

## **Abschlussbericht zum INS 224 Projekt:**

# **Risiko-kontrollierte Anwendung von Innovation & technologischem Fortschritt - Standardisierte Entscheidungshilfe zur Reifegradbewertung im Produkt- Lebenszyklus - Machbarkeitsstudie**

Normenausschuss Luft- und Raumfahrt des DIN e. V.

Astrium Space Transportation

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1. Zusammenfassung .....</b>	<b>4</b>
<b>2. Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>5</b>
<b>3. Einleitung .....</b>	<b>7</b>
3.1. Allgemeines .....	7
3.2. Vorteile des TRL-Konzeptes .....	8
3.3. Randbedingungen .....	9
3.4. Arbeitspaket-Struktur .....	9
<b>4. Stand der Technik .....</b>	<b>12</b>
4.1. Definitionen zur Technologiereife .....	13
4.1.1. TRL und IRL Definitionen der NASA .....	14
4.1.2. TRL und TRA Definitionen des amerikanischen Verteidigungsministeriums (US DoD) .....	16
4.1.3. Integration Maturity Levels (IML) Definitionen des britischen Verteidigungsministeriums (UK MoD) .....	21
4.1.4. TRL in NATO Programmen .....	22
4.1.5. TRL in Programmen des französischen Verteidigungsministeriums (DGA) .....	22
4.1.6. TRL in ESA Projekten .....	23
4.2. TRL im Projektmanagement .....	25
4.3. TRL Anwendungsbeispiele .....	28
4.3.1. Lox-LH2 – Triebwerkentwicklung „Vulcain 1“ .....	28
4.3.2. „H-infinite“ Launcher Navigation .....	31
4.3.3. Das Gallium Arsenid (GaAs) Fotovoltaik Subsystem des GOCE Solargenerators, A. Caon (ESA) .....	32
4.3.4. Einstellbarer Frequenzumwandler („Tuneable Frequency Converter“ (TFC) der Europäischen Weltraumorganisation ESA) .....	35
4.3.5. TRL/IRL Anwendungsbeispiele: ESA Demonstratoren ARD und HERMES .....	36
4.3.5.1. Anwendungsbeispiel: ARD (TRL hoch, IRL niedrig) .....	36
4.3.5.2. Anwendungsbeispiel: HERMES (TRL Niedrig, IRL niedrig) .....	37
<b>5. Anforderungen .....</b>	<b>38</b>
<b>6. Bewertungsmethodik .....</b>	<b>39</b>
6.1. Einleitung .....	39
6.2. TRL-Bewertung im Projektablauf .....	39
6.2.1. TRL / IRL prüfen .....	39
6.2.2. TRL / IRL sicherstellen .....	39
6.2.3. TRL / IRL nachweisen .....	39
6.3. TRL-Bewertungsverfahren (TRL Evaluation Process) .....	42
6.4. TRL-Bewertungsmethode (TRL Identification Method) .....	45
6.5. IRL-Bewertungsmethode (IRL Identification Method) .....	48
6.6. Kriterienkatalog .....	50
<b>7. Ausblick .....</b>	<b>58</b>
<b>8. Literaturverzeichnis .....</b>	<b>61</b>
<b>9. Anhang .....</b>	<b>63</b>
9.1. Ansprechpartner .....	63
9.2. Unit Descriptions (NASA) .....	64
9.3. Engineering Terms commonly used in ESA .....	65
9.4. Terms commonly used by US DoD for Technology Readiness Assessment .....	66
9.5. TRL Definitions (NASA, US DoD, NATO, UK MoD) .....	67
9.6. TRL Descriptions (NASA, US DoD, NATO, UK MoD) .....	68

## Abbildungsverzeichnis

Bild 1: Leitprinzip Technologieförderung .....	7
Bild 2: Arbeitspaket-Struktur.....	10
Bild 3: Typische Technologiekostenverteilung in einem Entwicklungsprogramm .....	12
Bild 4: Projekt-"overrun" versus Investitionskosten in den Phasen A/B (NASA) .....	13
Bild 5: TRL Definitionen der NASA.....	14
Bild 6: TRL-basiertes Technologieentwicklungsprogramm (NASA) .....	15
Bild 7: IRL Definitionen (NASA).....	16
Bild 8: Zusammenspiel von TRL und IRL (NASA).....	16
Bild 9: Programmrisiko bei der Übernahme von unreifer Technologie .....	17
Bild 10: Beschaffungsprozess des US DoD (DoDI-5000.2) .....	17
Bild 11: TRL Definitionen des US DoD.....	18
Bild 12: TRL Definitionen der US Army CECOM.....	19
Bild 13: Herstellungsfähigkeit: MRL Definitionen des US DoD .....	20
Bild 14: IML Definitionen des UK MoD .....	22
Bild 15: F&T Management mit TRL (DGA).....	23
Bild 16: ESA Technologieentwicklungsprogramme: Kategorien .....	23
Bild 17: Technology Programmes versus Technology Readiness Levels.....	24
Bild 18: Readiness Levels for Software and Tools.....	24
Bild 19: Project Review Milestones (ECSS) .....	26
Bild 20: TRL und Kostenschätzungen (NASA).....	27
Bild 21: Versuchsaufbau zum Technology Readiness Level 3 .....	28
Bild 22: Der erste Europäische LOX-LH2-Antriebs-Prototyp (1966) .....	28
Bild 23: Vulcain 1 Brennkammertests am P3.2 Versuchsstand des DLR (1988).....	29
Bild 24: Vulcain-Triebwerk bei Qualifikationstests in Vernon (1993).....	29
Bild 25: V112 Flug (1998).....	30
Bild 26: Start einer Ariane-Rakete mit Vulcain 1 Triebwerk .....	30
Bild 27: Vorqualifizierungs-Testeinheit.....	33
Bild 28: DVT Testabschnitt.....	33
Bild 29: STM Solarfeld.....	34
Bild 30: FM Solarfeld .....	34
Bild 31: TRL Anwendungsbeispiel ARD .....	36
Bild 32: TRL Anwendungsbeispiel HERMES .....	37
Bild 33: Integrationsreife und Systemaspekte .....	38
Bild 34: TRL-Bewertung im Projektablauf.....	41
Bild 35 bis Bild 36: TRL-Bewertungsverfahren (TRL Evaluation Process).....	43
Bild 37 bis Bild 38: TRL-Bewertungsmethode (TRL Identification Method).....	46
Bild 39: IRL-Bewertungsmethode (IRL Identification Method).....	49
Bild 40 bis Bild 44: TRL-Kriterienkatalog.....	51
Bild 45 bis Bild 46: IRL-Kriterienkatalog.....	56

## 1. Zusammenfassung

Unter den Rahmenbedingungen der Technologie-Reifegrad-Bewertungsstruktur (TRL) der NASA wurden in dem INS 224 Projekt Inhalte für einen Normentwurf erarbeitet, der ein einheitliches, in allen Projektphasen anwendbares und vollständiges, d. h. für alle TRL und Projektabschnitte gültiges, Bewertungsverfahren für die Entwicklungsreife einer Technologie festlegt.

Im TRL-Bewertungsverfahren wurde im Projektablauf ein Gesamtprozess („TRL Evaluation Process“) definiert, welcher die Methoden zur TRL-Bestimmung („TRL Identification Method“) und zur Integrations-Reifegrad-Bestimmung („IRL Identification Method“) einsetzt.

Das Ergebnis ist eine auf der Projektzeitachse vorzunehmende TRL-/IRL-Einstufung der zu bewertenden Technologie, die eine Aussage über die Einsatzfähigkeit sowie der Integrationsfähigkeit der Technologie anhand von Projektanforderungen ermöglicht.

Die Prozessbeschreibung des Gesamtprozesses und die Beschreibungen der Methoden bilden inhaltlich den Schwerpunkt des zukünftigen Normenentwurfs.

In der Regel sollte der Einsatz einer Technologie erst dann erfolgen, wenn der erforderliche Entwicklungsreifegrad erreicht ist. Das hier beschriebene Bewertungsverfahren ermöglicht eine systematische und gezielte Abschätzung, ob eine Technologie eingesetzt werden kann oder im Projektzeitrahmen bis zum erforderlichen Reifegrad weiterentwickelt werden muss.

### English Summary

Based on the NASA “Technology Readiness Levels (TRL) evaluation concept”, a draft standard was designed within the INS 224 Project, which provides a standardized and complete approach for the evaluation of the technology development maturity, which is valid for all TRL, and which can be applied within each project phase.

The TRL Evaluation Process includes a separate TRL Identification Method and an Integration Readiness Levels (IRL) Identification Method to be applied during the project workflow.

The result is a TRL and IRL classification of considered technologies at specific milestones on the entire project timescale. Thus, based on the project requirements and the integration ability, adaptable technologies can be identified.

The Evaluation Process and the TRL / IRL method descriptions form the focus of the prospective draft standard.

In general, technologies should only be used if they have reached the required Technology Readiness Level. The procedure described in this paper allows a systematic calculated evaluation, if a considered technology has already accomplished or will accomplish the requested Technology Readiness Level during the project schedule.

## 2. Abkürzungsverzeichnis

A5 EAP	Ariane V - Etage d'Accélération à Poudre
A5 ECA	Ariane V - Evolution Cryotechnique Type A
AMS	Acquisition Management System
AP	Arbeitspaket
ARD	Atmospheric Reentry Demonstrator
AST	Astrium Space Transportation
BB	Breadboard
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
BU	Business Unit
BWB	Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung
CAD	Computer Aided Design
CDR	Critical Design Review
CECOM	Communications and Electronics Command (US Army)
CNES	Centre national d'études spatiales
CRC	Corporate Research Centre (EADS)
DASA	DaimlerChrysler Aerospace AG
DGA	Délégation générale pour l'armement (Französisches Verteidigungsministerium)
DIN NL	Deutsches Institut für Normung, Normenausschuss Luft- und Raumfahrt
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DVT	Design Verification Test
EADS	European Aerospace Defence and Space Company
EAR	Export Administration Regulation
ELR	End-of-Life Review
EM	Engineering Model
EQM	Engineering Qualification Model
ESA	European Space Agency
ESTEC	European Space Research and Technology Centre (ESA)
F&E	Forschung und Entwicklung
FM	Flight Model
FQR	Flight Qualification Review
FRR	Flight Readiness Review
GaAs	Gallium Arsenide
GAO	US General Accounting Office
GOCE	Gravity Field and steady-state Ocean Circulation Explorer (ESA)
GSM	Global System for Mobile Communications
GSTP	Generic Support Technology Programme
H/W	Hardware
HEDS	Human Exploration and Development of Space
INS	Innovation mit Normen und Standards
IML	Integration Maturity Levels
IOV	In-Orbit-Verification
IPC	Industrial Policy Committee (ESA)
IRL	Integration Readiness Levels
ISS	International Space Station

ITAR	International Traffic in Arms Regulations
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency
LRR	Launch Readiness Review
MCR	Mission Close-out Review
MDR	Mission Definition Review
MIPS	Microprocessor without interlocked pipeline stages
MRL	Manufacturing Readiness Levels
NASA	National Aeronautics Space Administration
NATO	North Atlantic Treaty Organisation
NURC	NATO Undersea Research Centre
ORR	Operational Readiness Review
PBT	Practice Based Technologies
PCA	Physical Configuration Audit
PDR	Preliminary Design Review
PM	Projektmanagement
POS	Politique et d'objectifs scientifiques
PRL	Programmatic Readiness Levels
PRR	Preliminary Requirement Review
PRT	Programme Readiness for Transition
QR / AR	Qualification/Acceptance Review
R&D	Research and Development
R&T	Research & Technology
RLV	Reusable Launch Vehicle
RTO	Research & Technology Organization (Nato)
S/W	Software
SRL	System Readiness Levels
SRR	System Requirements Review
STM	Structural Thermal Model
TFC	Tuneable Frequency Converter
TNV	Technology Need Value
TRA	Technology Readiness Assessment
TRL	Technology Readiness Levels (Technologie Reifegrade)
TRP	Technology Research Programme
UK MoD	Ministry of Defence (United Kingdom)
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
US DoD	Department of Defense (USA)
WBS	Work Breakdown Structure

### 3. Einleitung

#### 3.1. Allgemeines

Der Begriff der Technologie wird teilweise sehr unterschiedlich definiert. Allen Definitionen ist aber gemeinsam, dass die Technologie als Verbindungsglied zwischen Theorie und Praxis betrachtet werden kann. Technologie im eigentlichen Sinne ist das Wissen, welches bei der Entwicklung von Produkten und Verfahren zum Einsatz kommt. Die konkrete Anwendung von Technologie, die sich in Produkten oder Verfahren manifestiert, wird als Technik bezeichnet.

Auf Grundlage des TRL-Konzepts (Technology Readiness Levels, Technologie Reifegrade) der NASA aus den 70-iger Jahren wird ein komplettes Verfahren zur TRL-Anwendung im Projektrahmen entworfen. Innerhalb der Projektreihe "Innovation mit Normen und Standards" (INS), gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), wurden Entscheidungshilfen zur Einschätzung des Aufwands und der Risiken in Bezug auf die Anwendung und Integration noch unreifer Technologien erarbeitet.

Das vorliegende INS-Projekt wurde im Jahr 2007 vom Normenausschuss Luft- und Raumfahrt des DIN e. V. (DIN NL), Astrium Space Transportation (AST) und dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) durchgeführt.

Im Mittelpunkt des Projektes steht eine Machbarkeitsstudie zu normativen Entscheidungshilfen. Darin werden die TRL, Technologie-Integration und Anwendung sowie die Projekt-/Produktlebenszyklus-Prozesse miteinander verknüpft, um eine aus der Sicht des Gesamtsystems hinreichende Prozessproduktivität zu gewährleisten. Hierbei wird ein TRL-Bewertungsverfahren unter Berücksichtigung der Anschaffungs- und Entwicklungs-Risiken und unter Zuhilfenahme eines Kriterienkataloges definiert. Das Verfahren soll im Anwendungsbereich Raumfahrt das Anpassen von Beurteilungskriterien an die Besonderheiten der Systementwicklung ermöglichen.

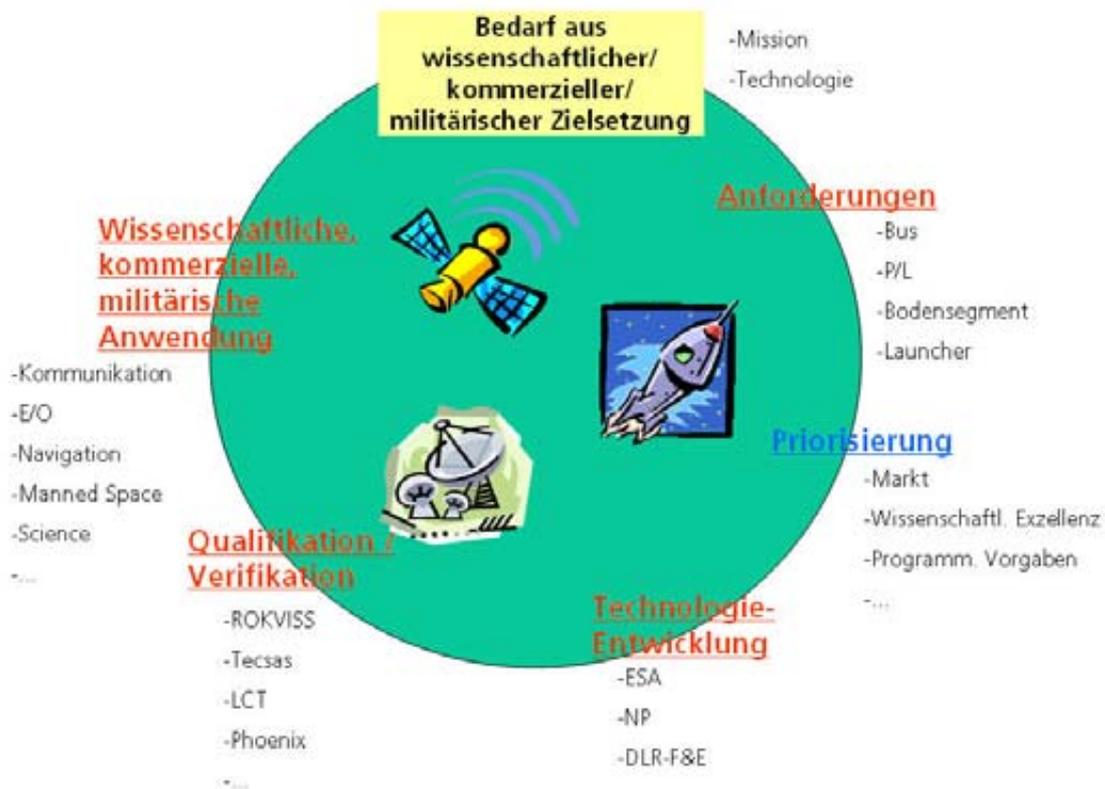


Bild 1: Leitprinzip Technologieförderung

Technologieentwicklung verfolgt keinen Selbstzweck, sondern ist abhängig von langfristigen Zielszenarien der Anwendungs- und Wissenschaftsbereiche. Diese wiederum im Sinne eines profilierten Raumfahrtprogrammes zu entwickeln und miteinander in Einklang zu bringen, obliegt der deutschen Raumfahrtagentur in Anlehnung an raumfahrtpolitische und gesamtgesellschaftliche Zielvereinbarungen (siehe Bild 1). Das Erreichen der gesetzten Ziele im Rahmen dieses komplexen Systemzyklus erfordert ein möglichst reibungsloses Zusammenwirken der Kräfte, dem objektiven Reifegrad der eingesetzten Technologie/n kommt dabei eine besondere Rolle zu.

Zur effizienteren Bewertung und Diskussion der Entwicklungsreife neuer Technologien im Hinblick auf eine potentielle Anwendung bzw. ein potentielles Einsatzgebiet, hat die NASA das disziplinübergreifende TRL-Konzept entwickelt und wendet dieses auch heute noch an. Ein weiterer Anwender des Konzepts ist das US-Verteidigungsministerium (US DoD), das die NASA-TRL an seine Beschaffungsprozesse angepasst hat. Firmen und Organisationen haben inzwischen eigene Methoden zu diesem Thema entwickelt bzw. das TRL-Konzept an ihre eigenen Prozesse und Bedürfnisse angepasst. International entwickeln sich erste Ansätze zur Harmonisierung der unterschiedlichen Konzepte. Raumfahrtagenturen (NASA, ESA, CNES, JAXA, DLR) bildeten im vergangenen Jahr eine internationale TRL-Arbeitsgruppe zur Harmonisierung dieser Ansätze, auch in der Industrie existieren entsprechende Aktivitäten.

Für den Dialog zwischen Auftraggebern und Auftragnehmern zum Thema Technologieentwicklungsreife bzw. Produkt-Machbarkeit gibt es bis zum heutigen Zeitpunkt keine „gemeinsame Sprache“, da jeder Partner seine eigenen Definitionen oder Richtlinien erstellt hat. Dadurch können Missverständnisse und Fehler entstehen, die Leistungsabweichungen, Kostenüberschreitungen und Terminverzögerungen verursachen und zu Produkten führen können, die nicht den erwarteten technologischen Fortschritt erbringen. Dieses wiederum kann zur Unzufriedenheit des Kunden führen und einen Imageverlust des Unternehmens herbeiführen oder auch das Ausbleiben von Folgeaufträgen nach sich ziehen.

Auch infolge der fortschreitenden Globalisierung, der zunehmenden Komplexität von Technologieentwicklungen und der Zunahme des industriellen Wettbewerbs wird es für Unternehmen immer schwieriger zu entscheiden, bis zu welchem Maße sie selbst in eine Technologie investieren sollten. Es fehlt an einer standardisierten Entscheidungshilfe zur Einschätzung des Aufwands und der Risiken in Bezug auf Anwendung und Integration noch unreifer Technologien. Die Verwendung des TRL-Konzepts allein bietet für diese Fragen keine ausreichenden Bewertungs- und Einstufungskriterien.

