

# ZUKUNFTSSICHERUNG DER DEUTSCHEN TRIEBWERKSINDUSTRIE DURCH INNOVATIONEN

Dr. J. Sieber, Prof. Dr. K. Broichhausen, Dr. H. Scheugenpflug, Dr. E. Steinhardt, Dr. M. Welling  
 MTU Aero Engines  
 München

## ÜBERSICHT

Die Luftfahrtindustrie kann zwar auch in den nächsten Jahren mit einem steigenden Verkehrsaufkommen rechnen, muss sich jedoch auf große Marktschwankungen, zunehmende Umweltschutzforderungen und einen sich weiter verschärfenden Kostendruck einstellen. Um diesen Herausforderungen begegnen zu können, sind neue Technologien und Geschäftsprozesse notwendig.

Ein zielgerichteter Innovationsprozess, der die Technologieentwicklung nicht dem Zufall überlässt, muss daher das Ziel sein.

Der Innovationsprozess der MTU umfasst die Phasen: Ermittlung des Kundenbedarfs, Ideenfindung, Auswahl der richtigen Innovationen, zielgerichtete Erarbeitung der Technologien und schließlich die Sicherstellung der Überführung der Technologien ins Produkt.

Vorgelegt werden das Gesamtkonzept und die Werkzeuge des Innovationsprozesses sowie wesentliche Ergebnisse.

Der Technologie-Bedarf der MTU Produkte und Prozesse wird zu einem Teil bereits durch das in der Firma vorhandene Angebot an Innovationen abgedeckt, an vielen Stellen müssen jedoch gezielt neue Ideen entwickelt werden. In einem 3-stufigen Auswahlprozess, der fachlich, bedarfsbezogen und unternehmensbezogen geteilt ist, werden die Vorschläge, die die höchste Kundenzufriedenheit ermöglichen und technologische und geschäftliche Chancen nutzen, ausgewählt.

Die Entwicklung der Technologien wird schließlich über einen Gating-Prozess gesteuert. In den Gates werden Markt, Entwicklungsreife, Risiken, Budget und Ressourcen bewertet. Das Technologie-Gating ist eng mit dem Gating-Prozess der zugehörigen Produkte verzahnt, so dass ein schneller Marktzugang und eine Überführung der Technologien ins Produkt sichergestellt ist.

## 1. RANDBEDINGUNGEN

Für die Airlines steht bei einer Kaufentscheidung für neue Flugtriebwerke naturgemäß die Wirtschaftlichkeit des Produkts im Vordergrund. Die entscheidenden Parameter sind die Abschreibungen bzw. Zinsen und damit die Herstell- und Entwicklungskosten sowie die Wartungskosten und der Brennstoffverbrauch. BILD 1 zeigt den Verfall der Triebwerkspreise in der großen

Schubklasse. Der Kunde fordert eine Reduktion der Life Cycle Costs bis 2010 um 20 bis 30%.

Die Zuverlässigkeit von Flugtriebwerken wurde in den vergangenen 40 Jahren um den Faktor 10 erhöht. Wegen des steigenden Flugverkehrs wird eine Halbierung der Ausfallrate bis 2010 angestrebt.

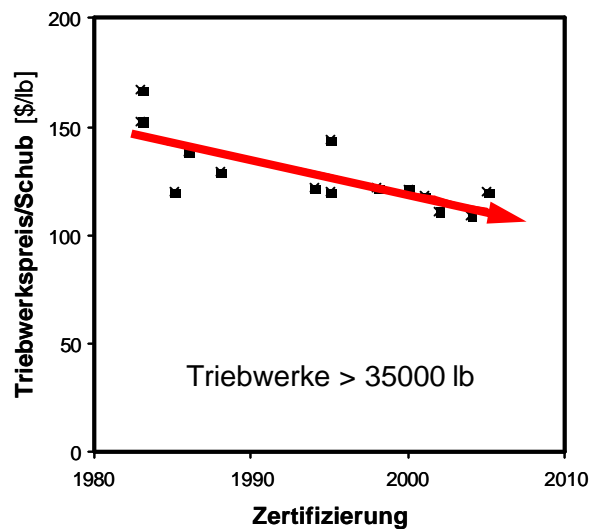


BILD 1: Verfall der Triebwerkspreise

Auch beim Brennstoffverbrauch bzw. den CO<sub>2</sub>-Emissionen konnten in den vergangenen Jahren beeindruckende Verbesserungen erzielt werden (BILD

