohr des Flugzeugs. Dabei muss sich Kerosin, welches auch außerhalb des Schubrohres und im Rumpf befunden hat, entzündet haben. Der Start wurde manuell abgebrochen und das Feuer gelöscht. Die Inspektion des Triebwerkes ergab lediglich im Bereich des Starters Anzeichen von zu hoher Temperatur sowie ein versenktes Glühkerzenkabel, siehe Abbildung 5. Der Kunststoff des Starters war etwas Versenkt. Das Kabel des Kerosinstarters wurde ausgetauscht. Die Schäden am Flugzeug sind nicht Bestandteile dieses Berichts, konnten aber alle repariert werden.



**Abbildung 5 Zustand des Triebwerkes nach der Havarie. Die Kappe des Starters ist zur Inspektion abgenommen.**

Als Ursache für die Havarie konnte die Einbaulage des Triebwerkes ermittelt werden. Die Glühkerze des Kerosinstarts zeigte nach unten in etwa bei 7 Uhr, Blick in Flugrichtung. Alle bisherigen Testläufe erfolgten mit einer Ausrichtung der Glühkerze nach oben, zwischen 11 und 2 Uhr. Da die Einbaulage im Flugzeug aufgrund der schon verlegten Kabel zwischen ECU und Triebwerk und deren genau passenden Länge nicht verändert werden sollte, wurde das Triebwerk auf Gasstart umgebaut. Ein Gasanschluss befand sich schon am Triebwerk. Leider ließ sich die Startart in der ECU nicht ändern. Daher wurde die Gasleitung über ein T-Stück einerseits direkt zum Gasanschluss des Triebwerks geführt und andererseits zum Kerosinstart. Ein Testlauf ergab keine Probleme mit dieser Startart. Das Gas wurde dabei manuell geöffnet und nach dem Start auch wieder geschlossen. Es kam kein Ventil, welches von der ECU gesteuert wurde, zum Einsatz.



Nach dem erneuten Einbau in das Flugzeug erfolgte ein erfolgreicher Bodenlauf. Der Erstflug mit dem Flugzeug ergab allerdings ein sehr enttäuschendes Flugverhalten. Der Startlauf betrug ca. 80m und die Steigraten waren sehr gering (Steigwinkel ca. 15 – 20 °). Es wurde ein Schubtest mit eingebautem Triebwerk durchgeführt. Dafür wurde eine Küchenwaage mit einem Messbereich bis 15 kg senkrecht an eine Wand gestellt und das Flugzeug drückte, auf den eigenen Rädern stehend, mit der Nase gegen die Waage. Dabei wurde lediglich ein Schub von 4kg (~39N) ermittelt. Um einen Fehler bei der Waage auszuschließen wurde diese mit kalibrierten Normgewichten aus dem Laborbereich getestet. Dabei konnte keine Abweichung der Anzeige festgestellt werden. Um herauszufinden ob der Schubverlust durch den Einbau des Triebwerks im Flugzeug oder im Triebwerk selber zu suchen ist, wurde das Triebwerk wieder ausgebaut und der Prüfstand für Schubmessungen modifiziert. Für die Messung des Schubes kommt die gleiche Personenwaage zum Einsatz. Die Schubmessung auf dem Prüfstand ergab lediglich 3,9 kg (~38N). Damit hat das Triebwerk nur 60 % des laut Hersteller angegebenen Wertes von 62N. Versuchshalber wurde der Druckluftanschluss mit einem Ventil versehen, welches während des laufenden Triebwerkes geöffnet und geschlossen werden konnte. Es konnte dabei kein Einfluss auf das Laufverhalten sowie auf den Schub festgestellt werden, unabhängig davon ob das Ventil offen oder geschlossen war.