Insbesondere fehlt es an Entscheidungshilfen, die eine Anleitung vorgeben wie TRL, Technologie-Integration, Technologie-Anwendung und die Projekt/Produktlebenszyklus-Prozesse miteinander verknüpft werden können, um eine auch aus der Sicht des Gesamtsystems hinreichende Prozessproduktivität zu gewährleisten (on-time, on-cost, on-maturity/quality, on-value).

Bisher wurde nur wenig Dokumentation zur TRL-Methodik und ihrer Anwendung veröffentlicht. Zudem besteht ein großes Interesse im Bereich Raumfahrt, TRL anwenderunabhängig zu verwenden. Eine Erweiterung wäre auch in den Bereichen Luftfahrt und Automotive denkbar. Die Entwicklung einer europäischen Norm gibt die Möglichkeit, TRL standardisiert anwendbar für alle Unternehmen und Organisationen im Bereich Luft- und Raumfahrt zu machen. Der industrielle Sektor soll die Möglichkeit bekommen sich am Entstehungsprozess zu beteiligen, sowie seine schon gewonnenen Erfahrungen auszutauschen und in den geplanten Standard einfließen zu lassen.

### 3.2. Vorteile des TRL-Konzeptes

Die TRL-Einstufung bietet folgende wesentliche Vorteile:

#### Einheitliche Bewertung von Technologieentwicklungsreife

- in jeder Entwicklungsphase
- für den Vergleich mit Konkurrenten
- zur Definition von Entwicklungsstrategien
  - Start und Ende von Entwicklungen (Übergang zur Produktion ohne kostenintensive Nachentwicklungen)
  - für die Qualifizierung des Entwicklungsfortschritts

- bei der Einschätzung verschiedener, für die Integration in Frage kommender Technologien
  - Akquisition finanzieller Unterstützung
- zur Schaffung von Datenbanken mit allen bekannten und angewandten Technologien
- zur Unterstützung innerhalb des Beschaffungsprozesses (Bewertung von Zulieferprodukten)

#### **Bewertung von Risiken (Kosten/Gewinne) für die Entwicklung von neuen Technologien**

- Visualisierung des kritischen Pfads
  - Erleichterte Übernahme von Risiken
  - Bestimmung von F&E-Prioritäten
- Verknüpfung der TRL mit Zahlungsmeilensteinen (z. B. bei umfangreichen Entwicklungsprojekten)

#### **Gemeinsames Referenzsystem**

- zwischen Experten (z. B. Strategie der Technologiebeschaffung)
- zwischen Experten und Management (z. B. Entscheidungen hinsichtlich Eigen- oder Fremdfertigung)
- zwischen verschiedenen Arbeitsgebieten (R&T, Projektmanagement, Systemtechnik und andere Fachgebiete), um Austausch bzw. Synergien innerhalb der F&E zu erhöhen und um Risiken und Investitionen aufzuteilen
- mit Zulieferern (z. B. Technologieentwicklungsreifeanforderung an Beschaffungserzeugnissen)
- zwischen Kunden und Auftraggebern (z. B. Investitionsebene, Lieferzeit)
- mit externen Gemeinschaften ohne in technische Details gehen zu müssen (Wahrung von Betriebsgeheimnissen)

### **3.3. Randbedingungen**

Das hier vorgestellte Bewertungsverfahren wurde zum Einsatz in der Raumfahrttechnik entwickelt. Eine einheitliche Weiterentwicklung und Verwendung für den gesamten Luft- und Raumfahrtbereich und verwandte Technologiebereiche ist sinnvoll und anzustreben.

Das Bewertungsverfahren konzentriert sich auf Hardware-Komponenten, da die Bewertung von Software-Systemen (z. B. Algorithmen, Beta-Versionen, Prototypen, operationelle Software) projektspezifisch ist und eine andere Verfahrensweise bei der Bewertung benötigt.

Bei der einzuschätzenden Hardware wird für jede TRL-Bewertung nur die Technologie einer Komponente betrachtet, da im gesamten (Raumfahrt-)System verschiedene Technologien eingesetzt werden. Das hier entwickelte Verfahren kommt in den verschiedenen Phasen eines Projektes wiederholt zu Anwendung, um die Technologie-Verfügbarkeit einer Hardware-Komponente zu bewerten (siehe Kapitel 6).

### **3.4. Arbeitspaket-Struktur**

Folgende Struktur der Arbeitspakete (AP) aus Bild 2 wurde für das INS-Projekt gewählt, an dem sich auch der Aufbau des Abschlussberichtes orientiert:

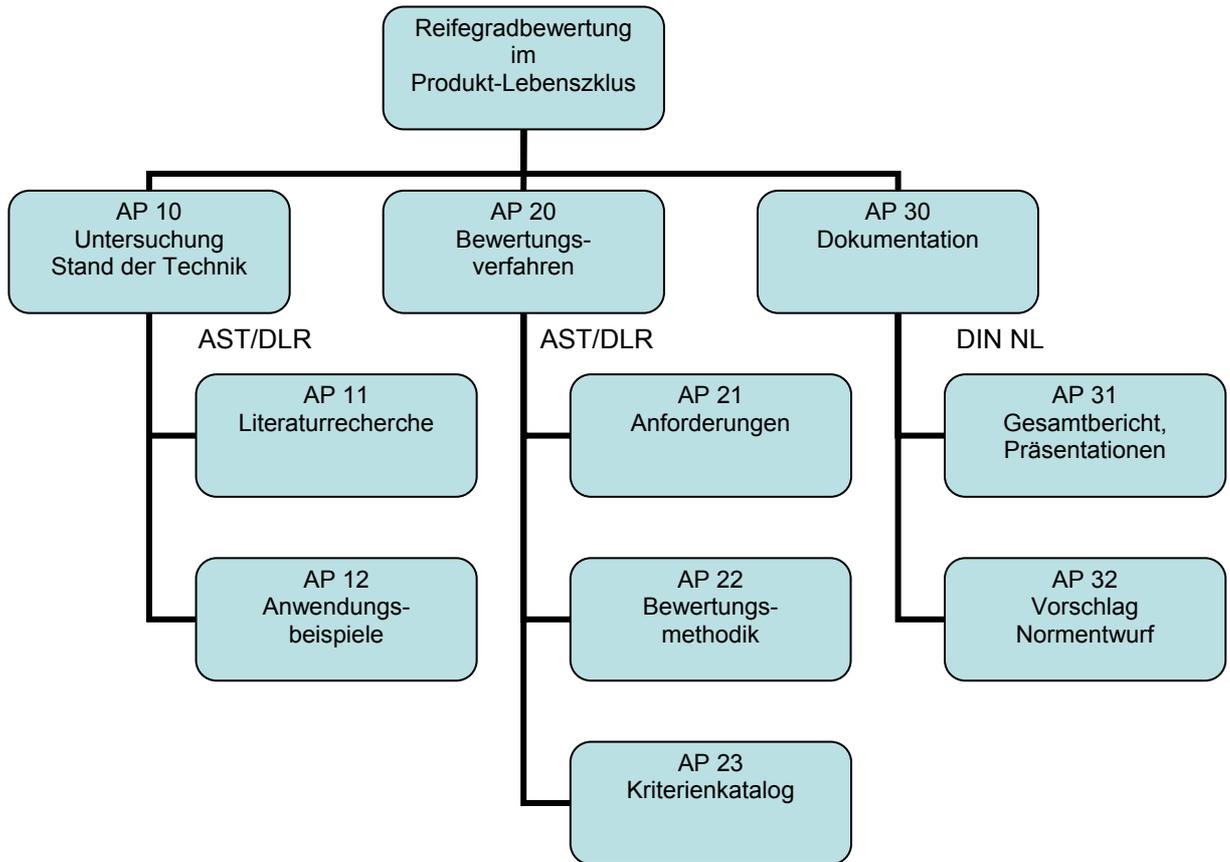


Bild 2: Arbeitspaket-Struktur

### AP 11 Literaturrecherche

Erfassen des aktuellen Standes aller bekannten TRL-Aktivitäten (insbesondere im Raumfahrtbereich) und Veröffentlichungen. Identifizieren von Experten (intern und extern) und Anwendern auf dem Gebiet der Technologiebewertung.

### AP 12 Anwendungsbeispiele

Erfassen der Erfahrungen im Umgang mit TRL mit den an diesem Projekt teilnehmenden Partnern sowie mit den in AP 11 identifizierten Experten und Anwendern. Erstellen einer Liste von Anwendungsbeispielen zur TRL-Einstufung.

### AP 21 Anforderungen an das Bewertungsverfahren

Identifizieren der Anforderungen an ein kontinuierliches vollständiges Bewertungsverfahren zur Einordnung von Technologien in eine TRL-Skala unter Berücksichtigung von Anwendungsrisiken. Die Anforderungen entstammen aus den Anwenderbereichen der Industrie, Forschung & Entwicklung und Standardisierungsorganisationen.

### AP 22 Bewertungsmethodik

Erstellen eines Verfahrensentwurfes zur risikobezogenen Einschätzung des Technologie-Reifegrades für die Anwendung und Integration von Technologien. Berücksichtigung von Anschaffungs- und Entwicklungs-Risiken bei der Definition des TRL-Bewertungsverfahrens und eines entsprechenden Kriterienkataloges (AP 23).

### AP 23 Kriterienkatalog

Entwicklung von standardisierten Bewertungsrichtlinien (Kriterienkatalog) die eine Einstufung des Anwendungsrisikos nicht ausgereifter Technologien vornehmen, um gegebenenfalls den erforderlichen Handlungsbedarf im Rahmen eines Projektes zu ermitteln. Die Einstufungskriterien sollen durch Anwendungsbeispiele aus AP 12 veranschaulicht werden.

**AP 31 Gesamtbericht**

Schriftliche Dokumentation in Form eines Gesamtberichts.

**AP 32 Vorschlag Normentwurf**

Schriftliche Vorlage für einen europäischen Normentwurf in englischer Sprache zum Thema Reifegradbewertung im Produkt-Lebenszyklus.

**Hinweis zur sprachlichen Gestaltung des Abschlussberichts**

Der vorliegende Abschlussbericht zum INS 224 Projekt enthält neben deutschen Texten auch englischsprachige Bilder, Tabellen und Prozessablaufdarstellungen. Es wurde von einer deutschen Übersetzung abgesehen, da die weitere Erarbeitung des TRL Themas vorrangig auf internationaler, englischsprachiger Ebene stattfinden wird. Die englischsprachigen Passagen sind bereits größtenteils für einen europäischen bzw. internationalen Normentwurf vorgesehen.

## 4. Stand der Technik

Wie auch in anderen F&E-intensiven Hi-tech Branchen existieren in der Luft- und Raumfahrt hohe Anforderungen hinsichtlich der Einhaltung des vorgegebenen Zeit- und Kostenrahmens bei der Erreichung der jeweiligen Programm-, Missions- und Projektzielen. Eine Besonderheit bei der Entwicklung von Raumfahrttechnologien sind die speziellen Herausforderungen bzgl. des Einsatzes unter extremen Umgebungsbedingungen sowie die zumeist von Projekt zu Projekt unterschiedlichen Leistungsanforderungen.

Kosten- und Risikoeinschätzung in innovativen Raumfahrtentwicklungsprogrammen ist verknüpft mit einer genauen Kenntnis des Entwicklungsstandes der jeweiligen Technologie (Technologieentwicklungsreife) und deren Integrationsfähigkeit in das System (Systemreife). Eine ESA-Studie hat ergeben, dass weniger als 15% der Investition in Technologie ca. 80% der Projektkosten verursachen (siehe Bild 3).

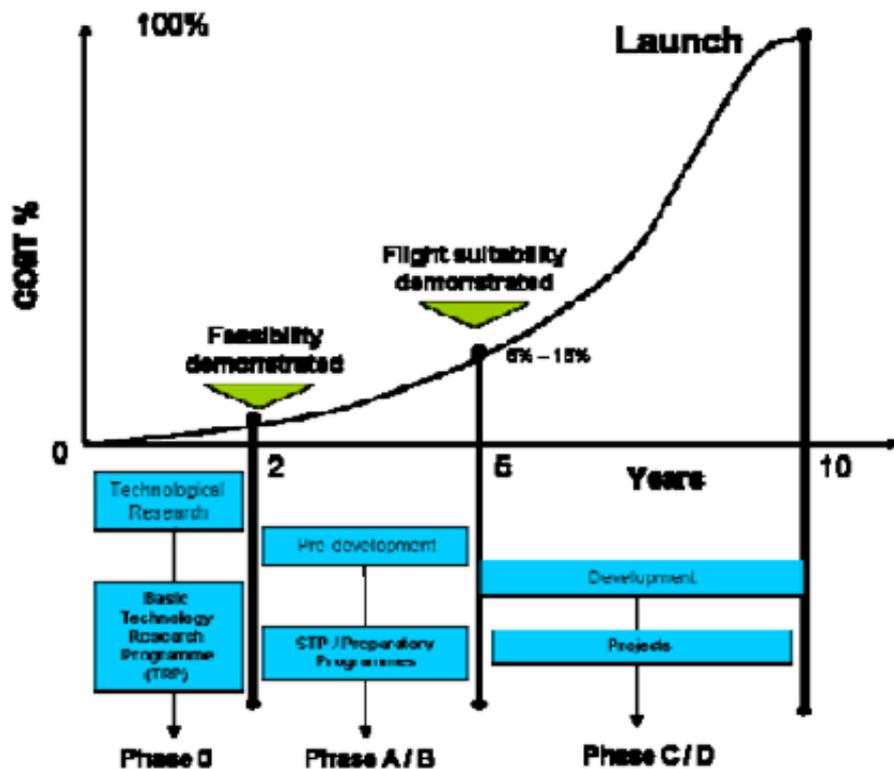


Bild 3: Typische Technologiekostenverteilung in einem Entwicklungsprogramm [ESA/IPC (2006)77]

In einer NASA Studie (siehe Bild 4), fand man heraus, dass:

- niedrige Investitionen in frühen Projektphasen zu hohen "overrun"-Kosten führten
- Technologieentwicklungsreife in einem frühen Entwicklungsstadium schwierig einzuschätzen ist

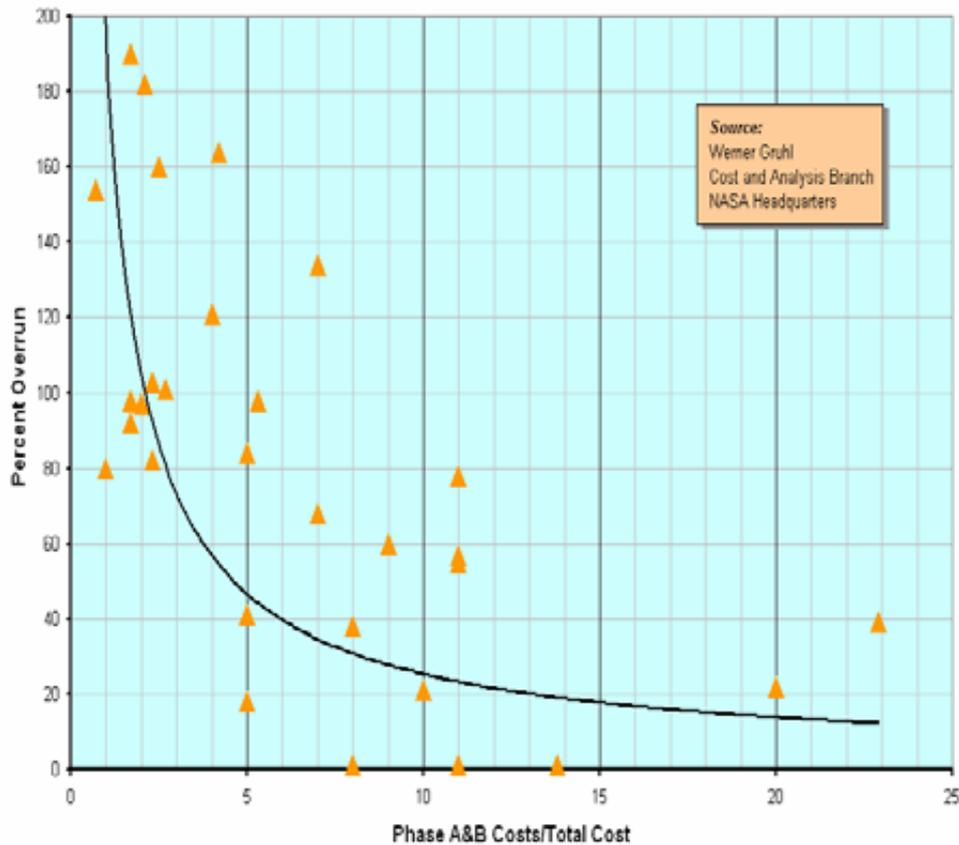


Bild 4: Projekt-"overrun" versus Investitionskosten in den Phasen A/B (NASA)

"Ist die gewählte Technologie reif genug, um sie in einem Produkt einsetzen zu können?". Um diese Frage objektiv zu beantworten, hielten seit den 80er Jahren US-Beschaffungsbehörden (US DoD, NASA, ...) nach einer aussagekräftigen Methodik Ausschau.

In diesem Zusammenhang wurde die "Technology Readiness Levels"-Skala definiert und wird seitdem in allen Beschaffungsprogrammen der US-Verwaltung eingesetzt. Ähnliche Methoden zur Technologieentwicklungsreifebewertung wurden im Weiteren auch seitens des US DoD weiterentwickelt.

Diese TRL-Skala wird mittlerweile auch von internationalen und europäischen, militärischen Beschaffungsbehörden der NATO, UK MoD, DGA, BWB, sowie von Raumfahrtagenturen (ESA, CNES, DLR,...) angewendet.

Dieses Kapitel beschreibt die verschiedenen wichtigsten Entwicklungsrichtlinien, um die TRL-Skala anzuwenden. Zusätzlich werden einige signifikante Modelle (IRL, TNV, IML,...), die im Zusammenhang mit der TRL-Methodik zum risikokontrollierten Einsatz von neu entwickelten Technologien weiterentwickelt wurden, kurz präsentiert und deren Beziehung zur TRL-Skala dargestellt.

#### 4.1. Definitionen zur Technologiereife

In den folgenden Kapiteln werden die verfügbaren Definitionen zur Technologieentwicklungsreife dargestellt. Diese gehen von den NASA Definitionen aus und wurden für die verschiedenen Anwendungszwecke unter anderem vom US Department of Defense (US DoD), UK Ministry of Defence (UK MoD), NATO und ESA an weitere Bedürfnisse angepasst.

#### 4.1.1. TRL und IRL Definitionen der NASA

Technologiereifegrade (TRL: "Technology Readiness Levels") wurden ursprünglich von der NASA in den 80er Jahren entwickelt. Die Originaldefinitionen beinhalteten zuerst sieben Stufen, die später zu neun Stufen erweitert wurden.

Die US Air Force übernahm das TRL-Konzept in den 90er Jahren. Im Jahr 1995 veröffentlichte die NASA das "White Paper on Technology Readiness Levels" von John C. Mankins. Mankins schlug die Anwendung von TRL bei der NASA mit folgenden Reifegrad-Beschreibungen vor (siehe Bild 5).