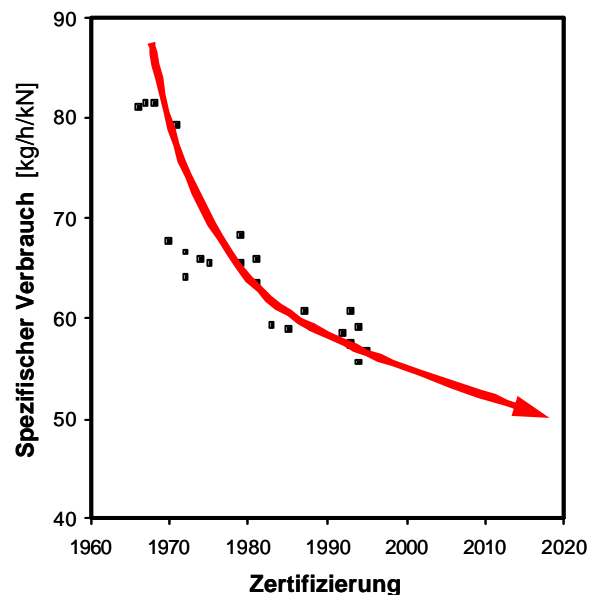


BILD 2: Entwicklung des spezifischen Brennstoffverbrauchs

Weitere Reduktionen in der gleichen Größenordnung sind nur noch mit Änderungen am Triebwerkskonzept möglich. Bis zum Jahr 2010 fordert der Kunde eine Reduktion des Brennstoffverbrauchs um 10%.

Beschränkungen der NO<sub>x</sub>-Emissionen und der Lärmemission haben zunehmend an Bedeutung erlangt. Bis 2010 wird eine Verringerung der NO<sub>x</sub>-Emissionen um 40% (relativ zu ICAO 96) und beim Lärm um 33 dB (relativ zu Stage 3 kumuliert) erwartet.

Die Entwicklung des Luftverkehrs ist gekennzeichnet durch langfristiges Wachstum bei gleichzeitig sehr großen Marktschwankungen (BILD 3). Die Auslieferungen von Flugzeugen in BILD 3 zeigen, dass die Hersteller ihre Kapazitäten sehr flexibel an die stark schwankende Nachfrage anpassen müssen.

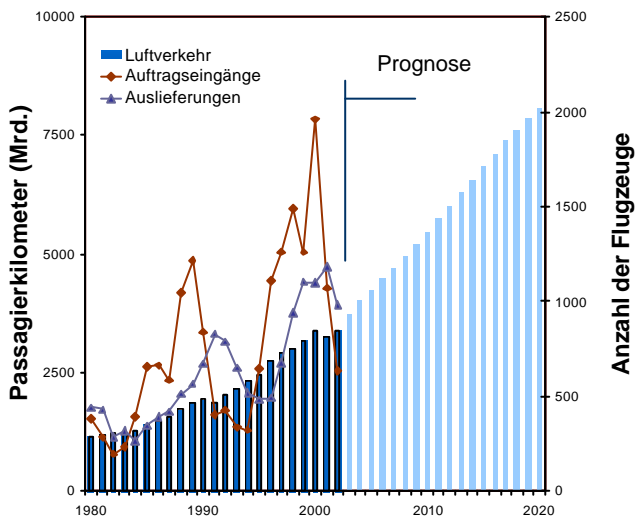


BILD 3: Entwicklung des Weltluftverkehrs sowie bestellte und ausgelieferte Flugzeuge

Die hohen Entwicklungskosten und niedrigen Verkaufspreise von neuen Triebwerken konnten bereits bisher nur über lange Zeit durch die Ersatzteilpreise finanziert werden. Diese langen Kapitalrückflusszeiten werden weiter steigen infolge hoher Entwicklungskosten, Konzessionen bei Serientriebwerken sowie verspätetem und sinkendem Ersatzteilkauf durch erhöhtes Teileleben.

Insgesamt müssen sich die Hersteller auf verschärfte Marktbedingungen und harte Kundenforderungen einstellen. Als Antwort auf diese Herausforderungen müssen neue Technologien bereitgestellt werden. Diese umfassen sowohl neue Konzepte und Komponententechnologien als auch neue Prozesse.

## 2. Der MTU Technologieprozess

### 2.1. Ziele

Um eine zielgerichtete Auswahl und Entwicklung der Technologien sicherzustellen, hat MTU in den letzten Jahren seinen Technologie-Prozess kontinuierlich weiterentwickelt.

Ziel des MTU Technologie-Prozesses ist es

- die Anforderungen und Erwartungen der Kunden zu erfüllen,
- die technologischen und geschäftlichen Chancen zu nutzen,
- eine hohe Innovationskraft zu erhalten,
- die Innovationen schnell in das Produkt einzuführen und
- einen möglichst hohen Anteil der entwickelten Technologien in das Produkt bzw. den Prozess einzuführen.