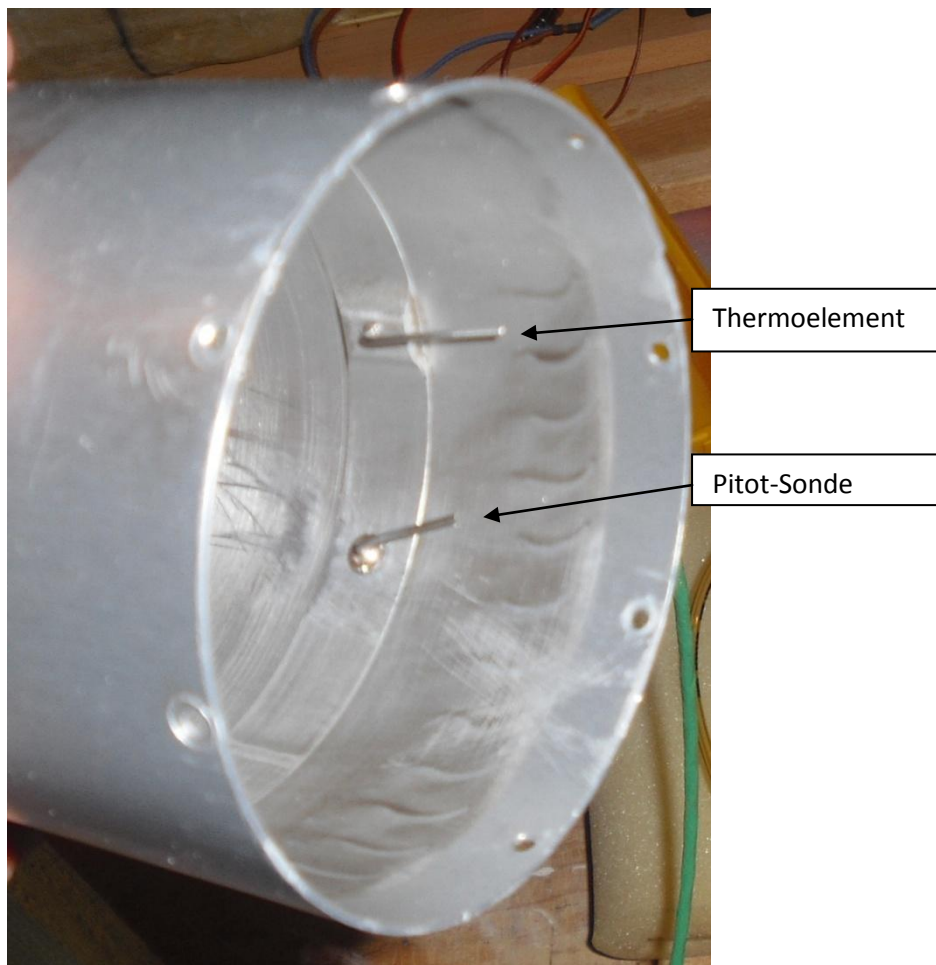
### **Veränderungen am Triebwerk**

Das Triebwerk wurde zerlegt um den Verdichter als Bauteil freizulegen. Dabei wurde nur die Verdichtermutter (Spinner) geöffnet, nicht die Turbinenmutter. Die Brennkammer und der Turbinenleitapparat blieben montiert. Am Verdichter wurden die Schaufelvorderkanten mit einer Schlüsselfeile und mit Schleifpapier geglättet um die Einschlagstellen der Fremdkörper zu entfernen (Abbildung 6). Anschließend wurde das Triebwerk wieder zusammengebaut und im montierten Zustand gewuchtet. Das Ergebnis des Schubtests war wieder 3,9 kg (~38N).



**Abbildung 6** Zustand des Verdichters nach dem abschleifen der Laufschaufelvorderkanten

Um mehr Testdaten zu erhalten wurde das Triebwerk instrumentiert. Dabei wurde durch den Druckluftanschluss ein Thermoelement Typ K eingeführt, welches in eine durchbohrte M3-Schraube eingelötet ist. Das Ende des Thermoelements ist in der Verdichterleitapparatsaustrittsebene. Es wurde ein zusätzliches 3mm-Loch für eine Pitotsonde gebohrt. Diese besteht aus einem 1,5mm-Stahlröhrchen welches ebenfalls in einer durchbohrten M3-Schraube verlötet ist. Das Pitotrohr endet ebenfalls in der Ebene des Verdichterleitapparataustritts und ist ca. 15 ° relativ zur Maschinenachse verdreht. Dadurch ist es in etwa an die lokale Strömungsrichtung angepasst. Die Instrumentierung ist in Abbildung 7 dargestellt. Mit diesem Setup wurde ein erneuter Testlauf durchgeführt. Das Ergebnis ist in Tabelle 1 dargestellt.



**Abbildung 7** Instrumentierung am Verdichteraustritt

Es konnte keine Messung des Luftmassenstroms durchgeführt werden. Das ermittelte Druckverhältnis ist mit 2,54 höher als vom Hersteller mit 2,0 angegeben. Dies kann aber auf die Messmethode zurückgeführt werden. Vermutlich hat der Hersteller nur eine statische Druckmessstelle im Brennkammergehäuse verwendet und hat damit ein statisch-zu-totales Druckverhältnis gebildet. Dieses ist kleiner als das hier dargestellte total-zu-totale Druckverhältnis.