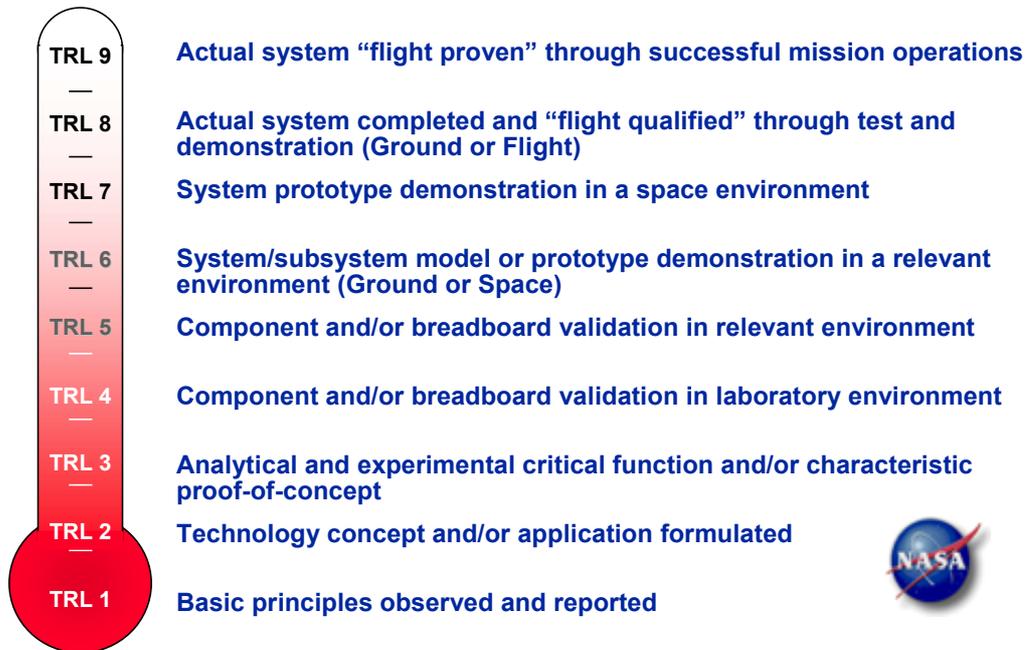


Bild 5: TRL Definitionen der NASA

Die Anwendung der TRL-Skala dient der Quantifizierung des Reifegrades von Technologieentwicklungen, beginnend beim wissenschaftlichen Basiswissen bis zu dessen Anwendung eingebettet in Produktapplikationen. Die TRL Skala wird insbesondere verwendet, um Forschungs- und Technologie-Entwicklungsprozesse zu steuern unter Verwendung von Entscheidungspunkten zwischen den wesentlichen Schritten.

In den 90er Jahren wurde bei der NASA die TRL-Skala mit den üblichen Entwicklungsschritten für eine betrachtete Technologie verbunden und in dem strategisch-langfristig ausgerichteten Technologie-Forschungs- und Entwicklungs-Programms „Human Exploration and Development of Space“ (HEDS) angewendet (siehe Bild 6):

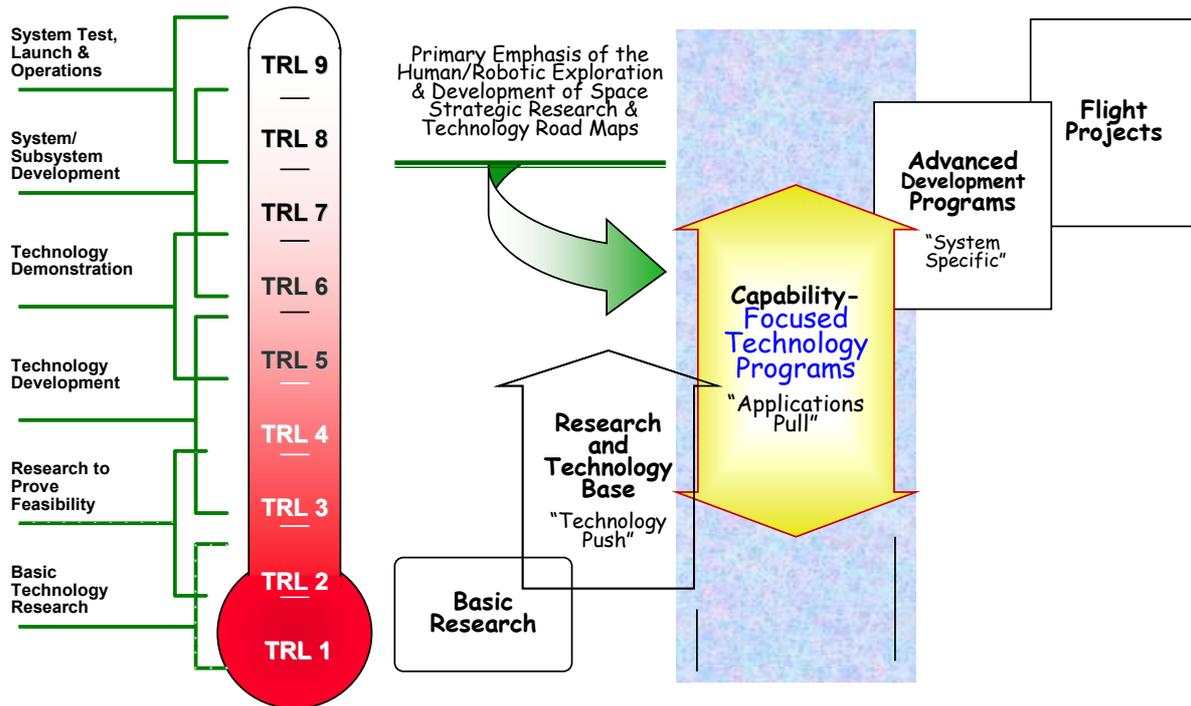


Bild 6: TRL-basiertes Technologieentwicklungsprogramm (NASA)

Im Jahr 2003 veröffentlichte ein Team von NASA Experten im Rahmen des Programms "Reusable Launch Vehicle" (RLV) ein auf Integrationsreifegraden (IRL: Integration Readiness Levels) basierendes Phasen-Entwicklungs-Verfahren (Phased Development Approach), um bei der Auswahl von Sequenzfolge und Inszenierung von Flugtestdemonstratoren das Technologieentwicklungsrisiko zu reduzieren. Dieses Verfahren, das sowohl Technologiekomponenten als auch Systemaspekte der Fluggeräteentwicklung berücksichtigt, liefert Aussagen über die Wahrscheinlichkeit, das Missionsziel zu erreichen.

Das Verfahren verwendet sowohl die TRL- als auch die IRL-Skala (siehe Bild 7), um sowohl die Reife von Technologiekomponenten als auch deren Systemintegrationspotential abzubilden (siehe Bild 8, das die Beziehungen zwischen TRL und IRL darstellt). Diese Einordnung wird unterstützend dabei verwendet, die relevanten Phasen bzw. Aktivitäten für die einzelnen Entwicklungsschritte zu etablieren. Die IRL-Einschätzung wurde also eingeführt, um die Systemintegrations-Bereitschaft einer gegebenen Technologie zu messen in einer vergleichbaren Art, wie die TRL-Einschätzung den Entwicklungsstand einer Technologiekomponente misst.

### IRL-Definition der NASA

Ab einer TRL-Einstufung 4 bis 6 ist eine Technologie unter bestimmten Umständen bereits einsetzbar. Das bedeutet, dass die betrachtete Komponente, ggf. mit Einschränkungen hinsichtlich Funktionalität oder Leistungsumfang in einem höherem Systemlevel integrierbar ist. Die IRL Einstufung grenzt die einzelnen Ebenen der Systemreife gegeneinander ab. Die IRL Definitionen der NASA sind in Bild 7 dargestellt.



Bild 7: IRL Definitionen (NASA)

Bild 8 zeigt die Verknüpfung von TRL- und IRL-Einstufung. Zwischen TRL 4 bis 6 ist eine Einstufung IRL von 1 möglich. Ein vollständig integriertes System, das einen TRL 9 z. B. durch einen erfolgreichen Missionseinsatz erreicht hat, ist demnach einem IRL von 5 zuzuordnen.

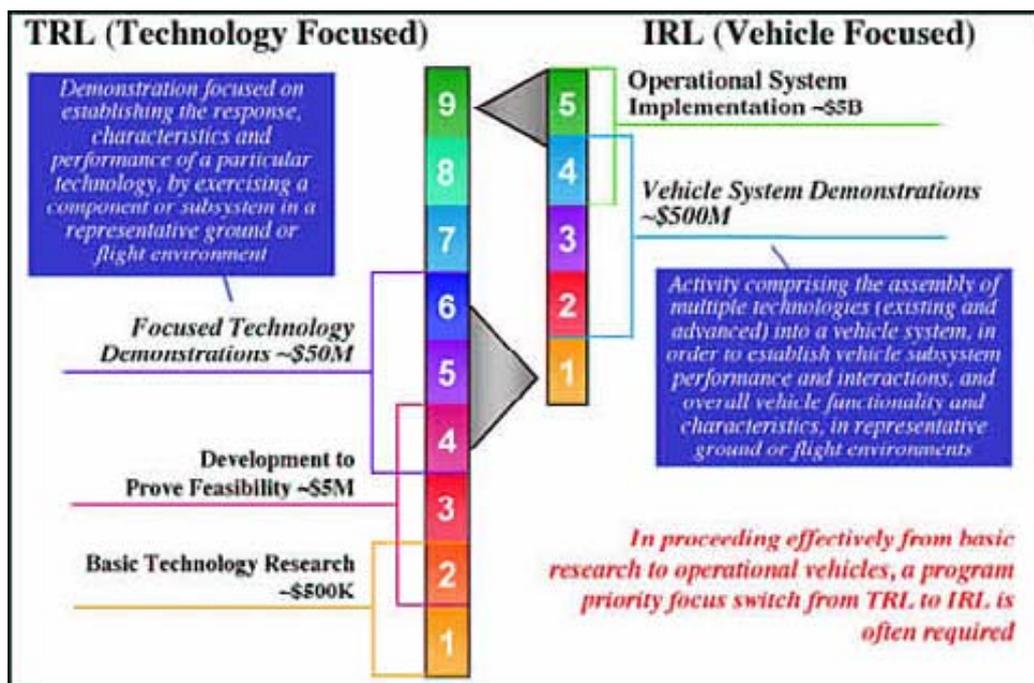


Bild 8: Zusammenspiel von TRL und IRL (NASA)

Die von der NASA verwendeten Begriffe für die TRL und IRL Beschreibungen werden in Anhang 9.2 ausgeführt.

#### 4.1.2. TRL und TRA Definitionen des amerikanischen Verteidigungsministeriums (US DoD)

Im Sommer 1999 veröffentlichte das US General Accounting Office (GAO) einen Bericht mit der Empfehlung an das US DoD, die TRL-Skala zur Prüfung der Technologien anzuwenden, für die der Übergang in ein Beschaffungsprogramm geplant ist. Der Bericht hob hervor, dass der Einsatz

unzureichend entwickelter Technologien die Risiken des Gesamtprogramms deutlich erhöht (siehe Bild 9, Programmrisiken nehmen ab mit der Zunahme der Entwicklungsreife der Technologie).

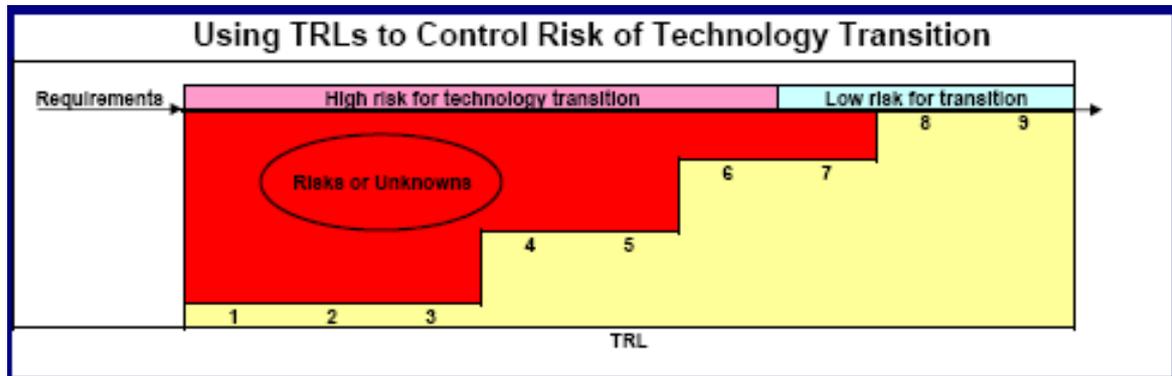


Bild 9: Programmrisiko bei der Übernahme von unreifer Technologie

Das US DoD veröffentlichte im Jahre 2003 die Prinzipien und Richtlinien sowie vorgeschriebene Methoden und Prozeduren, um Beschaffungsprogramme zu managen (DoDD-5000.1 und DoDI-5000.2). Ein wesentliches Thema im zentralen Beschaffungsprozess ist, dass Technologie hinreichend entwickelt, also "reif" sein muss, bevor die Systementwicklung beginnt. Um Technologie jedoch als ausgereift betrachten zu können, muss sie zuvor zur Anwendung gekommen oder in Form von Prototypen (auf System-, Sub-System- oder Komponentenebene) in einem relevanten bzw. operationellen Umfeld getestet worden sein und eine den Anforderungen entsprechende Leistung für die vorgesehene Anwendung nachgewiesen haben. Dies erfordert die Notwendigkeit einer Maßeinheit für die Technologieentwicklungsreife sowie einen Prozess, der gewährleisten kann, dass nur ausreichend „reife“ Technologie verwendet wird. Diese Notwendigkeiten sind in der DoDI-5000.2-Anweisung definiert, die eine Anforderung für die Technologiereife-Einschätzung (TRA: Technology Readiness Assessments) beinhaltet.

Der US DoD-Beschaffungsprozess ist in Bild 10 dargestellt. TRA sollten zu Programmbeginn (vor Meilenstein A) und vor den Meilensteinen B und C durchgeführt werden. Die TRA-Ergebnisse sind Bestandteil der Meilenstein-Entscheidungen.

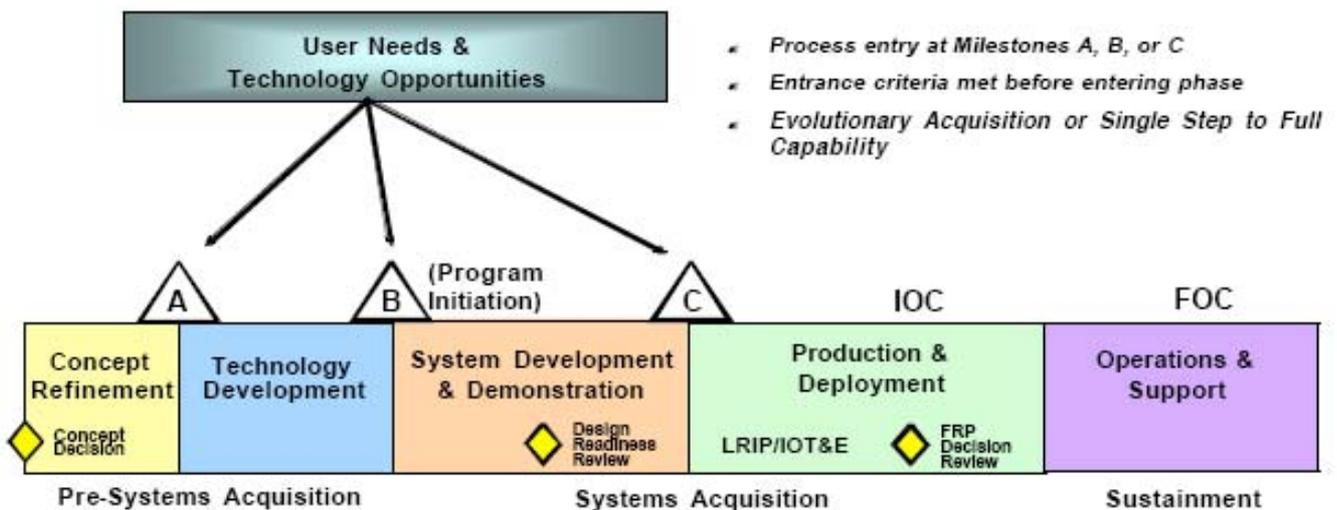


Bild 10: Beschaffungsprozess des US DoD (DoDI-5000.2)

Eine Anleitung wie Technologieentwicklungsreife eingestuft werden kann, ist im US DoD Dokument "Defense Acquisition Guidebook" beschrieben. Dieses Handbuch führt die TRL-Skala als ein

anerkanntes Mittel ein, um Technologieentwicklungsreife zu bewerten, basierend auf den Definitionen der NASA (siehe Bild 11).

Weitere detaillierte Anweisungen zur TRL-Anwendung wurden in dem US DoD Dokument "Technology Readiness Assessment Deskbook" veröffentlicht. Ein entsprechender TRL-Rechner ("Technology Readiness Level Calculator") wurde von der US Air Force im Jahre 2004 herausgegeben. Dieses Werkzeug beinhaltet einen standardisierten Fragenkatalog, dessen Beantwortung in einer entsprechenden grafischen Darstellung des erreichten TRL resultierend. Dieses Werkzeug dient der Erstellung einer Momentaufnahme der Technologieentwicklungsreife zu einem definierten Zeitpunkt.

Title Page		AFRL HW Comments	AFRL SW Comments	Army TRL Definitions	AFRL Comment on Army TRLs
<b>Technology Readiness Levels (TRLs)</b>			<b>Descriptions of TRLs for Hardware and Software</b>		
<b>Generate Knowledge (Research)</b>			<b>Generate Knowledge (Research)</b>		
Basic Technology Research	Level 1	Basic principles observed and reported	TRL 1	Lowest level of technology readiness. Scientific research begins to be translated into applied research and development. Examples might include paper studies of a technology's basic properties.	
Research to Prove Feasibility	Level 2	Technology concept and/or application formulated	TRL 2	Invention begins. Once basic principles are observed, practical applications can be invented. Applications are speculative and there may be no proof or detailed analysis to support the assumptions. Examples are limited to analytic studies.	
Technology Development	Level 3	Analytical and experimental critical functions and/or characteristic proof-of-concept	TRL 3	Active research and development is initiated. This includes analytical studies and laboratory studies to physically validate analytical predictions of separate elements of the technology. Examples include components that are not yet integrated or representative.	
Technology Development	Level 4	Component and/or breadboard validation in laboratory environment	TRL 4	Basic technological components are integrated to establish that they will work together. This is relatively "low fidelity" compared to the eventual system. Examples include integration of "ad hoc" hardware in the laboratory.	
Technology Demonstration	Level 5	Component and/or breadboard validation in relevant environment	TRL 5	Fidelity of breadboard technology increases significantly. The basic technological components are integrated with reasonably realistic supporting elements so it can be tested in a simulated environment. Examples include "high fidelity" laboratory integration of components.	
System/Subsystem Development	Level 6	System/subsystem model or prototype demonstration in a relevant environment	TRL 6	Representative model or prototype system, which is well beyond that of TRL5, is tested in a relevant environment. Represents a major step up in a technology's demonstrated readiness. Examples include testing a prototype in a high fidelity laboratory environment or in simulated operational environment.	
System/Subsystem Development	Level 7	System prototype demonstration in an operational environment	TRL 7	Prototype near or at planned operational system. Represents a major step up from TRL6, requiring demonstration of an actual system prototype in an operational environment, such as in aircraft, vehicle, or space. Examples include testing the prototype in a test bed aircraft.	
System Test and Operation	Level 8	Actual system completed and qualified through test and demonstration	TRL 8	Technology has been proven to work in its final form and under expected conditions. In almost all cases, this TRL represents the end of true system development. Examples include developmental test and evaluation of the system in its intended weapon system to determine if it meets design specifications.	
System Test and Operation	Level 9	Actual system proven through successful mission operations	TRL 9	Actual application of the technology in its final form and under mission conditions, such as those encountered in operational test and evaluation. Examples include using the system under operational mission conditions.	
<b>Produce Products and Capabilities (Development)</b>			<b>Produce Products and Capabilities (Development)</b>		

Bild 11: TRL Definitionen des US DoD

Der TRL-Rechner des US DoD beinhaltet auch eine differenzierte TRL-Darstellung der US Army CECOM mit einer separaten Beschreibungen für Hardware und Software (siehe Bild 12).