Die Vorgaben an den Technologie-Prozess für die Auswahl und Steuerung der Technologie-Projekte waren

- einfach, nachvollziehbar und wirkungsvoll
- klare Struktur und Aufgabenverteilung für die Beteiligten
- maximale Urteilsfähigkeit zur jeweiligen Fragestellung
- minimaler Aufwand für Meinungsbildung und Entscheidung

### 2.2. Phasen und Gremien

Der Technologie-Prozess kann grob in die 3 Phasen

- Technologie-Planung,
- Technologie-Entwicklung und
- Technologie-Transfer

unterteilt werden. In der Planungsphase wird zunächst der Technologie-Bedarf ermittelt, entsprechend dem Bedarf werden Technologie-Ideen (Innovationen) entwickelt und ausgearbeitet, schließlich bewertet und ausgewählt sowie die Finanzierung sichergestellt. Die eigentliche Entwicklung der Technologien teilt sich in eine Phase bis zur Entwicklung der Technologie-Reife und die anwendungsspezifische Weiterentwicklung

bis zur Produkt- bzw. Prozess-Reife. Die Technologie-Reife ist mit der erfolgreichen Erprobung eines Prototypen erreicht, während für die Produkt- bzw. Prozess-Reife sämtliche Erfordernisse für eine Serienproduktion und Zulassung erfüllt sein müssen. Mit Erreichen der Technologie-Reife geht die Verantwortung an den Kunden der Technologie (Triebwerksprogramm bzw. Prozess) über.

Die entscheidenden Schritte erfolgen in der Planungsphase, da hier die Weichen für die Zukunft gelegt werden. Die MTU hat deshalb die Meinungsbildung und Entscheidung im Technologie-Prozess eindeutig in 3 Stufen geteilt:

- fachbezogen
- produkt-/prozessbezogen und
- unternehmensbezogen.

Die fachlichen Fragestellungen umfassen die Bereitstellung von Problemlösungen zum Technologie-Bedarf, die fachliche Bewertung von Lösungsvorschlägen und die Entwicklung von innovativen Ideen außerhalb des definierten Bedarfs. Diese Aufgaben werden von Technologie-Fachteams bestehend aus Fachspezialisten bearbeitet.

Die Ermittlung des Technologie-Bedarfs und die bedarfsbezogene Bewertung von Lösungsvorschlägen ist Aufgabe der Produkt-/Prozessteams, die aus Vertretern der Programme zusammengesetzt sind (Kunden der Technologie).

Die unternehmensbezogene Sicht wird durch den Technologie-Ausschuss eingebracht, der aus Mitgliedern der Geschäftsführung besteht. Er legt das Technologie-Budget fest, entscheidet über die Durchführung der Technologie-Projekte und verantwortet die Technologie-Strategie.



BILD 4: Gremien des Technologie-Prozesses

### 2.3. Planung der Technologie-Projekte

Ausgangspunkt des Technologie-Prozesses ist die Ermittlung des Technologie-Bedarfs für die MTU Produkte und Prozesse (BILD 5).

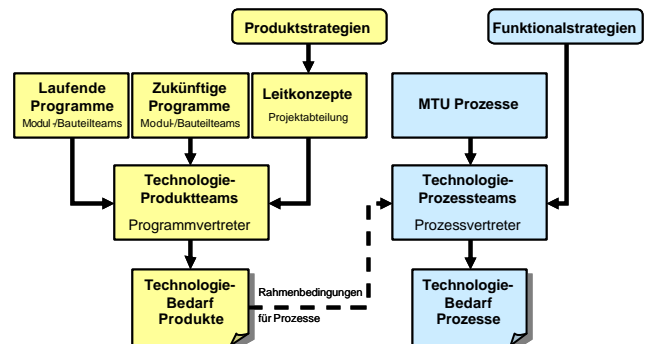


BILD 5: Ermittlung des Technologie-Bedarfs

Der Bedarf der laufenden und zukünftigen Triebwerksprogramme wird von den zuständigen Modul- und Bauteilteams abgefragt. Über die Produktstrategien sind die weit in der Zukunft liegenden Produkte festgelegt. Um diesen Technologie-Bedarf ermitteln zu können, werden Leitkonzepte definiert. Die Projektteilung erstellt dafür einen Konzeptentwurf und bestimmt den Technologie-Bedarf. Gesammelt und priorisiert wird der Technologie-Bedarf der Produkte schließlich von den zuständigen Technologie-Produktteams.

In gleicher Weise sind die Technologie-Prozessteams für den Technologie-Bedarf der MTU-Prozesse zuständig. Der Technologie-Bedarf wird von den MTU Prozessen benannt, aus Vorgaben der Strategien ermittelt sowie aus neuen Produkttechnologien abgeleitet.

Im nächsten Schritt werden die priorisierten Technologie-Bedarfe den zuständigen Technologie-Fachteams zugeteilt, die die Entwicklung von Technologie-Ideen (Innovationen) einleiten. In der Regel werden in den Fachteams Innovations-Workshops durchgeführt. Die Fachteams werden dabei durch interne und externe Spezialisten unterstützt. Die Ausarbeitung der Ideen zu aussagekräftigen Vorschlägen wird an die Fach-abteilungen delegiert.