Datum:	04.03.2015				
Verdichter:	original				
Temp	19	°C	c <sub>pv</sub>	1004	J/kgK
Druck	960	hPa	R	287	J/kgK
Messung mit originaler Düse (ohne Innenkegel) (altes Thermo bei EGT!)					
Drehzahl [U/min]	Druck P3 [bar rel]	Temp. Tt3 [°C]	Schub [kg]	EGT [°C]	
165000	1,48	148	3,9	469	
Umgerechnet in SI					
Druck P3 [Pa abs]	Temp. Tt3 [K]	Schub [N]	Temp. Tt2 [K]	EGT [K]	
244000	421,15	38,259	292	742,15	
Berechnete Werte					
η <sub>pol</sub> -Verdichter	PI-Verdichter				
0,728	2,54				

**Tabelle 1 Messung mit originalem Verdichter und Düse**

### Simulation durch Leistungsrechnung

Um die Messergebnisse besser interpretieren zu können und den Einfluss der nicht gemessenen Größen zu ermitteln wurde ein Leistungsrechnungsmodell des Triebwerkes erstellt. Das Ergebnis ist in Tabelle 2 dargestellt.

Bei der hier dargestellten Rechnung handelt es sich um eine Auslegungsrechnung. Dabei wurden verschiedene Parameter wie z.B. der Verdichterwirkungsgrad und das Verdichterdruckverhältnis vorgegeben. Andere Parameter wie. z.B. der Turbinenwirkungsgrad oder die Düsenkoeffizienten wurden von anderen Triebwerken übernommen. Der Massenstrom wurde iterativ soweit reduziert, bis der berechnete Schub dem gemessenen entsprach. Eine Kontrollgröße für die ganzen Annahmen stellt die Düsenfläche dar, welche bei der hardware 0,001256 m<sup>2</sup> beträgt (40mm Durchmesser). Im Vergleich dazu ist die berechnete Düsenfläche mit 0,001187 m<sup>2</sup> um 5,49% zu klein. Dies kann entweder an einem zu groß angenommenen Bleedmassenstrom oder an anderen Düsenkoeffizienten liegen. Die Düsenkoeffizienten wurden von der Düse einer P200 übernommen. Diese hat, im Gegensatz zur P60, allerdings einen Innenkonus, weshalb die Koeffizienten etwas zu gut sein dürften. Die berechnete Abgastemperatur (EGT) ist mit 912K auch deutlich größer als die gemessene mit 742K. Dies kann einerseits an einem zu schlecht angenommenen Turbinenwirkungsgrad liegen und liegt ganz sicher an einer falschen Messung. In einem anderen Projekt wurde eine Abweichung zwischen ECU-EGT-Werten und einer Referenzmessung von ca. 100K festgestellt.

Die Rechnung ist für die bessere Vergleichbarkeit mit den Umgebungswerten des Tests durchgeführt worden. Rechnet man den Schub von 39,19 N um auf ISA-Bedingungen so erhält man einen Schub von 41,35N.

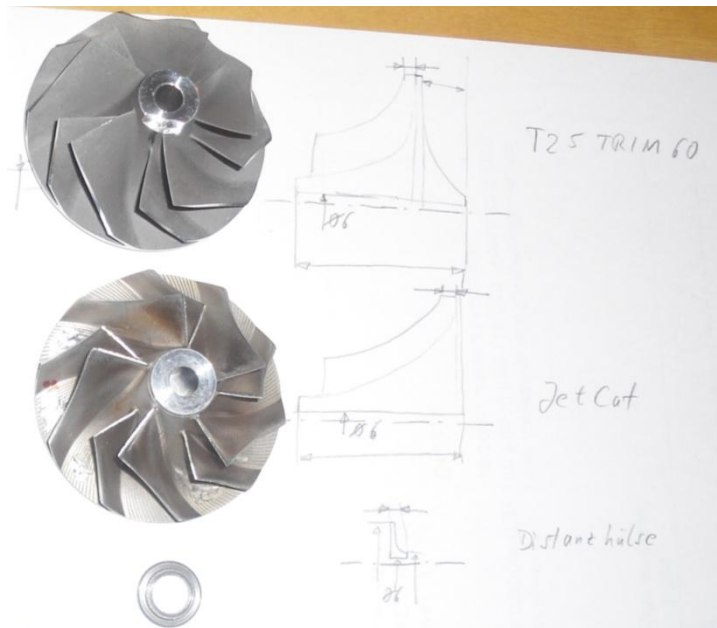
Turbojet Alt= 453m ISA + 7 C 40% Relative Humidity