TRL 1	<p><b>HW/S:</b> Lowest Level of Technology Readiness. Scientific research begins to be translated into applied research and development. Examples might include paper studies of a technology's basic properties.</p> <p><b>SW:</b> Lowest level of software readiness. Basic research begins to be translated into applied research and development. Examples might include a concept that can be implemented in software or analytic studies of an algorithm's basic properties.</p>
TRL 2	<p><b>HW/S/SW:</b> Invention begins. Once basic principles are observed, practical applications can be invented. Applications are speculative and there is no proof or detailed analysis to support the assumptions. Examples are limited to analytic studies.</p>
TRL 3	<p><b>HW/S:</b> Active research and development is initiated. This includes analytical studies and laboratory studies to physically validate analytical predictions of separate elements of the technology. Examples include components that are not yet integrated or representative.</p> <p><b>SW:</b> Active research and development is initiated. This includes analytical studies to produce code that validates analytical predictions of separate software elements. Examples include software components that are not yet integrated or representative but satisfy an operational need. Algorithms run on a surrogate processor in a laboratory environment.</p>
TRL 4	<p><b>HW/S:</b> Basic technological components are integrated to establish that they will work together. This is relatively "low fidelity" compared to the eventual system. Examples include integration of "ad hoc" hardware in the laboratory.</p> <p><b>SW:</b> Basic software components are integrated to establish that they will work together. They are relatively primitive with regard to efficiency and reliability compared to the eventual system. System software architecture development initiated to include interoperability, reliability, maintainability, extensibility, scalability and security issues. Software integrated with simulated current /legacy elements as appropriate.</p>
TRL 5	<p><b>HW/S:</b> Fidelity of breadboard technology increases significantly. The basic technological components are integrated with reasonably realistic supporting elements so that it can be tested in a simulated environment. Examples include "high fidelity" laboratory integration of components.</p> <p><b>SW:</b> Reliability of software ensemble increases significantly. The basic software components are integrated with reasonably realistic supporting elements so that it can be tested in a simulated environment. Examples include "high fidelity" laboratory integration of software components. System software architecture established. Algorithms run on a processor(s) with characteristics expected in the operational environment. Software releases are 'Alpha' versions and configuration control initiated. Verification, Validation and Accreditation (VV&amp;A) initiated.</p>
TRL 6	<p><b>HW/S:</b> Representative model or prototype system, which is well beyond that of TRL 5, is tested in a relevant environment. Represents a major step up in technology's demonstrated readiness. Examples include testing a prototype in a high fidelity laboratory environment, or in a simulated operational environment.</p> <p><b>SW:</b> Representative model or prototype system, which is well beyond that of TRL 5, is tested in a relevant environment. Represents a major step up in software demonstrated readiness. Examples include testing a prototype in a live/virtual experiment or in simulated operational environment. Algorithm run on processor or operational environment integrated with actual external entities. Software releases are 'Beta' versions and configuration controlled. Software support structure in development. VV&amp;A in process.</p>
TRL 7	<p><b>HW/S:</b> Prototype near, or at, planned operational system. Represents a major step up from TRL 6, requiring demonstration of an actual system prototype in an operational environment, such as an aircraft, vehicle, or space. Examples include testing the prototype in a test bed aircraft.</p> <p><b>SW:</b> Represents a major step up from TRL 6, requiring the demonstration of an actual system prototype in an operational environment, such as in a command post or air/ground vehicle. Algorithms run on processor of the operational environment integrated with actual external entities. Software support structure in place. Software releases are in distinct versions. Frequency and severity of software deficiency reports do not significantly degrade functionality or performance. VV&amp;A completed.</p>
TRL 8	<p><b>HW/S:</b> Technology has been proven to work in its final form and under expected conditions. In almost all cases, TRL represents the end of true system development. Examples include developmental test and evaluation of the system in its intended weapon system to determine if it meets design specifications.</p> <p><b>SW:</b> Software has been demonstrated to work in its final form and under expected conditions. In most cases, this TRL represents the end of system development. Examples include test and evaluation of the software in its intended system to determine if it meets design specifications. Software releases are production versions and configuration controlled, in a secure environment. Software deficiencies are rapidly resolved through support structure.</p>
TRL 9	<p><b>HW/S:</b> Actual application of the technology in its final form and under mission conditions, such as those encountered in operational test and evaluation. In almost all cases, this is the end of the last "bug fixing" aspects of system development. Examples include using the system under operational mission conditions.</p> <p><b>SW:</b> Actual application of the software in its final form and under mission conditions, such as those encountered in operational test and evaluation. In almost all cases, this is the end of the last "bug fixing" aspects of system development. Examples include using the system under operational mission conditions. Software releases are production versions and configuration controlled. Frequency and severity of software deficiencies are at a minimum.</p>

Bild 12: TRL Definitionen der US Army CECOM

Des Weiteren umfasst der TRL-Rechner so genannte "MRL"-Definitionen und Herstellungsprozess relevante Fragen (siehe Bild 13). Das Konzept von Herstellungs-Reifegraden "MRL" (manufacturing readiness levels) wurde zur Ausweitung der TRL-Methodik auf die Berücksichtigung von Produktionsfähigkeiten eingeführt. Die Zuordnung von TRL erlaubt keine Aussage darüber, ob ein Technologieprodukt auch in einer erschwinglichen Weise hergestellt werden kann. Die MRL-Bewertung adressiert Aspekte bezüglich Produktionsfähigkeit frühzeitig in der Entwicklungsphase und

dient der Unterstützung des Managements bei Beschaffungsprogrammen, die zentralen DoDD-5000.1-Anforderungen zu erfüllen:

- Fortgeschrittene Technologie muss in produzierbare Systeme integrierbar und in der kürzest machbaren Zeit einsetzbar sein
- Produktionsrisiken sind zu reduzieren und die Produktionsfähigkeit ist nachzuweisen bei Volllast-Produktion

Da Technologien mit einem TRL von 1 oder 2 in der Regel noch nicht reif genug sind, um einen Herstellungsprozess definieren zu können, beginnt die MRL-Skala bei Stufe 3 und endet, analog zu den TRL-Stufen, bei Stufe 9.

Manufacturing Readiness Level Definitions	
Generate Knowledge (Research)	
TRL	MRL
1	N/A
2	N/A
3	<b>Manufacturing Concepts Identified.</b> Assessment of current manufacturability concepts or producibility needs for key breadboard components.
4	<b>Laboratory Manufacturing Process Demonstration.</b> Key processes identified and assessed in lab. Mitigation strategies identified to address manufacturing/productibility shortfalls. Cost as an independent variable (CAIV) targets set and initial cost drivers identified.
5	<b>Manufacturing Process Development.</b> Trade studies and lab experiments define key manufacturing processes and sigma levels needed to satisfy CAIV targets. Initial assessment of assembly needs conducted. Process, tooling, inspection, and test equipment in development. Significant engineering and design changes. Quality and reliability levels not yet established. Tooling and machines demonstrated in lab. Physical and functional interfaces have not been completely defined.
6	<b>Critical Manufacturing Processes Prototyped.</b> Critical manufacturing processes prototyped, targets for improved yield established. Process and tooling mature. Frequent design changes still occur. Investments in machining and tooling identified. Quality and reliability levels identified. Design to cost goals identified.
7	<b>Prototype Manufacturing System.</b> Prototype system built on soft tooling, initial sigma levels established. Ready for low rate initial production (LRIP). Design changes decrease significantly. Process tooling and inspection and test equipment demonstrated in production environment. Manufacturing processes generally well understood. Machines and tooling proven. Materials initially demonstrated in production and manufacturing process and procedures initially demonstrated. Design to cost goals validated.
8	<b>Manufacturing Process Maturity Demonstration.</b> Manufacturing processes demonstrate acceptable yield and producibility levels for pilot line, LRIP, or similar item production. All design requirements satisfied. Manufacturing process well understood and controlled to 4-sigma or appropriate quality level. Minimal investment in machine and tooling - machines and tooling should have completed demonstration in production environment. All materials are in production and readily available. Cost estimates <125% cost goals (e.g., design to cost goals met for LRIP).
9	<b>Manufacturing Processes Proven.</b> Manufacturing line operating at desired initial sigma level. Stable production. Design stable, few or no design changes. All manufacturing processes controlled to six-sigma or appropriate quality level. Affordability issues built into initial production and evolutionary acquisition milestones. Cost estimates <110% cost goals or meet cost goals (e.g., design to cost goals met).
Produce Products and Capabilities (Development)	

Bild 13: Herstellungsfähigkeit: MRL Definitionen des US DoD

Im Jahre 2005 wurde eine überarbeitete Ausgabe des "Technology Readiness Assessment Deskbook" (TRA) vom US DoD veröffentlicht, das weitere TRL-Definitionen beinhaltet:

- TRL für Hardware, Software
- TRL für biomedizinische Anwendungen
- TRL Prozess für Produkt-Design und -Herstellung (EMRL: Engineering & Manufacturing readiness levels)

Die vom US DoD verwendeten Begriffe für die TRL Beschreibungen werden in Anhang 9.4 ausgeführt.

#### 4.1.3. Integration Maturity Levels (IML) Definitionen des britischen Verteidigungsministeriums (UK MoD)

Die Anwendung der TRL-Methodik ist im Rahmen des UK MoD Beschaffungs-Management-System AMS (Acquisition Management System: [www.ams.mod.uk](http://www.ams.mod.uk)) für alle Projekte mit technologischem Inhalt vorgeschrieben, sofern Investitionen damit verbunden sind. Die TRL-Einstufung erfolgt sowohl für Komponenten- als auch für Systementwicklungen.

Ein entsprechender TRL-Leitfaden wurde vom UK MoD veröffentlicht, wobei die TRL-Definitionen des US DoD übernommen wurden. Die Reifegradbewertung differenziert bei Hardware und Software in den TRL-Stufen 3 bis 7 und beschreibt zusätzlich die Aufschlüsselung von Produktstrukturen für eine detaillierte Reife- und Risikobewertung der verwendeten Technologien.

Für das Technologiemanagement wurden Systemreifegrade "SRL" (System Readiness Levels) sowie ein entsprechendes Selbstbewertungshilfsmittel definiert.

Für das Management von Schnittstellen bei der Integration von Komponenten oder Sub-Systeme wurden spezielle Integrationsreifegrade "IML" (Integration Maturity Levels) definiert (siehe Bild 14).

- Niedrige IML-Stufen (1 bis 3) entsprechen einem Systemdesign mit hohem Niveau und werden mit einer theoretischer Analyse der Interaktion zwischen den Sub-Systemen verbunden.
- Die Zuordnung zu mittleren IML-Stufen (4 bis 6) erfolgt bei Anwendung der Modellierung in einer synthetischen Umgebung, der Schnittstellenanforderungen und Auswirkungen auf andere Sub-Systeme und auf das Gesamt-System.
- Hohe IML-Stufen (7 bis 9) entsprechen einem praktischen Nachweis in einer "high fidelity" Umgebung oder in einem operationellem Umfeld derart, das eine Integration unter Berücksichtigung der übergeordneten Anforderungen erfolgreich erreicht werden kann.

Die IML-Zuordnung ergänzt die Einstufung in einen bestimmten TRL beim Risikomanagement im Rahmen der Beschaffung. TRL können in jedem System unter der Voraussetzung einer relevanten Umwelt zugewiesen werden. Im Vergleich zu TRL berücksichtigen die IML die für das untersuchte System relevanten, übergeordneten Aspekte.

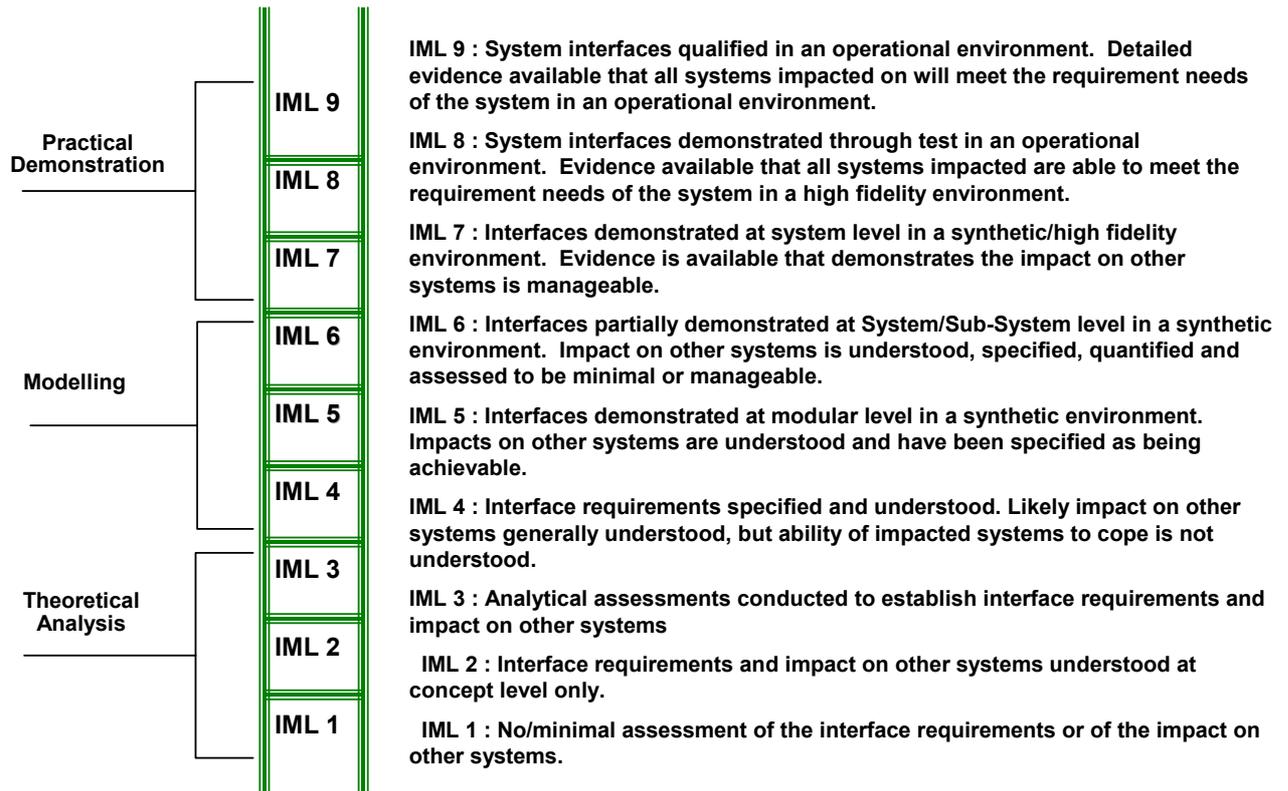


Bild 14: IML Definitionen des UK MoD

#### 4.1.4. TRL in NATO Programmen

Die TRL Methodik des US DoD wurde vom Prinzip her seitens der NATO übernommen. Die NATO-TRL beinhalten die zusätzlich eingeführte TRL-Stufe 0 für "Basisforschung mit der Absicht zukünftiger militärischer Fähigkeiten", um entsprechende Forschungsstudien bewerten zu können.

TRL werden formal angewendet für die Forschungs- und Technologieprojekte der NATO RTO (Research & Technology Organisation).

Das „Nato Undersea Research Centre“ (NURC) verwendet TRL, um die technische Reife seiner Forschungsergebnisse zu verfolgen.

#### 4.1.5. TRL in Programmen des französischen Verteidigungsministeriums (DGA)

Das französische Verteidigungsministerium verwendet TRL bei der Verfolgung und Bewertung der Forschungs- und Technologie-Politik sowie der wissenschaftlichen Ziele (POS: politique et d'objectifs scientifiques) (siehe Bild 15).

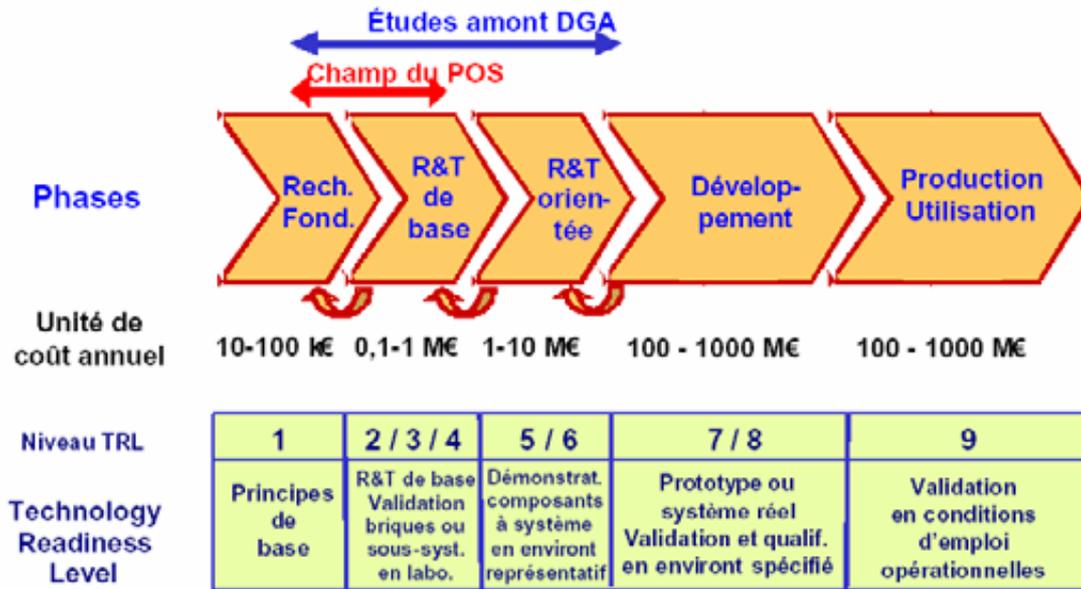


Bild 15: F&T Management mit TRL (DGA)

#### 4.1.6. TRL in ESA Projekten

Prinzipiell wurde die TRL Methodik der NASA von der ESA übernommen. Die systematische Verwendung von TRL spiegelt die Philosophie der unterschiedlichen Technologieentwicklungsprogramme bei ESA wieder. Die Technologieprogramme „Technology Research Programme“ (TRP) und „Generic Support Technology Programme“ (GSTP) dienen der Entwicklung von Technologiegrundlagen (siehe Bild 16). Die Überführung zur anwendungsreifen erfolgt in den anwendungsorientierten Programmen wie zum Beispiel Erdbeobachtung oder Telekommunikation, (siehe Bild 17, sowie Anhang 9.3, dort werden die im Bild verwendeten, mit den TRL verknüpften, ingenieurtechnischen Begriffe weiter ausgeführt).