Die Technologie-Vorschläge werden nun in einem 3-stufigen Auswahlprozess bewertet (BILD 6):

#### 1. Fachliche Bewertung

Die fachliche Bewertung wird von den Technologie-Fachteams durchgeführt, die Nutzen, Kosten, Termine und Risiken des Technologie-Vorschlags bewerten. In der Regel sind diese Vorschläge nur Teilaufgaben eines Projekts und es existieren häufig konkurrierenden Ideen zum gleichen Problem. Aufgabe des Fachteams ist

daher auch die Definition von Technologie-Projekten aus den vorliegenden Technologie-Vorschlägen.

### 2. Bedarfsbezogene Bewertung

Die Technologie-Projekte werden bezüglich Nutzen und Aufwand sowie des Bedarfs durch die Produkt-/Prozesseams bewertet. Diese Bewertung mündet in einer Empfehlung an den Technologie-Ausschuss zur Durchführung ausgewählter Projekte.

### 3. Unternehmensbezogene Bewertung

Abschließend entscheidet der Technologie-Ausschuss aufgrund der Empfehlung der Produkt-/Prozesseams über die Durchführung der Technologie-Projekte. Dabei berücksichtigt er die finanzielle Situation und strategische Gesichtspunkte.

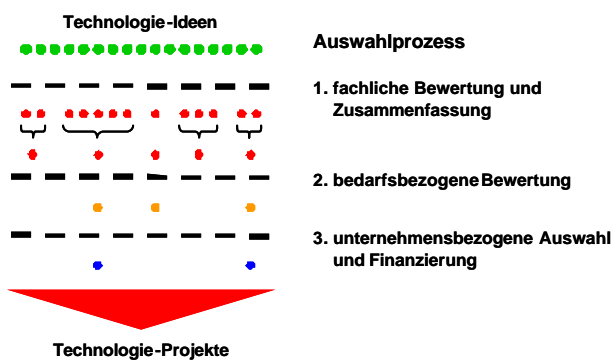


BILD 6: 3-stufiger Auswahlprozess

Entscheidende Bedeutung für die Auswahl der Technologie-Vorschläge hat die bedarfsbezogene Bewertung. Es wird deshalb jedes Projekt untersucht, welchen Beitrag es zu produkt-/prozessbezogenen Bewertungskriterien liefert. Bewertungskriterien für das Produkt Verdichter sind z.B. Funktionskriterien wie Wirkungsgrad, Stabilität und Zuverlässigkeit, Kostenkriterien wie Herstell- und Entwicklungskosten sowie Marktkriterien wie Wettbewerbsposition und Kundenakzeptanz. Diese Einzelkriterien werden als gewichtete Summe in einem Bewertungsindex zusammengefasst. Zur besseren Übersicht wird für jedes Produkt bzw. Prozess ein Portfolio der Technologie-Projekte erstellt (Bild 7). Die Dringlichkeit ist die Dauer bis zum spätesten Starttermin des Projekts und die Größe der Kreise ist ein Maß für den Realisierungsaufwand.

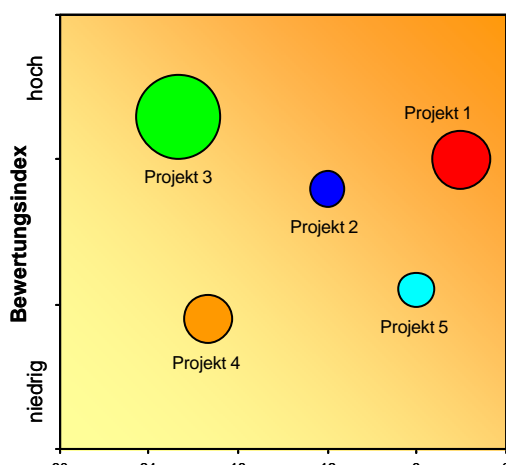


BILD 7: Technologie-Portfolio

Zur Ermittlung der technologischen Lücken werden für die Bewertungskriterien Technologie-Roadmaps (BILD 8) erstellt, die die Verbesserungen durch die einzelnen Technologie-Projekte und die Zielwerte des zugehörigen Triebwerksprogramms bzw. Prozesses zeichnen.

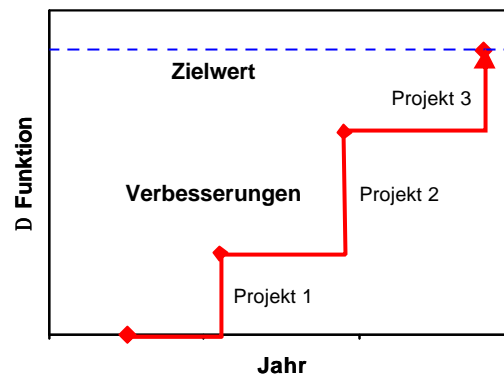


BILD 8: Technologie-Roadmap

## 2.4. Erarbeitung der Technologien

Der komplette Lebenszyklus eines Technologie-Projekts wird bei der MTU in 6 Phasen unterteilt (BILD 9).