Station	W kg/s	T K	P kPa	WRstd kg/s	
amb		292,00	96,000		FN = 0,04 kN
1	0,135	292,00	96,000		TSFC = 53,4086 g/(kN*s)
2	0,135	292,00	95,040	0,145	FN/W2 = 290,61 m/s
3	0,135	420,03	241,402	0,068	Prop Eff = 0,0000
31	0,110	420,03	241,402		eta core = 0,0906
4	0,112	1100,00	229,332	0,097	
41	0,119	1064,56	229,332	0,101	WF = 0,00209 kg/s
49	0,119	938,27	123,963		s NOx = 0,05052
5	0,126	912,62	123,963	0,183	XM8 = 0,6024
6	0,126	912,62	121,484		A8 = 0,0012 m²
8	0,126	912,62	121,484	0,187	P8/Pamb = 1,2655
Bleed	0,011	420,03	241,401		WBld/W2 = 0,08414
-----					
P2/P1 =	0,9900	P4/P3 =	0,9500	P6/P5	0,9800
Efficiencies:	isent	polytr	RNI	P/P	
Compressor	0,6911	0,7280	0,923	2,540	CD8 = 0,7880
Burner	0,9500		0,950		W_NGV/W2 = 0,05000
Turbine	0,8500	0,8400	0,488	1,850	WCL/W2 = 0,05000
-----					
Spool mech Eff	0,9900	Nom Spd	165000 rpm	PWX	= 0,00 kW
-----					
hum [%]	war0	FHV	Fuel		
40,0	0,00572	43,124	Generic		
Composed Values:					
1: FN*1000	= 39,196101				
2: A8*1000	= 1,186772				
3: SFC/277,77	= 0,192276				

Tabelle 2 Leistungsrechnung, Designrechnung mit Messwerten

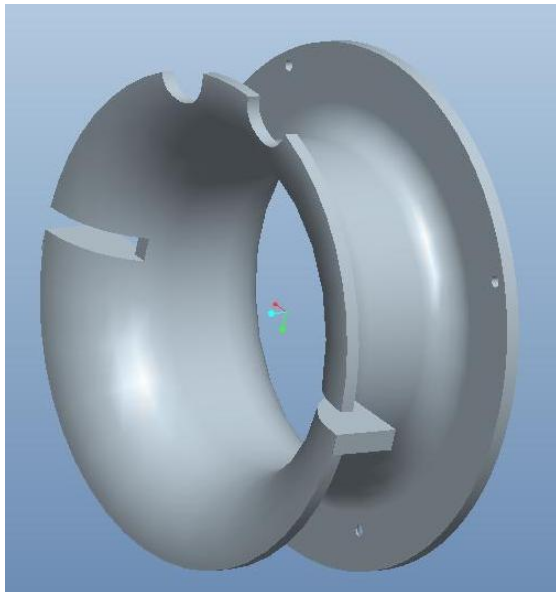
## Neuer Verdichter

Um auf die gemessenen Schubwerte zu kommen, musste bei der Leistungsrechnung der Luftmassenstrom auf einen Wert von 0,145kg/s abgesenkt werden. Er ist damit um 10% kleiner als vom Hersteller mit 0,16kg/s angegeben. Außerdem erscheint der Verdichtereffizienzgrad relativ niedrig. Um diese Effekte zu beheben wurde ein neuer Verdichter beschafft. Der Verdichter Garret T25-TRIM60 hat die gleichen Schaufelabmessungen wie das originale Verdichterrad, besitzt aber einen anderen TRIM bei gleichem Außendurchmesser. Das neue Verdichterrad wird als Druckguss aus Aluminium hergestellt während das originale aus Aluminium gefräst wird. Ein Vergleich der beiden Verdichterräder ist in Abbildung 8 dargestellt.



**Abbildung 8 originaler und neuer Verdichter. Unten der Originale**

Da die Außenkontur durch den geänderten TRIM nicht mehr mit dem originalen Verdichtergehäuse übereinstimmt, musste ein neues Verdichtergehäuse hergestellt werden. Diese wurde im CAD konstruiert und mittels Rapid-Prototyping als SLM-Bauteil aus Kunststoff 3D-gedruckt, (Abbildung 9).



**Abbildung 9 CAD-Zeichnung des neuen Verdichtergehäuses**

Mit dem neuen Verdichter wurde ein Schubtest durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3 dargestellt. Bei diesem Test wurde auch eine neue Schubdüse verwendet, welche bei gleichen äußeren Abmessungen und Endquerschnitt, zusätzlich einen Kegel im Inneren hat. Es wurde außerdem ein neuer Temperatursensor für die EGT verbaut.