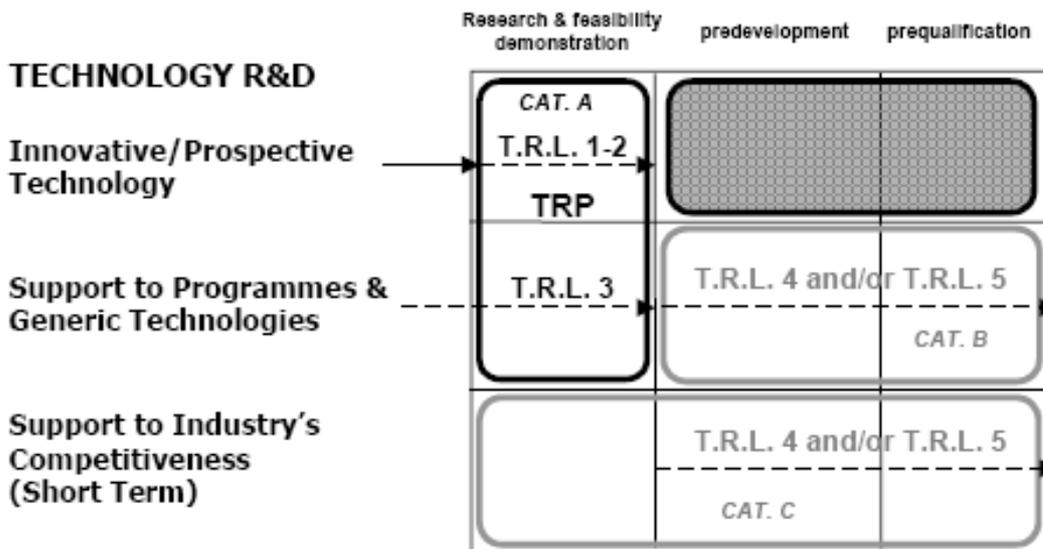


Bild 16: ESA Technologieentwicklungsprogramme: Kategorien

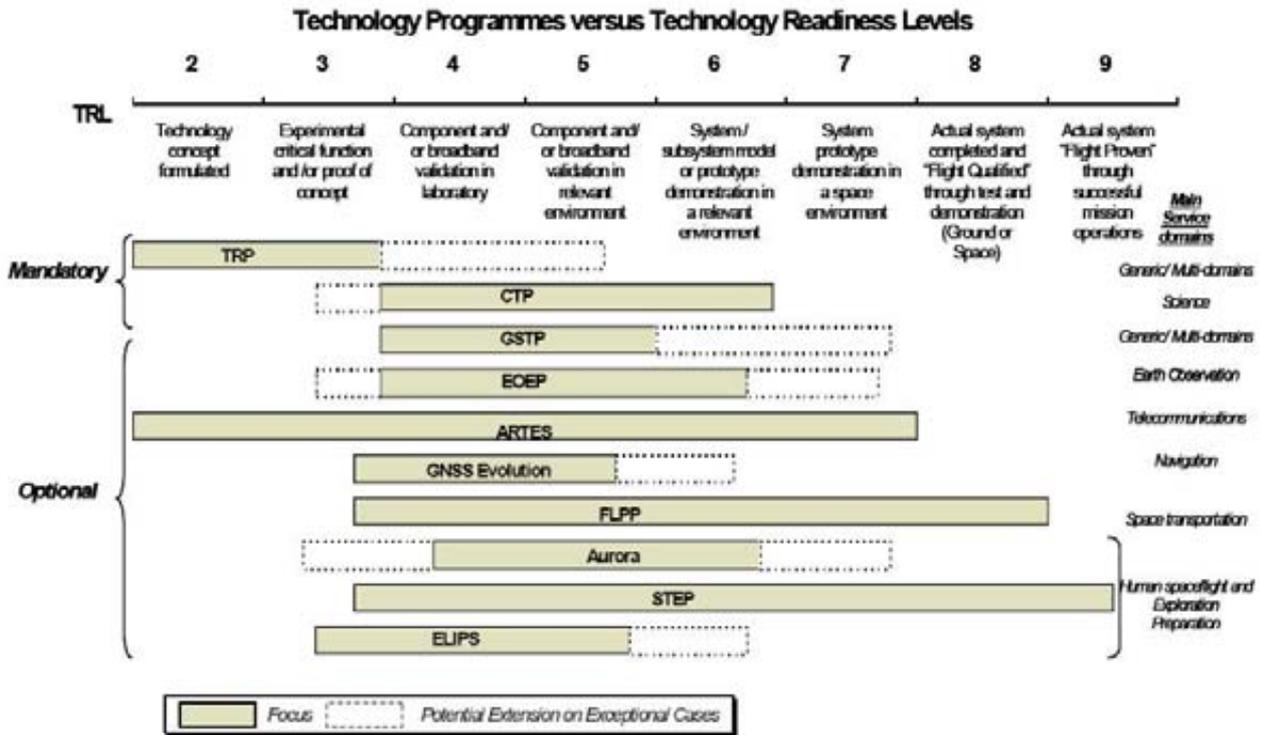


Bild 17: Technology Programmes versus Technology Readiness Levels

Im Rahmen des „Technology Research Programme“ (TRP) erfolgen über grundlegende Technologieuntersuchungen hinausgehende Entwicklungen bis zu einem TRL von 3 bis 4. Einschränkungen hinsichtlich des Anwendungsbereiches gibt es nicht. Im Generic Support Technology Programme (GSTP) wird die Entwicklung von Security-, Independence-, Spin-off – und Querschnittstechnologien bis zu einem TRL von 5 bis 6 schwerpunktmäßig behandelt. „In-Orbit-Verification“ (IOV)-Vorhaben führen Entwicklungen in einigen Fällen auch über diesen Wert hinaus bis hin zu einem TRL von 6 bis 7. Die Anwendungsentwicklung (TRL bis 9) wird in der Regel von den jeweiligen der Technologienutzung zugeordneten Fachbereichen Wissenschaft, Erdbeobachtung, Raumtransport, Navigation und bemannte Raumfahrt übernommen.

Die TRL werden nicht zur Beschreibung des Reifegrades von Softwareentwicklungen und entsprechenden Tools verwendet. Für diese Fälle erfolgt gemäß Bild 18 eine Beschreibung der Softwarequalität (Algorithmus, Prototype, Betaversion, Software-Ausgabe):

Readiness Levels for Software and tools	
Algorithm:	Single algorithms are implemented and tested to allow their characterisation and feasibility demonstration.
Prototype:	A subset of the overall functionality is implemented to allow e.g. the demonstration of performance.
Beta Version:	Implementation of all the software (software tool) functionality is complete. Verification & Validation process is partially completed (or completed for only a subset of the functionality).
Software Release:	Verification and Validation process is complete for the intended scope. The software (software tool) can be used in an operational context.

Bild 18: Readiness Levels for Software and Tools

## 4.2. TRL im Projektmanagement

Während der Projektdurchführung ergeben sich bei der Betrachtung der Einsetzbarkeit einer neuen Technologie für eine Systemkomponente zumindest folgende Fragen, die im Rahmen der Technologiebewertung beantwortet werden müssen:

- Wie reif ist die Technologie, d. h. welchen Entwicklungsstand hat sie erreicht?
- Welches sind die Risiken bei der (Weiter-)entwicklung?
- Wie hoch sind die Kosten der Technologieeinführung?
- Wie ist der Zeit- und Kostenrahmen der Technologieeinführung gestaltet?
- Wann wird mit dem Beschaffungsprozess begonnen?
- Welche Maßnahmen sind im Rahmen der Technologieentwicklung und -einführung erforderlich?

Der typische Technologielebenszyklus lässt sich in drei Phasen mit den entsprechenden Eigenschaften einteilen:

### Phase 1: Stand der Technik

- Neue und innovative Technologien sind verfügbar
- Wenige Hersteller auf dem Markt / Eingeschränktes Angebot
- Produktionsprozesse in der Lernphase
- Hohe Kosten

### Phase 2: Breite der Anwendung

- Reife Technologien
- Mehrere Hersteller / breites Angebot
- Ausgereifte schlanke Produktionsprozesse
- Niedrige Kosten

### Phase 3: Veraltete Technologien

- Alte Technologien
- Großhersteller verlassen den Markt
- Nischenzulieferer steigen ein
- Produktion von kleinen Loseinheiten
- Abnehmende Verfügbarkeit (Angebot, "obsolescences")
- Höhere Kosten

Gemäß US DoD wird ein technologisches Element als "kritisch" eingestuft, wenn das zu beschaffende System von diesem technologischen Element abhängt, um operationelle Anforderungen zu erreichen. Dabei müssen der Zeitrahmen, die Entwicklungs-, Produktions- und Anwendungskosten berücksichtigt werden, falls das technologische Element oder seine Anwendung entweder neu oder neuartig ist. Oder anders ausgedrückt: ein Element das neu oder neuartig ist oder in einer neuen oder neuartigen Weise verwendet wird, ist "kritisch", wenn es für die Entwicklung des Systems oder seiner Beschaffung notwendig ist seine operationelle Verwendung mit Erfolg zu erreichen.

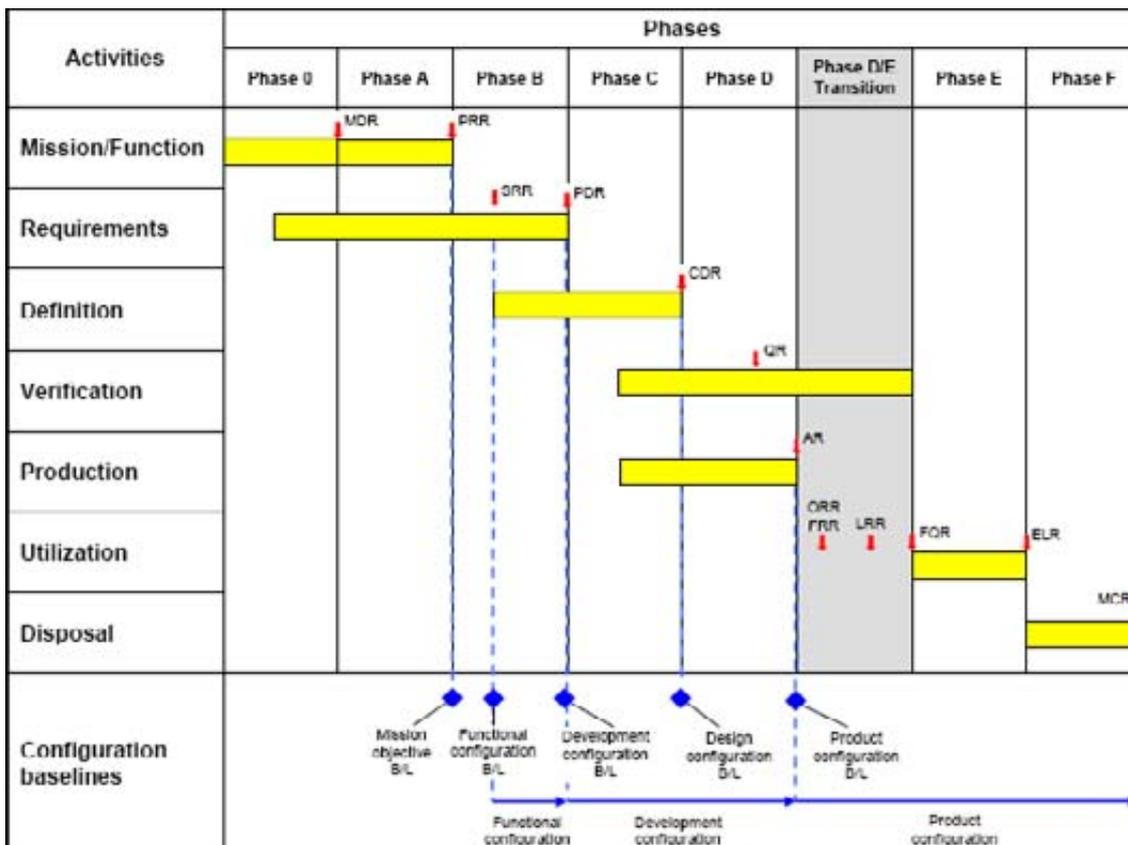
Um die Kritikalität eines technologischen Elements zu ermitteln, stellen sich folgende Fragen:

- Beeinflusst die Technologie direkt eine operationelle Anforderung?
- Hat die Technologie einen signifikanten Einfluss auf einen verbesserten Auslieferungszeitplan?
- Hat die Technologie einen signifikanten Einfluss auf die System-Finanzierbarkeit?
- Im Falle einer Spiral-Entwicklung (Methode nach Barry Boehm: zyklische Entwicklungsmethode, um die Definition und Implementierung eines Systems oder Software inkrementell und flexibel zu bilden/entwickeln, mit Meilenstein-Ankerpunkten, um die Machbarkeit, Fähigkeiten und Leistung der Systemlösung kontinuierlich zu überwachen), ist die Technologie absolut notwendig für die Spiral-Lieferungen?
- Ist die Technologie neu oder neuartig?
- Wird die Technologie verändert?

- Wird die Technologie unter Randbedingungen eingesetzt, sodass das Anwendungsgebiet einer vollständig neuen, relevanten Umwelt entspricht?
- Ist zu erwarten, dass die Technologie in Umgebungsbedingungen eingesetzt oder bzgl. der Leistungsparameter in einer Form beansprucht wird, die nicht den ursprünglichen Designanforderungen entspricht?

Der US DoD Beschaffungsprozess fordert, dass Technologieentwickslungsreife-Schätzungen (TRA) vor den Programm-Meilensteinen durchgeführt werden. Die TRA-Ergebnisse sind Bestandteil der Meilenstein-Entscheidungen.

In der ECSS-M-30 sind in den verschiedenen Projektphasen folgende Meilensteine definiert (siehe Bild 19). Eine Verknüpfung der Meilensteine mit der TRL und IRL Bewertung ist im Rahmen des Bewertungsverfahrens erforderlich und in Kapitel 6.2 dargestellt.



Project Review Milestones		Life cycle Phase
MDR	Mission Definition Review	0
PRR	Preliminary Requirement Review	A (pre-PRR: 0)
SRR	System Requirements Review	A end / B
PDR	Preliminary Design Review	B end
CDR	Critical Design Review	C end
PCA	Physical Configuration Audit	D
QR	Qualification Review	D / D end
AR	Acceptance Review	
ORR	Operational Readiness Review	D/E Transition
FRR	Flight Readiness Review	D/E Transition
LRR	Launch Readiness Review	D/E Transition
FQR	Flight Qualification Review	D/E Transition end
ELR	End-of-Life Review	E end
MCR	Mission Close-out Review	F

Bild 19: Project Review Milestones (ECSS)

### TRL, Kostenschätzungen und Entwicklungsrisiken

Neben den Entwicklungsrisiken ist auch der Kostenaufwand abzuschätzen. Eine qualitative Einschätzung der finanziellen Aufwendungen zum Erreichen des jeweiligen TRL ist in Bild 20 dargestellt (NASA, Mankins):

TRL	Cost to Achieve
1	Very low "unique" cost (investment cost is borne by scientific research programs) but: may be facility dependent
2	Very low "unique" cost (investment cost is borne by scientific research programs)
3	Low "unique" cost (technology specific)
4	Low-to-moderate "unique" cost (investment will be technology specific, but probably several factors greater than investment required for TRL 3)
5	Moderate "unique" cost (investment cost will be technology dependent, but likely to be several factors greater than cost to achieve TRL 4)
6	Technology and demonstration specific. A fraction of TRL 7 if on ground, nearly the same if space is required
7	Technology and demonstration specific, but a significant fraction of the cost of TRL 8 (investment = "Phase C/D to TFU" for demonstration system)
8	Mission specific. Typically highest unique cost for a new technology (investment = "Phase C/D to TFU" for actual system)
9	Mission specific. Less than cost of TRL 8 (e.g., cost of launch plus 30 days of mission operations)

Bild 20: TRL und Kostenschätzungen (NASA)

### Technologierisikoverringung

(US DoD): Das Technologierisiko ist eine Aussage über die Wahrscheinlichkeit, mit der eine Technologie den erwarteten Nutzen nicht liefern kann und somit die Leistungsanforderungen an das Gesamtsystem nicht erfüllt wird.

Technologierisikoverringung kann mehrere Formen annehmen:

- Budgetreservierungen für ungeplante Aktivitäten
- Parallel durchgeführte Design-Alternativen
- Kontinuierliches technisches Management

Abhängig von den jeweiligen Randbedingungen werden im Regelfall existierende, ausgereifte Technologien in neue Anwendungen integriert. In bestimmten Fällen erfordert eine neuartige Anwendung jedoch den Einsatz von Technologie, deren Entwicklungsreife für diesen speziellen Anwendungsfall noch nicht hinreichend nachgewiesen ist. Ungeachtet von der Anwendungsebene ist eine sorgfältige Betrachtung der technischen Integrationsrisiken auf Systemebene erforderlich. Zum Beispiel können in einem Projekt auf Sub-System-Level Technologien durchaus TRL 8 oder TRL 9 erreicht haben, aber auf System-Ebene jedoch ist die Lösung immer noch unzureichend. Deswegen ist es notwendig, die TRL-Methodik konsequent durch alle Bereiche einschließlich der Integrationsstufen anzuwenden und ggf. durch komplementäre Klassifizierungen für die Integrationsreife (z. B. IRL, MRL, etc.) zu erweitern.

## 4.3. TRL Anwendungsbeispiele

### 4.3.1. Lox-LH2 – Triebwerksentwicklung „Vulcain 1“

Das Vulcain ist ein Raketentriebwerk, das im Nebenstromverfahren arbeitet und in der ersten Stufe der Ariane 5 eingesetzt wird.

Das französische Verteidigungsministerium DGA entschied 1957, ein Kalttemperatur-Triebwerk für Raketen zu entwickeln. Der erste Prototyp wurde 1964 in Betrieb genommen. Auf der Ministerrats-Konferenz von Den Haag wurde die Entwicklung einer stärkeren Trägerrakete, der Ariane 5, beschlossen. Dafür musste auch ein neues Triebwerk, die Vulcain 1, gebaut werden. Schon nach einer relativ kurzen Entwicklungszeit wurde im April 1990 das erste Vulcain-Triebwerk gezündet und am 4. Juni 1996 zum ersten Mal in einer Trägerrakete eingesetzt.

Im Folgenden sind zu diesem Beispiel die einzelnen Stufen des erreichten Technologieentwicklungstandes beschrieben.

#### TRL 1: Beobachtete chemische Reaktion

Beobachtung der chemischen Reaktion:  $O_2 + 2 H_2 = 2 H_2O + \text{Energie}$   
Der "Technological Readiness Level" (TRL) 1 war erreicht.

#### TRL 2: Speicherung von LOx-LH2 in einem anderen Aggregatzustand

Formulierung der Idee LOx-LH2 in einem anderen Aggregatzustand, hier in flüssiger Form, zu speichern. Die chemische Reaktion erfolgt in einer Brennkammer in Kombination mit nachfolgender Entspannung in einer Schubdüse (ca. um 1950). Ein TRL 2 war erreicht.

#### TRL 3: Test-Bench-Nachweis Einspritzsystem

Demonstration der Funktionsweise mit Hilfe eines Versuchsaufbaus des Einspritzsystems, das mit flüssigem Sauerstoff und Wasserstoff arbeitet. Ein TRL 3 war erreicht (siehe Bild 21).



Bild 21: Versuchsaufbau zum Technology Readiness Level 3

#### TRL 4: Konzept-Nachweis Prototyp Labor-Bedingungen (1966)

Nach der experimentellen Überprüfung des Konzepts wurden Tests zur Verifizierung verschiedener Leistungsparameter durchgeführt. Ein TRL 4 war erreicht (siehe Bild 22).



Bild 22: Der erste Europäische LOX-LH2-Antriebs-Prototyp (1966)

**TRL 5: Test-Bench-Nachweis Vulcain 1 (1988, Lampoldshausen)**

Es erfolgten Tests mit einem 1:1 Demonstrator mit reduziertem Funktionsumfang. Ein TRL 5 war erreicht (siehe Bild 23).

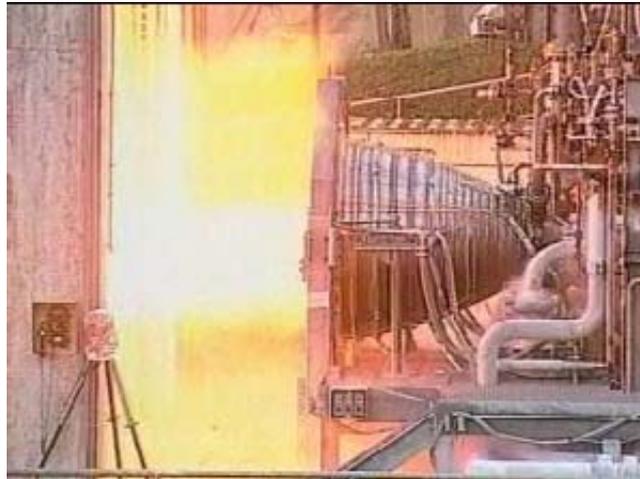


Bild 23: Vulcain 1 Brennkammertests am P3.2 Versuchsstand des DLR, Lampoldshausen (1988)

**TRL 6: Qualifikationstests des Vulcain-Triebwerks (1993, Vernon)**

Es wurden komplette Boden- und Qualifikationstests durchgeführt. Die Tests deckten alle Anwendungsbereiche und alle Umgebungsbedingungen der Trägerrakete ab. Ein TRL 6 war erreicht (siehe Bild 24).