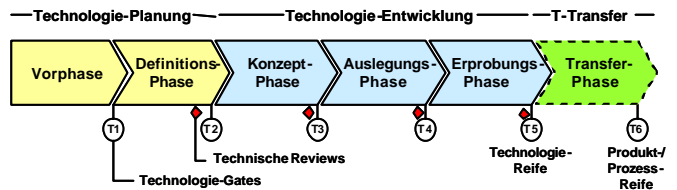


BILD 9: Phasen eines Technologie-Projekts

Die Planungsphase (Vorphase und Definitionsphase) wurde bereits in Kapitel 2.3 dargestellt. Sie schließt ab mit einer Spezifikation für das Technologie-Projekt. Die eigentliche Erarbeitung der Technologien kann nun erfolgen. Diese gliedert sich in die folgenden Phasen:

- Konzeptphase  
Verschiedene Konzepte werden untersucht und bewertet, schließlich wird ein Konzept ausgewählt und die Machbarkeit nachgewiesen.
- Auslegungsphase

Das ausgewählte Konzept wird ausgelegt und ein Prototyp (Rig, Pilotanlage, Demo-Software, ...) wird erstellt.

- Erprobungsphase  
Die Technologie wird erprobt und die Technologiereife wird durch anwendungsnahe, repräsentative Tests nachgewiesen.
- Transferphase  
Die Technologie wird an den Kunden (Produkt oder Prozess) übergeben und vom Kunden anwendungsspezifisch bis zur Fertigung von Serienbauteilen bzw. bis zum produktiven Prozess weiterentwickelt.

Verzögerungen und das Nichterreichen der Zielwerte bei der Entwicklung einer neuen Technologie führen in der Regel beim Produkt bzw. Prozess zu kostspieligen Neuauslegungen, Nacharbeiten oder Strafzahlungen. Um dieses Risiko zu minimieren, wird das Erreichen der Technologiereife in einem Gatingprozess im Rahmen der Technologie-Entwicklung überprüft. Dazu wird zum Abschluss jeder Phase ein Technologie-Gate durchgeführt (BILD 10).

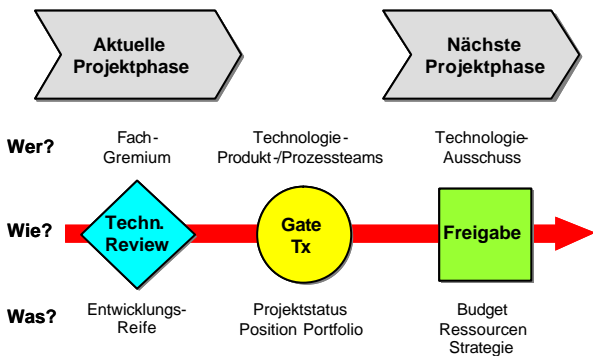


BILD 10: Technologie-Gating

Vor jedem Gate wird von einem Fachgremium ein Technisches Review durchgeführt. Dabei werden die Entwicklungsreife bzw. die Zielerreichung überprüft.

Der ordnungsgemäße Abschluss der aktuellen Projektphase wird im Gate vom zuständigen Produkt-/Prozesssteam überprüft. Im Gate wird außerdem die Position im Technologie-Portfolio neu bestimmt, da sich die Bewertung während der Laufzeit des Projekts gegenüber der ersten Einstufung ändern kann. Daraus kann eine Empfehlung zur Einstellung oder Beschleunigung des Projekts resultieren.

Anschließend erfolgt die Freigabe des Budgets und der Ressourcen durch den Technologie-Ausschuss aufgrund der Empfehlung aus dem Gate.

Eine wesentliche Aufgabe im Technologie-Gating ist die Bewertung der Risiken bezüglich Technik, Kosten und Zeitplan. Sie erfolgt nach einem vorgegebenem Schema entsprechend BILD 11.

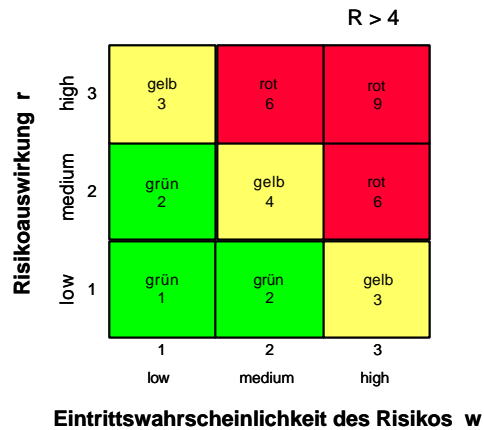


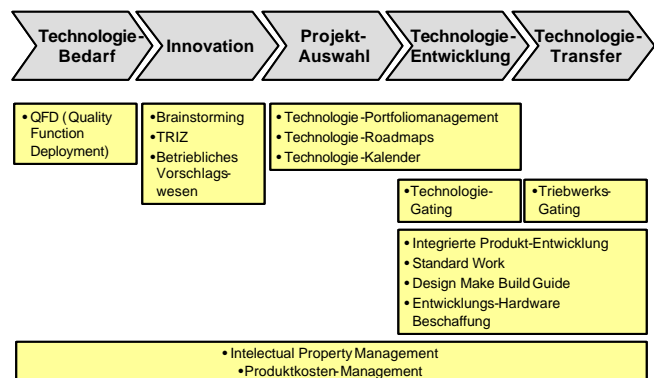
BILD 11: Risikobewertung im Technologie-Gating

Betrachtet wird die Risikokennzahl, die das Produkt aus der Eintrittswahrscheinlichkeit und der Auswirkung des Risikos ist.