Datum:	16.06.2015				
Verdichter	neu				
Temp.	25	°C	c <sub>pv</sub>	1004	J/kgK
Druck	966	hPa	R	287	J/kgK
Messung mit neuer Düse mit Innenkegel					
Drehzahl [U/min]	Druck P3 [bar rel]	Temp. Tt3 [°C]	Schub [kg]	EGT [°C]	
161000	1,25	160,7	3,265	834	
Umgerechnet in SI					
Drehzahl [U/sec]	Temp. Tt3 [K]	Schub [N]	Temp. Tt2 [K]	EGT [K]	
2683,333	433,85	32,03	292	1107,15	
Berechnete Werte					
η <sub>pol</sub> -Verdichter	PI-Verdichter				
0,602	2,302				

**Tabelle 3 Schubmessung mit neuem Verdichter T25-TRIM60**

Der Schub ist auf einen Wert von 32N gesunken. Umgerechnet auf ISA-Bedingungen beträgt er 33,6N. Das Druckverhältnis ist auf 2,3 gesunken, während die EGT auf 1107K gestiegen ist und damit das obere Limit erreicht hat. Die maximal mögliche Drehzahl von 165000 U/min konnte nicht erreicht werden. Der Verdichterwirkungsgrad ist auf 60,2% abgesunken. Das Beschleunigungsverhalten muss als schlechter bezeichnet werden.

Die Veränderungen mit diesem Verdichter haben keine Verbesserung des Schubes bewirkt.

### Modifikation des neuen Verdichters

Eine letzte Möglichkeit bestand in der Anpassung des TRIMS des neuen Verdichters auf die Werte des originalen Verdichters. Dazu wurde der Verdichter in seiner Außenkontur abgedreht und auf die Maße des originalen Einlaufs angepasst. Es wurde ein radialer Kaltpalt von ca. 0,1 mm eingestellt. Die Ergebnisse des Testlaufs sind in Tabelle 4.

Datum:	21.10.2015				
Temp.	17	°C	cpv	1004	J/kgK
Druck	966	hPa	R	287	J/kgK
<b>Messung mit originaler Düse (mit Innenkegel)</b>					
<b>Drehzahl [U/min]</b>	<b>Druck P3 [bar rel]</b>	<b>Temp. Tt3 [°C]</b>	<b>Schub [kg]</b>	<b>EGT [°C]</b>	
164400	1,35	150,9	3,1	750	
Umgerechnet in SI					
<b>Druck P3 [Pa abs]</b>	<b>Temp. Tt3 [K]</b>	<b>Schub [N]</b>	<b>Temp. Tt2 [K]</b>	<b>EGT [K]</b>	
231000	424,05	30,411	292	1023,15	
Berechnete Werte					
<b>η<sub>pol</sub> -Verdichter</b>	<b>PI-Verdichter</b>				
0,672751484	2,40625				

**Tabelle 4 Schubmessung mit neuem Verdichter T25-TRIM60, TRIM angepasst auf originalen Einlauf**

Das Verdichterdruckverhältnis ist im Vergleich zum originalen Verdichter auf einen Wert von 2,4 gesunken. Der Verdichtewirkungsgrad ist mit 67,2% kleiner als mit dem originalen Verdichter. Die EGT ist mit 750°C zwar im akzeptablen Bereich, aber höher als die Angabe des Herstellers. Der Schub ist mit 30N viel zu niedrig im Vergleich zu den Herstellerangaben und das trotz der relativ kühlen Umgebungstemperatur von 17°C.

### **Zusammenfassung**

Bei dem Triebwerk JetCat P60 SE S/N 7184 wurde ein deutlich zu geringer Schub festgestellt. Dieser lag mit dem originalen Verdichter mit 38N bei nur 60 % des laut Hersteller angegebenen Wertes von 62N. Es wurden diverse Modifikation an dem Triebwerk durchgeführt:

- originaler Verdichter an den Vorderkanten verschleifen
- neue Schubdüse mit Innenkonus
- neuer Verdichter T25-TRIM60 inklusive neues Verdichtergehäuse
- neuen Verdichter auf die alte Einlaufkontur abdrehen

Keine der hier diskutierten Modifikationen hat eine Verbesserung des Schubes bewirkt. Es muss davon ausgegangen werden, dass das hier vorliegende Triebwerk mit der S/N 7184 nie den vom Hersteller angegebenen Wert von 62N erreicht hat. Der Grund dafür ist unklar, könnte aber in Fertigungsvariationen liegen.

Esslingen, 21.10.2015

Dr.-Ing. Christian Koch