Bild 24: Vulcain-Triebwerk bei Qualifikationstests in Vernon (1993)

**TRL 7: System Prototyp Demonstration im Weltraum**

Diese Demonstration ist für das Vulcain 1-Triebwerk nicht durchgeführt worden. Ein anderes Beispiel für diesen TRL ist die Durchführung eines Flugtests mit dem Aestus-Triebwerk inklusive Wiedorzündung während des V112 Flugs 1998 (siehe Bild 25).



Bild 25: V112 Flug (1998)

**TRL 8: Flugqualifikation durch Test und Demonstration (Boden oder Flug)**

Validierung aller Leistungsparameter des Triebwerks unter Trägerrakete-Umgebungsbedingungen. Durchführung der Qualifikationsflüge und Bestätigung durch die ermittelten Flugdaten, dass das Verhalten der Trägerrakete mit den Berechnungen übereinstimmt. Das Ende dieses Prozesses wurde 1998 das „Launcher Qualification Review“ mit dem TRL 8 erreicht (siehe Bild 26).



Bild 26: Start einer Ariane-Rakete mit Vulcain 1 Triebwerk

**TRL 9: Kommerzielle Anwendung Ariane5 “flight proven”**

Das Triebwerk wird im kommerziellen Betrieb eingesetzt. Damit wurde ein TRL 9 erreicht.

### 4.3.2. „H-infinite“ Launcher Navigation

Für die automatische Steuerungskontrolle der Ariane 5 im exo-atmosphärischen Einsatz wurde die "H-infinite" Technologie eingesetzt. Diese basiert auf einem nicht-linearen Regelkreis zur Überwachung der Flugkonfigurationen und Kontrolle der Steuerungsregelung.

Im folgenden Text sind zu diesem Beispiel die einzelnen Stufen des erreichten Technologieentwicklungstands beschrieben.

#### **TRL 1: Grundlagen werden erfasst und dargelegt**

Beschreibung der mathematischen Theorie der H infinite Norm. Ein TRL 1 ist erreicht.

#### **TRL 2: Technologiekonzept und/oder Technologieanwendbarkeit festgelegt**

Formulierung der Idee das Konzept der H infinite Norm für eine stabile Regelkreis-Kontrolle ( $H^\infty$  controller) eines Steuerungssystems zu verwenden. In den Jahren 1991-94 wurde diese These erstmals formuliert. Damit war ein TRL 2 erreicht.

#### **TRL 3: Analytisches und experimentelles Nachweiskonzept der kritischen Funktion und/oder der Ausprägung**

Charakterisierung der theoretischen Machbarkeit und der Umsetzung an einem Steuerungssystem einer Trägerrakete. Dies wurde 1994-97 im Rahmen einer ersten F&E – Phase durchgeführt. Damit war ein TRL 3 erreicht.

#### **TRL 4: Validierung der Komponente und/oder des Funktionsmodells im Laborumfeld**

Erstellung eines " $H^\infty$  Controller" und Analyse der Leistungsdaten im Vergleich zum ursprünglichen Kontrollsystem. Dies wurde 1998-99 im Rahmen einer zweiten F&E – Phase durchgeführt. Damit war ein TRL 4 erreicht.

#### **TRL 5: Validierung der Komponente und/oder des Funktionsmodells in einer relevanten Umgebung**

Validierung des Steuerungssystems im kompletten Leistungsbereich durch Simulation. Die Arbeiten wurden im Ariane 5 Phase 1 Programm 1999-2000 durchgeführt. Am Ende dieser Phase wurde entschieden die  $H^\infty$  Methode in der Flug-Software zu implementieren. Damit war ein TRL 5 erreicht.

#### **TRL 6: Demonstration des System-/Subsystem-Modells oder Prototyps in einer relevanten Umgebung (Boden oder Weltraum)**

Integration des Steuerungssystems im Flugprogramm und Validierung mit repräsentativer Hardware. Die Arbeiten wurden im Ariane 5 Phase 2 Programm 2000-2001 durchgeführt. Damit war ein TRL 6 erreicht.

#### **TRL 7: Demonstration des System-Prototyps in einer Weltraumumgebung**

Die mit diesem Level verbundenen Aktivitäten waren für dieses System nicht anwendbar.

#### **TRL 8: Ist-System vollständig und "flugqualifiziert" durch Prüfung und Demonstration (Boden oder Flug)**

Validierung aller Leistungsparameter unter Trägerrakete-Umgebungsbedingungen. Dies wurde erreicht nach allen Funktions- und Umgebungstests. Die Arbeiten wurden 2002-2003 durchgeführt. Mit dem „Launcher Qualification Review" wurde ein TRL 8 erreicht.

#### **TRL 9: Ist-System "flugerprobt" durch erfolgreichen Missionsbetrieb**

Durchführung erfolgreicher Qualifikationsflüge und Bestätigung durch Auswertung der Flugdaten, dass das Verhalten der Trägerrakete sich innerhalb der Voraussagen befindet. Die Qualifikation erfolgte im Rahmen des Ariane 517 EAP Fluges 2003. Damit wurde ein TRL 9 erreicht.

### 4.3.3. Das Gallium Arsenid (GaAs) Fotovoltaik Subsystem des GOCE Solargenerators, A. Caon (ESA)

Der "Gravity Field and steady-state Ocean Circulation Explorer" (GOCE) ist ein geowissenschaftlicher Satellit, der seit etwa 1995 von der ESA entwickelt wird. Er wird zur Messung der Gravitation und des stationären Zustandes der Ozeanzirkulation verwendet. Er soll der hochpräzisen Gradiometrie dienen und im Jahr 2008 mit einer Rockot-Rakete gestartet werden.

GOCE ist ein Satellit der "Earth Explorer Missions" der ESA, welche der Weiterentwicklung der Techniken und Wissenschaften der Erdbeobachtung aus dem Weltraum dienen.

#### **TRL 1: Grundlagen werden erfasst und dargelegt**

Während der Phase B des GOCE Projekts im Jahr 2001 wurde ersichtlich, dass sich das europäische Fotovoltaik Subsystem nicht für GOCE eignet, der für 2,5 Jahre in einer Höhe zwischen 240 und 270 km operieren wird. Das Problem bezog sich auf die Anwendung der Verbindungstechnologien der GaAs Solarzellen in Hinblick auf die GOCE-Missionsanforderungen (Temperaturbereich von +160°C bis -170°C, 23.000 Thermalzyklen und Einfluss von atomarem Sauerstoff). Im Zusammenhang mit TRL entspricht dies einem Level 1.

#### **TRL 2: Technologiekonzept und/oder Technologieanwendbarkeit festgelegt**

Technische Experten der ESA und der europäischen Industrie identifizierten Ende 2001 eine Anzahl von alternativen Technologielösungen für die Prozesse, Werkstoffe und Komponenten des Fotovoltaik Subsystems (z. B. Schweißprozesse, Verbindungswerkstoffe - silberbeschichtetes Molybdän, silberbeschichtetes Invar, Gold). Es wurde ein zugeordnetes Entwicklungsprogramm erstellt. Im Zusammenhang mit TRL entspricht dies einem Level 2.

#### **TRL 3: Analytisches und experimentelles Nachweiskonzept der kritischen Funktion und/oder der Ausprägung**

Anfang 2002 wurde das Entwicklungsprogramm zur Verbesserung der Schweißtechnologie und zur Realisierung verschiedener Fotovoltaik Subsysteme mit alternativen Verbindungen initiiert. Diese Muster wurden einem thermischen Umgebungstest bei Umgebungsdruck, einer elektrischen Charakterisierung und einer visuellen Inspektion unterzogen, um eventuelle auftretende Probleme zu bewerten. Die gewonnenen Testergebnisse wiesen auf die Realisierbarkeit der technischen Lösungen hin. Im Zusammenhang mit TRL entspricht dies einem Level 3.

#### **TRL 4: Validierung der Komponente und/oder des Funktionsmodells im Laborumfeld**

Der nächste Schritt war die Realisierung verschiedener Solarepanel-Versuchsaufbauten mit geeigneten Technologien (z. B. repräsentative Solarpaneleinheiten mit ausgewählten Verbindungstechnologien integrierter Solarzellen). Diese Versuchsaufbauten wurden einem reduzierten thermischen Umgebungstest (6.000 Zyklen) ausgesetzt und einer Leistungsbestimmung unterzogen. Diese Aktivitäten wurden Ende 2002 abgeschlossen und resultierten in der Identifizierung einer begrenzten Anzahl von Technologie Kandidaten mit einer hohen Wahrscheinlichkeit zum Bestehen der Qualifikationstests. Im Zusammenhang mit TRL entspricht dies einem Level 4.

#### **TRL 5: Validierung der Komponente und/oder des Funktionsmodells in einer relevanten Umgebung**

Dies war der geeignete Punkt, die Technologie in realistischeren Verhältnissen zu verifizieren (repräsentativ zur Flugkonfiguration der Solarepaneele). Testeinheiten wurden produziert und der vollständigen thermischen Qualifikation (23.000 Zyklen), der relevanten Leistungsmessung und mehreren Inspektionen unterzogen. Die bei ESTEC durchgeführten Tests ermöglichten die Auswahl der Technologie mit der höchsten Erfolgswahrscheinlichkeit (siehe Bild 27).

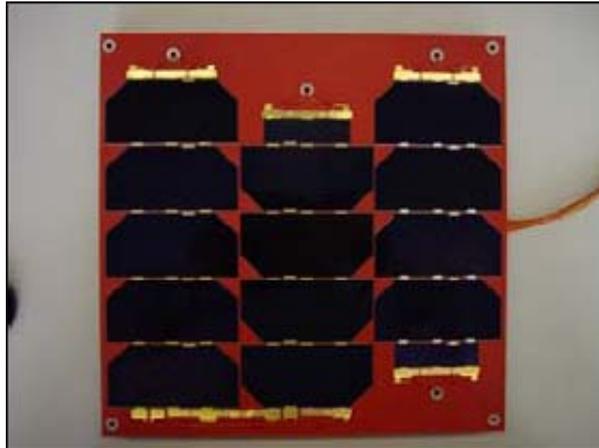


Bild 27: Vorqualifizierungs-Testeinheit

Im Rahmen des GOCE-Solargenerator Vertrages wurde ein weiterer Versuchsaufbau mit dem ausgewählten Fotovoltaik-Subsystem und einem Panelträger, der dem mechanischen Design des Solargenerators entsprach, hergestellt. Diese Testeinheit wurde einer der Missionsdauer entsprechenden thermischen Umgebungssimulation ohne Qualifikationstoleranz von 15.000 Zyklen unterzogen. Die gemessenen Leistungen bestätigten die Ergebnisse, die im Rahmen des vorherigen Entwicklungsprogramms erzielt wurden. Die beiden beschriebenen Entwicklungsaktivitäten wurden 2003 abgeschlossen. Im Zusammenhang mit TRL entspricht dies einem Level 5.

#### **TRL 6: Demonstration des System-/Subsystem-Modells oder Prototyps in einer relevanten Umgebung (Boden oder Weltraum)**

Der nächste Schritt in der Technologieentwicklung war die Herstellung und Überprüfung des Designs. Verifikations- und Testmodell (DVT), siehe Bild 28. Das mit vollständig zur Flugeinheit repräsentativen Technologien, Materialien und Komponenten hergestellte Subsystem wurde einer vollständigen thermischen Umgebungsqualifikation (23.000 Zyklen) unterzogen. Erneut waren die Ergebnisse vollständig anforderungskonform.



Bild 28: DVT Testabschnitt

Parallel dazu wurde ein Strukturmodell des Solargenerators hergestellt und auf Satellitenlevel mechanisch qualifiziert (siehe Bild 29). Das Strukturmodell bestand aus 6 Solarpanelen, war identisch zur Flugeinheit der mechanischen Struktur des Solargenerators und repräsentativ in Hinblick auf den elektrischen Teil.



Bild 29: STM Solarfeld

Die oben beschriebenen Aktivitäten wurden 2004 und 2005 durchgeführt. Somit wurde TRL 6 erreicht.

#### **TRL 7: Demonstration des System-Prototyps in einer Weltraumumgebung**

Der nachfolgende Schritt war die Herstellung des Flugmodells des Solargenerators. Es bestand aus vier am Satellitenkörper montierten Solarpanelen und zwei starren Solarpanneflügeln (siehe Bild 30). Der Solargenerator durchlief den vollen Leistungs- und Umgebungstest. Erneut waren die Ergebnisse vollständig anforderungskonform.



Bild 30: FM Solarfeld

TRL 7 wurde somit erreicht.

#### **TRL 8: Ist-System vollständig und "flugqualifiziert" durch Prüfung und Demonstration (Boden oder Flug)**

An dieser Stelle war der Solargenerator bereit, in den GOCE Satelliten integriert zu werden. Nach der Integration wurde der Solargenerator auf Satellitenlevel getestet. Somit wurde TRL 8 erreicht.

#### **TRL 9: Ist-System "flugerprobt" durch erfolgreichen Missionsbetrieb**

2008 wird GOCE gestartet. Ab diesem Zeitpunkt wäre TRL 9 erreicht.

#### 4.3.4. Einstellbarer Frequenzumwandler („Tuneable Frequency Converter“ (TFC) der Europäischen Weltraumorganisation ESA)

##### **TRL 1: Grundlagen werden erfasst und dargelegt**

Während der Entwicklungen des Telekom Satelliten Olympus, der 1993 in den Orbit gebracht wurde, traten Probleme mit der lokalen Oszillator-Baueinheit auf. Das Problem betraf die Verwendung von Kupferspulen, bei denen Schwingungen zu Frequenzmodulations-Störgeräuschen (Störsignalmodulation) führten. In diesem Zusammenhang lag ein TRL 1 vor.

##### **TRL 2: Technologiekonzept und/oder Technologieanwendbarkeit festgelegt**

Fachleute der ESA und der Industrie trafen sich, um für die vorliegende Problemstellung, ein mögliches Lösungskonzept zu ermitteln. Das Ergebnis war die Identifikation einer Anzahl alternativer Anwendungen, welche nicht durch „Störsignalmodulation“ beeinträchtigt werden. Der Technologie-Reifegrad erreichte an dieser Stelle den TRL 2.

##### **TRL 3: Analytisches und experimentelles Nachweiskonzept der kritischen Funktion und/oder der Ausprägung**

Ein Entwicklungsprogramm wurde eingeleitet, um ein Funktionsmodell hinsichtlich der kritischen Technologie-Bauelemente (z. B. dem Oszillatorkern) anzufertigen. Die gemessene Leistung war durch Haupteinflussgrößen wie Schwingungen und den Umgebungsbedingungen begrenzt. Die Ergebnisse bestätigten das Konzept; daher wurde TRL 3 erreicht.

##### **TRL 4: Validierung der Komponente und/oder des Funktionsmodells im Laborumfeld**

Ein Funktionsmodell (engl. breadboard (BB)) des kompletten Frequenzumwandlers, inklusive eines Empfängeroszillators wurde angefertigt. Die Konstruktion des Funktionsmodells war rein funktional und für keine spezielle Anwendung ausgerichtet. Die elektrischen Leistungsmerkmale sind unter Umgebungsbedingungen validiert worden. Durch dieses Vorgehen lag ein TRL 4 vor.

##### **TRL 5: Validierung der Komponente und/oder des Funktionsmodells in einer relevanten Umgebung**

Die Technologie war bereit für den Einsatz in einem realen Anwendungsfeld (Artemis Satelliten). Ein technisches Modell (engl. Engineering Model (EM)) des „Frequenzumwandlers“ (TFC) wurde nach Artemis Spezifikationen erstellt. Tests (Außen- und Temperaturtests) wurden seitens der Industrie durchgeführt, welche die vollständige Konformität der Anforderungen an die Baueinheit nachwiesen. Aufgrund dessen erreichte man den TRL 5.

##### **TRL 6: Demonstration des System-/Subsystem-Modells oder Prototyps in einer relevanten Umgebung (Boden oder Weltraum)**

Der nächste Technologie-Entwicklungsschritt war die Herstellung und Erprobung eines technischen Qualifikationsmodells (engl. Engineering Qualification Model (EQM)). Das Gerät absolvierte vollständige Funktions- und Umweltprüfungen am Boden, die Testergebnisse waren konform zu den Anforderungen; TRL 6 war somit erreicht.

##### **TRL 7: Demonstration des System-Prototyps in einer Weltraumumgebung**

Nachfolgend war die Herstellung von Flugmodellen (engl. Flight Models (FM)). Das Gerät absolvierte vollständige Funktions- und Umwelttests. Diese wurden am Boden mit reduziertem Belastungsniveau und mit reduzierten Belastungszeiten durchgeführt. Die folgenden Ergebnisse waren gemäß den Anforderungen vollständig konform, so dass TRL 7 erreicht wurde.

##### **TRL 8: Ist-System vollständig und „flugqualifiziert“ durch Prüfung und Demonstration (Boden oder Flug)**

Zu diesem Zeitpunkt war der Artemis Satellit bereit zur Integration. Die TFC-Einheit wurde in die Nutzlast integriert und im Satelliten getestet; TRL 8 wurde erreicht.

##### **TRL 9: Ist-System „flugerprobt“ durch erfolgreichen Missionsbetrieb**

Im Jahr 2001 wurde der Artemis Satellit gestartet. Kurze Zeit später erreichte Artemis seine endgültige Position im Orbit und absolvierte erfolgreich das In-Orbit Testprogramm. Aufgrund dessen wurde der TRL 9 erreicht.

### 4.3.5. TRL/IRL Anwendungsbeispiele: ESA Demonstratoren ARD und HERMES

#### 4.3.5.1. Anwendungsbeispiel: ARD (TRL hoch, IRL niedrig)

Der Atmospheric Reentry Demonstrator (ARD) ist ein unbemanntes Raumfahrzeug, das als Studie bei der Entwicklung einer europäischen Mannschaftskapsel für den Transport zur Internationalen Raumstation (ISS) entstanden ist. Es ähnelt vom Aussehen her einer Apollo-Kommandokapsel (siehe Bild 31).

Die Kapsel wurde von Aérospatiale hergestellt, ist 2,4 m hoch und hat einen Durchmesser von 2,8 m. Dies sind 50 Prozent der Maße, die später die Atmospheric-Reentry-Demonstrator-Astronautenkapsel haben soll. Ihr Äußeres besteht aus Aluminium. An der breiten Grundplatte der Kapsel befindet sich der Hitzeschild, welcher aus Aleastrasil besteht. Das Flugleitsystem sowie das elektrische System beruhen auf für die Ariane 5 entwickelten Technologien. Das Lageregelungssystem mit sieben Hydrazindüsen stammt von der deutschen DASA. Es dient dazu, die Kapsel mit dem Hitzeschild vor dem Eintritt in die Atmosphäre auszurichten.

Der erste und bisher einzige Start des ARD war ein suborbitaler Testflug. Er erfolgte am 21. Oktober 1998 vom Centre Spatial Guyanais in Kourou durch eine Ariane 5.

In einer Höhe von 216 km trennte sich der ARD zwölf Minuten nach dem Start von der Trägerrakete und stieg weiter auf eine maximale Höhe von 830 km. Während des Fluges wurden etwa 200 technische Parameter erfasst und zur Bodenstation gesendet. Beim Wiedereintritt traten am Hitzeschild Temperaturen von bis zu 900°C auf, das Innere der Landekapsel blieb jedoch jederzeit luftdicht und intakt. 101 Minuten nach dem Start wasserte der ARD 4,9 km vom anvisierten Zielpunkt im Pazifischen Ozean zwischen den Marquesas und Hawaii. Fünf Stunden später wurde die Kapsel geborgen und zu weiteren Untersuchungen nach Europa gebracht. Der ARD hatte sämtliche Anforderungen erfüllt.