Entscheidend für den Erfolg einer Technologie-Entwicklung ist der Transfer der Technologien in die Produkte. Im Technologie-Gating wird daher in jedem Gate das Vorhandensein von Kunden sowie das Einhalten der geforderten Termine geprüft. Während in den ersten Gates eine grobe Aussage zum Kunden ausreicht, muss mit Beginn der Auslegungsphase eine Bestätigung des späteren Kunden für den geplanten Einsatz vorliegen.

In den Triebwerksprogrammen wird umgekehrt in den Gates nach notwendigen Technologien gefragt und die rechtzeitige Verfügbarkeit der Technologie geprüft.

Mit Beginn der Auslegungsphase der Technologie ist der spätere Kunde der Technologie eng in die Technologie-Entwicklung eingebunden und übernimmt nach Erreichen der Technologie-Reife die Verantwortung für Planung, Kosten und Durchführung der anwendungsspezifischen Weiterentwicklung bis zur Serienfertigung bzw. Prozess-einführung.



Besonders zu erwähnen sind:

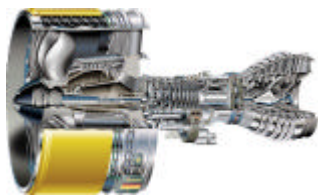
- **TRIZ**  
Ist eine weltweit angewandte Methode zur Lösung von Erfindungsaufgaben. TRIZ berücksichtigt die objektiven Entwicklungsgesetze technischer Systeme und ermöglicht daher eine gezielte Suche nach den Problemlösungen.
- **IP3E Integrierte Produktentwicklung, -erstellung und -erhaltung**  
IP3E regelt die projektorientierte integrierte Teamarbeit aller relevanten Fachbereiche sowie das Zusammenspiel zwischen Linie und Projekt.
- **Standard Work**  
Im Standard Work sind alle Arbeitsabläufe des Entwicklungs-, Erstellungs- und Erhaltungsprozesses dokumentiert. Über Standard Work wird sichergestellt, dass die für den folgenden Prozessschritt notwendigen Arbeitsergebnisse zur Verfügung stehen.
- **Design Make Build Guide**  
Im Design Make Build Guide wird das in der MTU vorhandene Wissen dokumentiert und zur Verfügung gestellt. Es ist die verbindliche fachliche Grundlage zur Bearbeitung der Aufgaben gemäß Standard Work durch die IP3E-Teams.
- **IPM Intellectual Property Management**  
Im Rahmen von IPM wird die Sicherung des MTU Know-Hows gegenüber Dritten (Patente) geregelt.

### 3. Ergebnisse

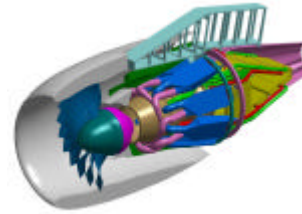
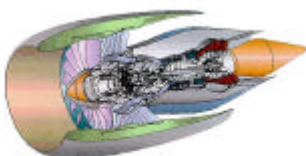
#### 3.1. Leitkonzepte

Die Technologien für weit in der Zukunft liegende Triebwerkskonzepte werden über Leitkonzepte definiert. Für die Leitkonzepte werden Konzeptentwürfe erstellt, die die notwendigen Technologien detailliert beschreiben.

Im Bereich der Antriebe für große Verkehrsflugzeuge hat die MTU drei Leitkonzepte mit unterschiedlichem Zeithorizont definiert. Diese 3 Leitkonzepte charakterisieren jeweils eine neue Generation von Flugtriebwerken.



Fortschrittlicher Turbopan



Rekuperatives Triebwerk

BILD13: Leitkonzepte zivile Antriebe

Einer der wichtigsten Auslegungsparameter für ein Flugtriebwerk ist das Bypassverhältnis (Verhältnis Massenstrom durch Bypass zum Gesamtmassenstrom). Mit steigendem Bypassverhältnis verbessert sich der Vortriebswirkungsgrad und die Lärmemission wird vermindert. Daher wurde in der Vergangenheit das Bypassverhältnis kontinuierlich gesteigert.

D Wirkungsgrad [%]

Der fortschrittliche Turbopan mit einem Bypassverhältnis von 9 bis 10 ist eine Weiterentwicklung der heutigen Turbopantriebwerke (Bypassverhältnis max. 8).

Noch höhere Bypassverhältnisse scheitern beim konventionellen Turbopan-Konzept an den niedrigen Fandrehzahlen. Diese niedrigen Fandrehzahlen benötigen Niederdruckturbinen, die schwer, teuer und ineffizient sind. In der folgenden Triebwerksgeneration wird daher ein Getriebe zwischen Fan und Niederdruckwelle eingefügt, um optimale Drehzahlen von Fan und Niederdruckturbinen zu ermöglichen. Diese Getriebe-Fan-Triebwerke werden Bypassverhältnisse von 12 bis 14 aufweisen.

Sehr weit in der Zukunft liegt das Rekuperative Triebwerk. Der thermodynamische Wirkungsgrad der Gasturbine kann deutlich gesteigert werden durch Einführung eines Abgaswärmtauschers und eines Zwischenkühlers. Der Abgaswärmtauscher führt die Wärmeenergie, die im Abgas nutzlos an die Umgebung abgegeben wird, dem Luftstrom vor der Brennkammer zu. Im Zwischenkühler wird die Luft zwischen Niederdruck- und Hochdruckverdichter heruntergekühlt, um die Verdichterleistung zu reduzieren. Ein nicht unerheblicher Nebeneffekt ist zusätzlich die verringerte  $\text{NO}_x$ -Emission eines solchen Triebwerks.

Mit diesen 3 Leitkonzepten deckt die MTU die mittel- bis langfristigen Entwicklungen ab. An allen drei Konzepten wird in nationalen und internationalen Kooperationen (siehe Kapitel 3.4.) gearbeitet.

### 3.2. Verdichtertechnologie

Die anspruchvollste Komponente in einem Flugtriebwerk ist der Hochdruckverdichter. Neu in den Markt drängende Hersteller bevorzugen als Eintritt die Komponente Niederdruckturbine, die bisher Schwerpunkt der MTU Aktivitäten bei zivilen Anwendungen ist. Um sich von dieser Konkurrenz abzusetzen, ist es das strategische Ziel der MTU, die Produktpalette um den technologisch anspruchsvollen Hochdruckverdichter zu erweitern.

Basierend auf den Erfahrungen der MTU im Bereich der Verdichter für militärische Flugtriebwerke wurden daher in den vergangenen Jahren sowohl Basistechnologien entwickelt als auch umfangreiche Rigtests für zivile Anwendungen durchgeführt.

BILD 14 zeigt am Beispiel Verdichterwirkungsgrad die Planungen für die zukünftige Technologie-Entwicklung. Die aufgeführten Technologien asymmetrische Nabenkontur, optimale Pfeilung, reduzierte Sekundärströmung, innovative Cavity-Konzepte, Grenzschichtabsaugung optimierte Axialabstände und Oberflächenstrukturen können den Wirkungsgrad kurz- bis langfristig nochmals deutlich steigern.

BILD 14: Technologie-Roadmap Verdichterwirkungsgrad

Da die Verdichtereentwicklung mit großen Risiken verbunden ist, müssen alle neuen Technologien in einem realitätsnahen Versuchsverdichter ausgiebig getestet werden. BILD 15 zeigt den Rotor des HDV12 Hochdruckverdichters, der aufgrund fortschrittlicher Verdichtertechnologien ein Druckverhältnis von 11 in nur 6 Stufen ermöglicht. Die geringe Stufenzahl reduziert deutlich die Herstell- und Wartungskosten.



BILD 15: HDV12 Technologieverdichter

Dieser Technologie-Verdichter lieferte äußerst überzeugende Messwerte bezüglich Wirkungsgrad und Stabilität. Daher wurde der HDV12 in das PW6000 Triebwerk eingebaut und getestet. Im Juni 2002 wurde der HDV12 schließlich als Hochdruckverdichter für das PW6000 Triebwerk, dem Antrieb für den Airbus A318, ausgewählt (BILD 16). Der HDV12 ist ein gelungenes Beispiel für den Technologie-Transfer von Basistechnologien in das Produkt.



BILD 16: HDV12 Hochdruckverdichter im PW6000 Triebwerk auf dem Prüfstand und die geplante A318 Anwendung

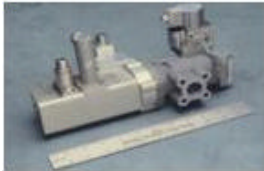
### 3.3. Intelligentes Triebwerk

Fortschritte im Bereich der Elektronik, der Sensoren und der elektrischen Antriebe eröffnen neue Möglichkeiten,

die zu wesentlichen Verbesserungen der Flugtriebwerke führen (BILD 17).