Der ARD ist nun in der Cité de l'espace in Toulouse ausgestellt.

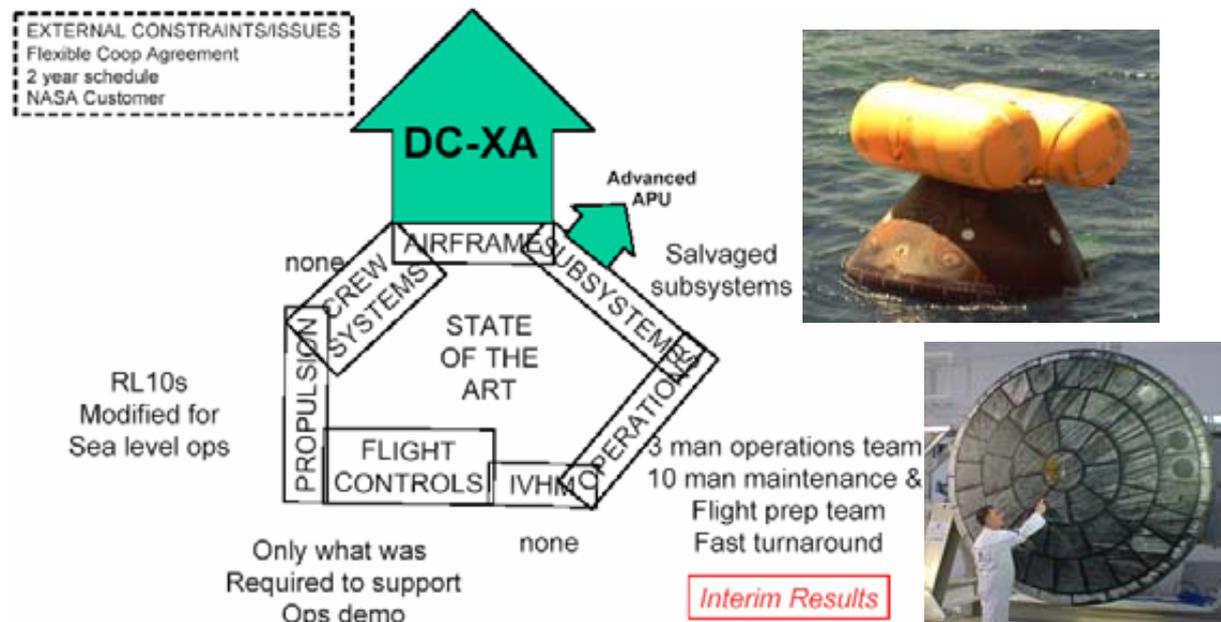


Bild 31: TRL Anwendungsbeispiel ARD

#### 4.3.5.2. Anwendungsbeispiel: HERMES (TRL Niedrig, IRL niedrig)

"Hermes" war der Vorschlag für eine Raumfähre, entwickelt von der Europäischen Weltraumorganisation (ESA). Die Raumfähre sollte für Versorgungsflüge zwischen der Erde und der geplanten Raumstation Columbus eingesetzt werden (siehe Bild 32). Die Entwicklung begann im November 1987 und wurde schließlich 1993 abgebrochen, nachdem sich die finanziellen und politischen Voraussetzungen geändert hatten.

Hermes sollte an der Spitze einer Ariane 5 ins All geschossen werden und bestand aus zwei Modulen: dem Antriebsmodul, das vor dem Wiedereintritt in die Atmosphäre abgetrennt wird und der Raumfähre selbst, die in die Erdatmosphäre eintritt und landet.

In der letzten Planungsversion, vor Beendigung des Projekts, sollte Hermes drei Astronauten und drei Tonnen Nutzlast transportieren. Das Gesamtgewicht beim Start hätte 21 Tonnen betragen, was als maximales Startgewicht einer Ariane-5-Plus angesehen wurde.

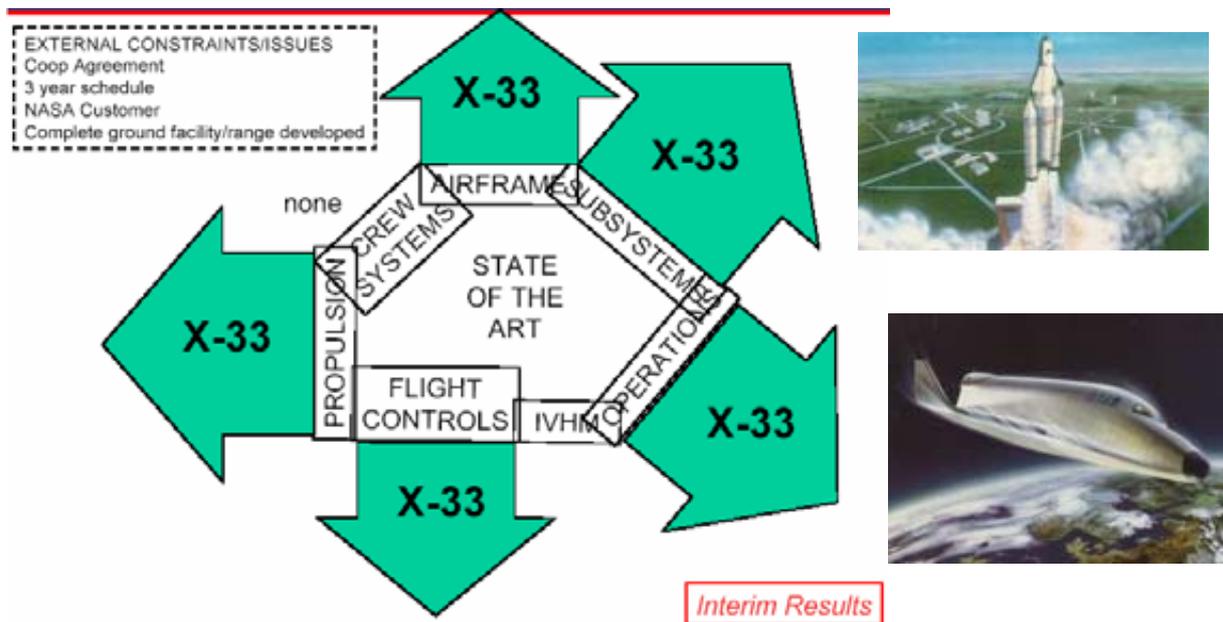


Bild 32: TRL Anwendungsbeispiel HERMES

## 5. Anforderungen

Die folgenden Anforderungen an das Bewertungsverfahren zur Einordnung der Technologie in eine TRL-Skala in allen Phasen des Projektablaufes werden im folgendem definiert.

- Auswahl, Beschreibung bzw. Definition der TRL Einordnung (z. B. ESA / NASA / US DoD)
- Abbildung der Technologieentwicklung und der TRL Stufen im Projektlebenszyklus
  - Zusammenspiel Projektmeilensteine (Reviews) vs. TRL / IRL Stufen
  - Betrachtung der technischen Systembestandteile und des Technologiebedarfs auf Komponentenebene (aus der Programm- bzw. Projektperspektive wird die Hierarchiekausalität einer Bewertung deutlich. Die Einschätzung der Technologieentwicklungsreife ist unmittelbar mit dem Aspekt der System-/Subsystemintegration verknüpft: der Reifegrad auf einer bestimmten Hierarchieebene ist abhängig von der erfolgreichen Integration der funktionierenden und damit „reifen“ Elemente sowie der Beherrschung der Schnittstellen auf der darunter liegenden Ebene, siehe Bild 33).
  - Einschätzung der Einzelkomponenten
  - Einschätzung des übergeordneten (Sub-)Systemlevels durch Bestimmung des Integrationslevels (Rückkopplung)
  - Betrachtung einer geflogenen Technologie unter veränderten Einsatzbedingungen (Änderung des Reifegrads möglich, denn die Bewertung der Technologieentwicklungsreife ist nicht immanent, d. h. der Einsatz einer Komponente in einem alternativen Umfeld kann den objektiv zugeordneten TRL verändern) wird auf Komponentenebene betrachtet

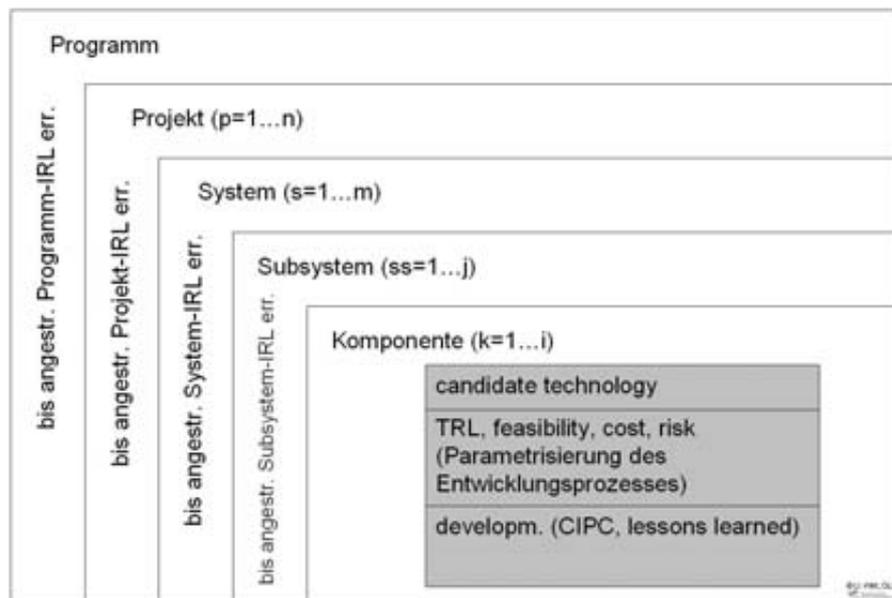


Bild 33: Integrationsreife und Systemaspekte

- Berücksichtigung von Lessons learnt in der Anwendung der TRL Einstufung
  - ISO/DIS 16192 (Space systems - Assessment of practical knowledge - Principles and guidelines)
- Definition von Kriterien zur Zuordnung zum jeweiligen TRL (Kriterienkatalog)
- Berücksichtigung des Risikos der Technologieweiterentwicklung bzw. -anpassung
  - Verfügbarkeit der Technologien
  - Einhaltung des Kosten- und Zeitrahmens
  - Erreichung der ursprünglich vorgesehenen Leistungsparameter

## 6. Bewertungsmethodik

### 6.1. Einleitung

Das folgende Kapitel beschreibt die Bewertungsmethodik während der Projektdurchführung. In den einzelnen Projektphasen ist mit der parallel zum Projekt laufenden Technologieentwicklung eine wiederholte Bewertung der Technologie hinsichtlich des Entwicklungsfortschrittes und der Einsetzbarkeit erforderlich. Der modulare Aufbau des Gesamtbewertungsverfahrens unterstützt diese Bewertungsmethodik.

Das TRL-Bewertungsverfahren (TRL Evaluation Process) ist in das Projekt eingebettet und beinhaltet die Methode zur TRL-Bewertung (TRL Identification Method), die den TRL ermittelt. Im Anschluss an das Verfahren wird der Integration Readiness Level (IRL) bestimmt (IRL Identification Method), um eine Aussage zum Einsatz einer bestimmten Technologie in einem Projekt zu ermöglichen.

### 6.2. TRL-Bewertung im Projektablauf

Die TRL-Bewertung im Projektablauf ist in der Matrix in Bild 34 dargestellt. Die X-Achse bildet die unterschiedlichen Projektphasen inklusive der Meilensteine (Reviews) ab, die von der Missionsanalyse angefangen bis zum Ende der erfolgreichen Technologieanwendung innerhalb der Mission reichen. Darüber hinaus sind den IRL von 1 bis 5 die unterschiedlichen Projektphasen auf der X-Achse zugeordnet. Die Y-Achse stellt die TRL von 1 bis 9 dar.

Die Matrix ermöglicht dem verantwortlichen Projektmanager in allen Projektphasen die erforderlichen TRL- / IRL- Aktionen, die zur erfolgreichen Projektabwicklung notwendig sind, zu bestimmen und einzuleiten.

Dabei sind die folgenden drei TRL- / IRL- Aktionen zu unterscheiden:

- TRL / IRL prüfen
- TRL / IRL sicherstellen
- TRL / IRL nachweisen

#### 6.2.1. TRL / IRL prüfen

Am Anfang einer Projektphase / eines Reviews wird die mögliche Erreichbarkeit des nächsten TRL / IRL, die zum Eintritt in die nächste Projektphase bzw. zum Review zwingend erforderlich ist, geprüft. Hierzu ist bei jeder Prüfung das TRL-Bewertungsverfahren (siehe Kapitel 6.3) inklusive der IRL-Bewertung anzuwenden.

#### 6.2.2. TRL / IRL sicherstellen

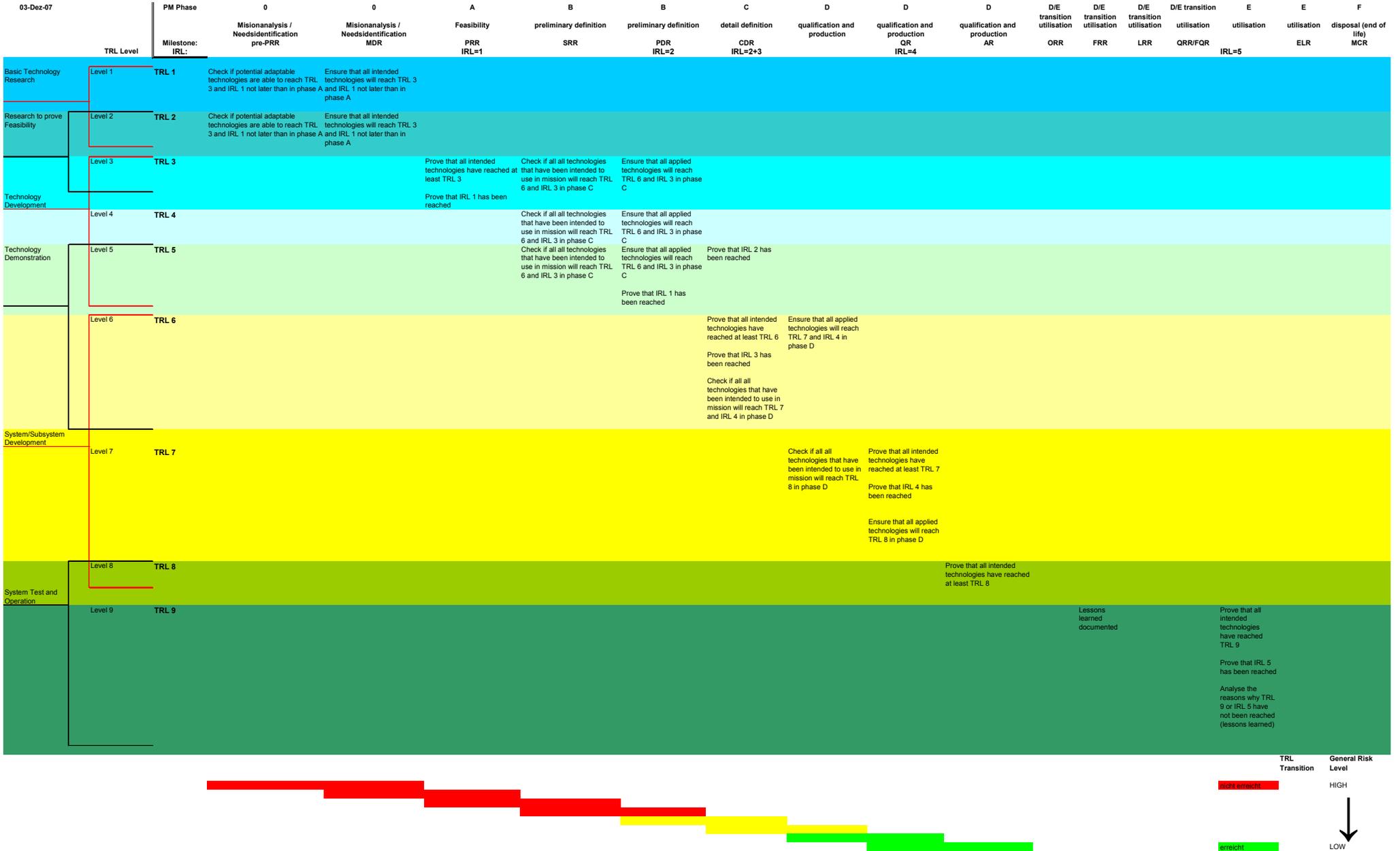
Am Ende einer Projektphase / eines Reviews muss sichergestellt werden, dass der nächste TRL / IRL, der zum Eintritt in die nächste Projektphase bzw. zum Review zwingend erforderlich ist, erreicht wird. Das TRL-Bewertungsverfahren (siehe Kapitel 6.3) ermöglicht bei einem für das Projekt erforderlichen, aber nicht erreichten TRL / IRL die Einleitung entsprechender Gegenmaßnahmen, wie z. B. die Auswahl von alternativen Technologien oder die Neuformulierung der Projektanforderungen durch das Projektmanagement.

#### 6.2.3. TRL / IRL nachweisen

Beim Eintritt in eine neue Projektphase oder bei der Durchführung eines Reviews sind die für die Projektphase oder für das Review erforderlichen TRL und IRL nachzuweisen. Hierzu ist der Kriterienkatalog (siehe Kapitel 6.6) heranzuziehen.

Zur erfolgreichen Durchführung eines Projekts ist mindestens der TRL 3 im Rahmen der Projektphase A (Machbarkeitsstudie) nachzuweisen. TRL 1 und TRL 2 bilden die Praxisanwendung lediglich in der Theorie ab und sind für ein Projekt nicht ausreichend.

Zusätzlich ist eine Risikotreppe unterhalb der Matrix in Bild 34 abgebildet. Diese zeigt bei einem fortschreitenden Projektablauf ein sinkendes allgemeines Risiko. Das Risiko beschreibt das erfolgreiche Erlangen der geforderten TRL / IRL.



### 6.3. TRL-Bewertungsverfahren (TRL Evaluation Process)

In Bild 35 und Bild 36 wird das TRL-Bewertungsverfahren mit Hilfe eines Flussablaufdiagramms veranschaulicht und beschrieben. Im Flussablaufdiagramm werden jedem aufgeführten Element erforderliche Eingangsdaten (Input), eine Aufgabenbeschreibung des Elementes und ein Arbeitsergebnis (Output) zugeordnet.

Ausgehend von den allgemeinen Projektanforderungen (Zeile 1) bzw. den übergeordneten Programmanforderungen eines Projektes werden die Projektspezifikationen (Zeile 2) definiert. Diese Projektspezifikationen entsprechen detaillierten Projektanforderungen hinsichtlich technischer Anforderungen und Risikoklassifizierung im Zeit- und Kostenrahmen.

In einer verfügbaren Technologie-Wissensbasis (Zeile 3) sind Informationen zu verschiedenen projektrelevanten Technologien unterschiedlicher Entwicklungsstadien hinterlegt. Die Technologie-Wissensbasis dient dazu, einen geeigneten Technologie-Kandidaten zur weiteren Beurteilung auszuwählen (Zeile 4). Die primäre Eignung eines Technologie-Kandidaten ist durch die Erfüllung der technischen Anforderungen gekennzeichnet.

Wird ein geeigneter und verfügbarer Technologiekandidat ermittelt, kann die grundlegende TRL-Bewertung (TRL Identification Method, Zeile 5) anhand eines Kriterienkataloges (Zeile 6) erfolgen. (siehe Kap. 6.4).

Der Kriterienkatalog (Zeile 6) beinhaltet eine Checkliste mit verschiedenen „Muss“- und „Kann“-Kriterien. Die Konformität mit den „Muss“-Kriterien ist für die Einstufung des Technologie-Kandidaten erforderlich. Ist demnach die Einstufung für die aktuelle Projektphase ausreichend (Zeile 7/8, Case YES), werden die bei der Bewertung gewonnenen Erfahrungen in einer „Lessons learnt“-Datenbank (Zeile 9) festgehalten. Diese „Lessons learnt“-Datenbank hat die Aufgabe den angewendeten Kriterienkatalog fortwährend zu vervollständigen und die Technologie-Wissensbasis zu aktualisieren.