Elektrische Aktuatoren



Elektrische Kraftstoffpumpe



Magnetlager



Integrierter Starter-Generator



Smarte Sensoren



Verteilte Kontrollsysteme

BILD 17: Einige Komponenten für die „More Electric Engine“

In enger Kooperation mit Universitäten und Zulieferfirmen verfolgt die MTU u.a. folgende Technologie-Entwicklungen:

- Ersatz von hydraulisch betriebenen Verstellungen und mechanisch betriebenen Pumpen durch einfache, kostengünstige und leicht zu wartende elektrische Komponenten.
- Verzicht auf das schwere und komplexe Ölsystem durch Einführung von Magnetlagern. Damit eröffnen sich zusätzlich neue Möglichkeiten zur optimalen Einstellung der axialen Spalte im Betrieb.
- Einführung eines integrierten Starter-Generators, der im Triebwerk direkt auf der Welle sitzt und nicht über ein aufwändiges Getriebe angetrieben werden muss

- Aktive Lärmreduzierung durch phasenverschobenen Gegenschall
- Echtzeit-Regelssysteme, die eine gezielte Beeinflussung einzelner Komponenten in Richtung höherer Effizienz ermöglichen.
- Aktive Pumpgrenzbeeinflussung zum Anheben der Pumpgrenze, die z.B. durch Leitradverstellung oder Einblasen erreicht werden kann. Da mit aktiver Pumpgrenzbeeinflussung die unter kritischen Betriebsbedingungen normalerweise notwendige Pumpgrenze reduziert werden kann, ergibt sich bei Reiseflugbedingungen ein erhöhter Wirkungsgrad.
- Erfassung relevanter Triebwerksdaten, die eine Schadensfrüherkennung ermöglichen und eine bedarfs-gerechte Wartung erlauben.

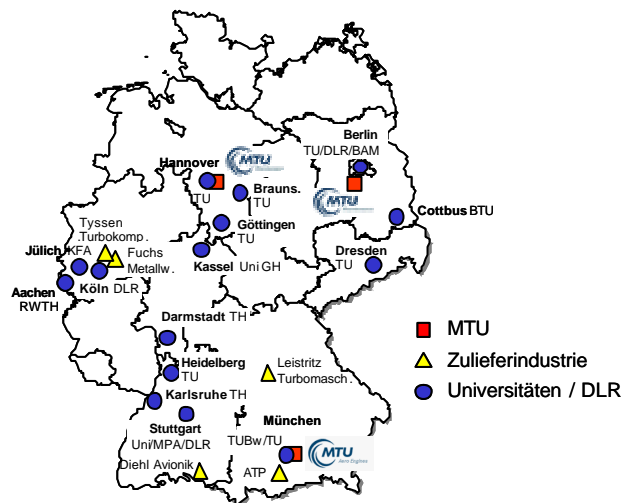
Notwendige Voraussetzung für viele dieser Verbesserungen ist die Entwicklung von Hochtemperatur-Sensorik und -Aktuatorik. Im Rahmen des MTU Technologie-Prozesses wird versucht, dieses komplexe Arbeitsgebiet zielgerichtet zu steuern.

### 3.4. Kooperationen

Die Entwicklung von Flugtriebwerken ist mit so hohen Aufwänden und Risiken verbunden, dass fast alle neuen Triebwerke in internationalen Kooperationen entwickelt werden.

Auch die Technologie-Entwicklung folgt diesem Beispiel. So entwickelt die MTU die Technologien für den Getriebefan im Rahmen des nationalen Luftfahrtforschungsprogramms in Kooperation mit Universitäten, der DLR und Zulieferfirmen (BILD 18). Schwerpunkte der MTU Aktivitäten sind dabei die schnelllaufende Niederdruckturbinen und der hochbelastete Hochdruckverdichter.

Im 5. EU-Rahmenprogramm wird in Kooperation mit Snecma, Fiat und Volvo ein Prototyp des Rekuperativen Flugtriebwerks entwickelt, aufgebaut und im Höhenwindkanal der Universität Stuttgart getestet. Die MTU ist dabei für die Komponenten schnelllaufende Niederdruckturbinen und Wärmetauscher verantwortlich.



## BILD 18: Nationale Kooperationspartner der MTU

Damit eröffnet die MTU den deutschen Universitäten und Zulieferfirmen den Zugang zur Technologie-Entwicklung für die nächsten Generationen von Flugtriebwerken.

### **3.5. Zusammenfassung**

Die Anfänge des MTU Technologie-Prozesses reichen mehr als 10 Jahre zurück. Die hier vorgestellte Vorgehensweise wurde vor ca. 2 Jahren eingeführt.

Die Erfolge des neuen Technologie-Prozesses sind erkennbar an der schnellen Einführung zahlreicher Technologien in neue Produkte. Der neue Technologie-Prozess führte zu einer erhöhten Wertschöpfung und einer gestärkten Position am Weltmarkt z.B. ablesbar am Zuwachs der Beschäftigten in der deutschen Triebwerks-industrie (in Summe über 1400 neue hochqualifizierte Arbeitsplätze in den letzten Jahren).

Nicht zuletzt wichtig für den Erfolg des Technologie-Prozesses ist eine hohe Zustimmung der am Prozess beteiligten Mitarbeiter. Diese konnte durch eine hohe Transparenz der Entscheidungen und dem Einbinden aller relevanten Kräfte in der MTU erreicht werden.