Der TRL-Einstufung schließt sich die Bestimmung des Integration Readiness Levels (IRL) an (Zeile 10). Die Bewertungsergebnisse der TRL-Einstufung ermöglichen in dieser aktuellen Projektphase Aussagen in Bezug auf das Verwendungspotential des Technologie-Kandidaten (siehe Kap. 6.2).

Wenn das Ergebnis der TRL-Einstufung den Anforderungen der aktuellen Projektphase nicht entspricht (Zeile 7, Case NO), so sind erforderliche Maßnahmen zur Anhebung des TRL innerhalb des Projektzeit- und -kostenrahmens zu ermitteln (Zeile 11). Für jede einzelne Maßnahme bzw. für jedes Maßnahmenpaket ist sowohl die Umsetzbarkeit als auch das Kosten- und das Umsetzbarkeitsrisiko zu ermitteln (Zeile 12). Falls der erforderliche Zeitbedarf, die entstehenden Kosten und das dargelegte Risiko innerhalb der Projektvorgaben liegen (Zeile 13, Case YES), so kann die entsprechende Maßnahme bzw. das entsprechende Maßnahmenpaket durchgeführt werden (Zeile 17).

Die gewonnenen Erfahrungen bei der Beurteilung des Technologie-Kandidaten werden in einer „Lessons learnt“-Datenbank (Zeile 18) dokumentiert. Nach der Durchführung der ausgewählten Maßnahme wird der aktuelle TRL des Technologie-Kandidaten durch eine erneute TRL-Bewertung (Zeile 5) ermittelt.

Sind der erforderliche Zeitbedarf, die entstehenden Kosten oder das abgeschätzte Risiko außerhalb der Projektvorgaben (Zeile 13, Case NO), so muss ein alternativer Technologie-Kandidat ausgewählt werden (Zeile 14). Sofern geeignete Technologie-Kandidaten verfügbar sind (Zeile 14, Case YES), wird eine erneute TRL-Bewertung vorgenommen (Zeile 5).

Falls zu diesem Zeitpunkt kein geeigneter Technologie-Kandidat zur Verfügung steht (Zeile 14, Case NO), ist seitens des Projektmanagements eine grundlegende Entscheidung zur Projektfortsetzung zu treffen (Zeile 16). In einem solchen Fall könnte die Maßnahme z. B. eine Anpassung der Projektressourcen oder Neuformulierung der Projektanforderungen sein. In gleicher Weise wird verfahren, wenn die Durchführung der Maßnahmen zur TRL-Anhebung nicht im gewünschten Maße zum Erfolg führt (Zeile 15, Case NO).

#	TRL Evaluation Process	Input	Description of task	Output
1		Laws, directives, bidden standards or guidelines, etc.	Define and list all clear Programme-/Project-Requirements that have to be met on project level.	Development of a document that outline all relevant requirements.
2		Defined and documented Programme- and Project-Requirements.	Define the Project Specifications on component level.	Component's Project Specifications are defined.
3		New technology description. Positive and negative experiences and of already carried out TRL-processes. Innovative new developments.	Development and maintenance of the Technology Knowledge Base. E.g. adopting the lessons learnt technique.	Technology Knowledge Base's maturity-increase.
4		Defined Requirements regarding project activities, and defined Specifications regarding the demanded product (component).	Select a Technology Candidate (that meets the project requirements and specifications from the applied Technology Knowledge Base.	Appropriate Technology Candidate.
5		Selected Technology Candidate (component).	Start "TRL Identification Method" in compliance with accordant flow chart and by the use of the Checklist (see Criteria Catalogue).	Component's TRL identified.
6		1. Evaluation Criteria (Criteria Catalogue). 2. Positive and negative experiences and cognitions of already carried out TRL-processes.	Maintain and update Criteria Catalogue in consideration of best practice and Lessons learnt respectively.	Criteria Catalogue is effectively updated.
7		TRL-level (TRL-result of "TRL Identification Method").	Check if TRL is sufficient regarding the project requirements and the current project phase.	Result: TRL sufficient or insufficient.
8		Identified (sufficient) TRL.	Best practices and experiences are gained from TRL Identification Method. Lessons learnt.	Lessons learnt technique is adopted.
9		Experience of TRL evaluation.	Perform Lessons learnt and accordingly update Criteria Catalogue and Technology Knowledge Base.	Lessons learnt.
10		Identified (sufficient) TRL.	Identify Integration Readiness Level (IRL) on project level. Take account of IRL criteria and start "IRL Identification Process".	IRL regarding the ascertained TRL of component.

#	TRL Evaluation Process	Input	Description of task	Output
11		TRL is identified as insufficient.	Measures for TRL-increase has to be defined. Former upgrade measures (from Lessons learnt) are possibly available und can be applied.	Identified measures for TRL-increase.
12		Measures for TRL-increase.	Estimate feasibility, cost and risk regarding to the identified upgrade measures.	Explicit feasibility, cost and risk estimation for each measure.
13		Estimation (feasibility, cost, risk) for each measure.	Verify if estimation results within project scope (time, costs, resources, risks).	Conclusion if TRL-increase is feasible or not.
14		TRL-increase is not feasible within project scope.	First identify and then select alternative Technology if available.	Case <b>YES</b> : Identification and selection of an alternative Technology succeeded. Return to process step #5 and accomplish repeatedly TRL Identification Method for alternative Technology.  Case <b>NO</b> : Identification and/or selection fails. By reason of that, the
15		Feasible results of estimation (feasibility, cost, risk). Completed searching of capable measures.	First identify and then select appropriate measures for increasing the TRL of Technology (component). Check if identification and selection of appropriate measures succeeded.	Case <b>YES</b> : Capable measures are identified and selected. Case <b>NO</b> : Identification and selection of capable measures fails. By reason of unavailability and default, the basic management strategy/application could be realigned (see #16).
16		No alternative Technology available within project scope.	Management decisions requested because no alternative Technology available within project scope.	Management decision requested: e.g. - change of project scope (time, cost, resources, risk) - change of programme / project specification
17		Identified capable measures.	Perform measures (inclusive Critical Item Process Control), and return to process step #6. Lessons learnt (see #18).	Measures are accomplished. TRL of Technology (component) is increased.
18		Lessons learnt from performing measures for TRL-increase.	Perform Lessons learnt and accordingly update Criteria Catalogue. Update of Lessons learnt databank.	Updates of Lessons learnt database.

## 6.4. TRL-Bewertungsmethode (TRL Identification Method)

Bild 37 und Bild 38 veranschaulichen die TRL-Bewertungsmethode durch ein Flussablaufdiagramm. In diesem werden jedem aufgeführten Element erforderliche Eingangsdaten (Input), eine Aufgabenbeschreibung des Elementes und ein Arbeitsergebnis (Output) zugeordnet.

Die eigentliche TRL-Bewertung erfolgt unter Zuhilfenahme des Kriterienkataloges, der als Checkliste verschiedene „Muss“- und „Kann“-Kriterien zur TRL-Einstufung umfasst. Im Projektablauf wird diese TRL-Bewertung auf Komponentenebene ggf. mehrfach durchgeführt.

Erfolgte bereits zuvor ein Einsatz der betrachteten Komponente/Technologie oder basiert diese auf vorhergehenden Entwicklungen (Zeile 2, Case YES), ist eine TRL-Einstufung oberhalb von TRL 3 angebracht. Andernfalls bewegt sich der TRL einer Komponente im Bereich von 1-3 (Zeile 2, Case NO).

Nachfolgende Beschreibung veranschaulicht die Einstufungskriterien exemplarisch. Die genauen TRL-Einstufungskriterien sind im Kriterienkatalog im Kapitel 6.6 eingehend erläutert.

### TRL-Einstufung 1-3

Existieren zur betrachteten Komponente analytische und experimentelle Studien, welche die analytische Vorhersagen bestätigen, so ist der TRL 3 erreicht.

Liegen keine experimentellen Studien vor und sind nur das technische Konzept und dessen Anwendungen beschrieben, so liegt ein TRL 2 vor.

Beziehen sich die technischen und wissenschaftlichen Kenntnisse auf die grundlegenden technischen und physikalischen Konzepte ohne weiterführenden, konkreten praktischen Bezug, so liegt die niedrigste TRL-Einstufung, TRL 1, vor.

### TRL-Einstufung 4-9

Nach dem erfolgreichen Einsatz einer Technologie/Komponente im Rahmen einer Mission erfolgt die Einstufung in TRL 9.

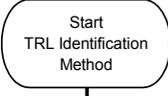
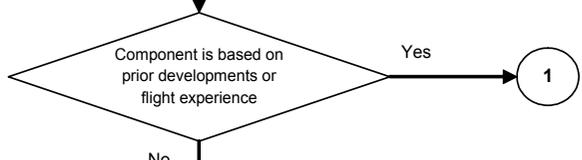
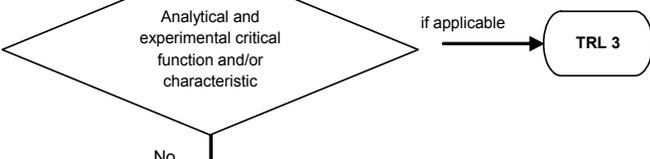
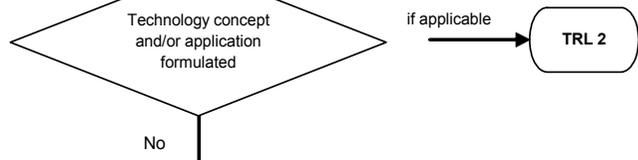
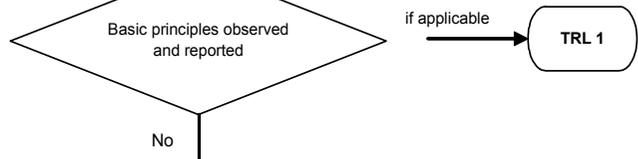
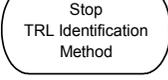
Ist die Komponente in der abschließenden Konfiguration flugbereit und erfüllt die relevanten Anforderungen, so erlangt sie TRL 8.

Der TRL 7 ist erreicht, wenn der Prototyp mit allen wesentlichen technischen Eigenschaften in der künftigen Betriebsumgebung, z. B. auf einem Technolgie Demonstrator, erfolgreich geflogen wurde.

Für die Zuordnung des TRL 6 ist es hinreichend, wenn der Prototyp in einer simulierten Umgebung erfolgreich getestet wurde.

TRL 5 ist erreicht, wenn die Komponente als Versuchsaufbau realisiert wurde und der Versuchsaufbau den Nachweis für die geforderten Leistungswerte in einer simulierten Betriebsumgebung liefert.

Falls ein solcher Versuchsaufbau die fundamentalen Funktionen umsetzt, damit Aussagen über die angestrebten Leistungswerte getroffen werden können, so erfolgt eine Einstufung in TRL 4.

#	TRL Identification Method	Input	Description of task	Output
1		Selected Technology Candidate (component)	Start "TRL Identification Method" in compliance with this flow chart, and by the use of the Checklist regarding TRL-criteria (see Criteria Catalogue). NOTE: This TRL Identification Method is only used for classification Hardware (H/W) components and not adaptable for Software (S/W); therefore S/W developments can not be evaluated by dint of this method.	
2		Technology (i.e. component)	Clarify if the component is based on prior developments or flight experience.	<p><b>Case YES:</b> Classify technology according to TRL 9, 8, 7, 6, 5, 4 . (Follow skip-spot No. 1)</p> <p><b>Case NO:</b> Component is based on research studies, no previous flight experience performed by technology. (Go to step #3ff)</p>
3		Key parameters. TRL Criteria Catalogue with regard to "TRL 3".	Active research and development is initiated. (This includes analytical studies and laboratory studies to physically validate analytical predictions of separate elements of the technology). Analytical studies place the technology in an appropriate context and laboratory demonstrations, modeling and simulation validate analytical prediction. Examples include components that are not yet integrated or representative. Studies and experiments include "proof of concept" validation of the formulated applications and concepts.	Documented analytical/experimental results validating predictions of key parameters. If criteria are met the technology is classified <b>TRL 3</b> . Otherwise go to step #4.
4		Description of application/concept. TRL Criteria Catalogue with regard to "TRL 2".	Invention begins, practical application is identified but is speculative, no experimental proof or detailed analysis is available to support the conjecture. Once basic principles are observed, practical applications can be invented. The application is speculative and there is no proof or detailed analysis to support the assumption. Examples are still limited to analytic paper studies. This might include definition of potential applications of new materials.	Documented description of the application/concept that addresses feasibility and benefit. If criteria are met the technology is classified <b>TRL 2</b> . Otherwise go to step #5.
5		Relevant publications. TRL Criteria Catalogue with regard to "TRL 1".	Scientific knowledge generated underpinning hardware technology concepts/applications. (This might include paper studies of a technology's basic properties or studies of a material's basic properties). Scientific research begins to be translated into technology's basic properties . NOTE: TRL 1 corresponds the lowest level of technology readiness.	Publication of research underlying the proposed concept/application. If criteria are met the technology is classified <b>TRL 1</b> . Otherwise go to step #6.
6		Technology without TRL classification.	Technology is not classifiable regarding TRL.	No TRL is reached.

#	TRL Identification Method	Input	Description of task	Output
7		Mission reports, review documentation, requirement analysis, specifications. TRL Criteria Catalogue with regard to "TRL 9".	The final product is successfully operated in an actual mission. Actual application of the technology in its final form and under mission conditions, such as those encountered in operational test and evaluation. Examples include using the system under operational mission conditions.	Documented mission operational results. If criteria are met the technology is classified <b>TRL 9</b> . Otherwise go to step #8.
8		Test reports, review documentation, requirement analysis, specifications. TRL Criteria Catalogue with regard to "TRL 8".	The final product in its final configuration is successfully demonstrated through test and analysis for its intended operational environment and platform (ground, airborne or space). Technology has been proven to work in its final form and under expected conditions. In almost all cases, this level represents the end of true system development. Examples include developmental test and evaluation of the system in its intended system to determine if it meets design specifications.	Documented test performance verifying analytical predictions. If criteria are met the technology is classified <b>TRL 8</b> . Otherwise go to step #9.
9		Test reports, review documentation, requirement analysis, specifications. TRL Criteria Catalogue with regard to "TRL 7".	Prototype near or at planned operational system. Represents a major step up from TRL 6, requiring demonstration of an actual system prototype in an operational environment, such as an aircraft, vehicle or space. A high-fidelity engineering unit that adequately addresses all critical scaling issues is built and operated in a relevant environment to demonstrate performance in the actual operational environment (ground, airborne or space). Examples include testing the prototype in a test bed. TRL 7 must be performed in cases where the technology or sub-system is mission critical or at high risk.	Documented test performance demonstrating agreement with analytical predictions. If criteria are met the technology is classified <b>TRL 7</b> . Otherwise go to step #10.
10		Test reports, review documentation, requirement analysis, specifications. TRL Criteria Catalogue with regard to "TRL 6".	Representative model or prototype system, which is well beyond the breadboard tested for TRL 5, is tested in a relevant environment. A high-fidelity system/component prototype that adequately addresses all critical scaling issues is built and operated in a relevant environment to demonstrate technical and operational capabilities under the critical environmental conditions required for the final system. Represents a major step up in a technology's demonstrated readiness. Examples include testing a prototype in a high-fidelity laboratory environment or in simulated operational environment. At this level, if the only "relevant environment" is the operational environment (e.g. space), then the model or prototype has to be demonstrated in operational environment.	Documented test performance demonstrating agreement with analytical predictions. If criteria are met the technology is classified <b>TRL 6</b> . Otherwise go to step #11.
11		Test reports, review documentation, requirement analysis, specifications. TRL Criteria Catalogue with regard to "TRL 5".	Fidelity of breadboard technology increases significantly. The basic technological components are integrated with reasonably realistic supporting elements so that the technology can be tested in simulated environment. A mid-level fidelity system/component breadboard is built and operated to demonstrate overall performance in a simulated operational environment, with a realistic level of integration of components. Performance predictions are made for subsequent development phases. Examples include high-fidelity laboratory integration of components.	Documented test performance demonstrating agreement with analytical predictions. Documented definition of scaling requirements. If criteria are met the technology is classified <b>TRL 5</b> . Otherwise go to step #12.
12		Test reports, review documentation, requirement analysis, specifications. TRL Criteria Catalogue with regard to "TRL 4".	A low-fidelity system/component breadboard is built and operated to demonstrate basic functionality and critical test environments and associated performance predictions are defined relative to the final operating environment. Basic technological components are integrated to establish that the pieces will work together to achieve concept-enabling levels of performance for any component or breadboard. This is relatively low-fidelity compared to potential system application. Examples include integration of ad hoc hardware components in a laboratory.	Documented test performance demonstrating agreement with analytical predictions. Documented definition of relevant environment. If criteria are met the technology is classified <b>TRL 4</b> . Otherwise go to step #13.
13		Technology without TRL classification.	Technology is not classifiable regarding TRL.	No TRL is reached.

## 6.5. IRL-Bewertungsmethode (IRL Identification Method)

Die IRL-Bewertungsmethode ist in Bild 39 durch ein Flussablaufdiagramm veranschaulicht und beschrieben. Im Flussablaufdiagramm werden jedem aufgeführten Element erforderliche Eingangsdaten (Input), eine Aufgabenbeschreibung des Elementes und ein Arbeitsergebnis (Output) zugeordnet.

Nach der Einstufung einer Komponente/Technologie bzgl. der Technologieentwicklungsreife (TRL, siehe Kapitel 6.4), vervollständigt eine nachfolgende IRL-Bewertung (IRL Identification Method) auf Projektebene das gesamte TRL-Bewertungsverfahren (TRL Evaluation Process). Die IRL-Kriterien, welche im Kriterienkatalog enthalten sind, müssen an diesem Punkt geprüft werden (Zeile 1), um den IRL der Technologie bzw. Komponente zu bewerten.

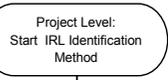
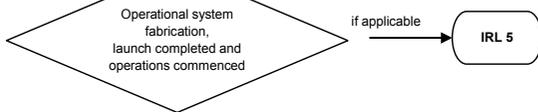
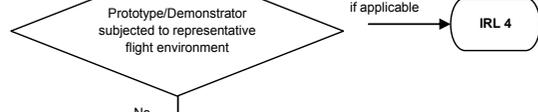
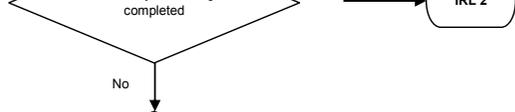
Für eine Komponente wird IRL 5 erreicht, wenn es sich bei der Technologie um ein technisches System handelt, welches in Betrieb genommen wurde (Zeile 2).

Trifft dieser Umstand nicht zu, ist eine Prüfung erforderlich, inwieweit der Technologie-Prototyp bereits einer entsprechenden Flugumgebung betrieben wurde. Ist dies der Fall, erfolgt eine Zuordnung zum IRL 4 (Zeile 3). Andernfalls wird der IRL-Einstufungsprozess unter Beachtung der aufgeführten Kriterien (siehe Kriterienkatalog, Kapitel 6.6) fortgesetzt.

IRL 3 liegt vor, wenn ein Prototyp bzw. ein technisches Systemmodell der Komponente einer Bodentestumgebung ausgesetzt wurde (Zeile 4). Die IRL-Bewertung wird fortgesetzt, sollten die vorgegebenen Kriterien/Bedingungen nicht erfüllt sein.

Bei IRL 2 liegt zu der Komponente ein detaillierter Systementwurf vor (Zeile 5). Treffen die IRL 2-Kriterien nicht zu, wird die IRL-Bewertung fortgesetzt.

IRL 1 ist bei Abschluss der Systemkonzept-Analysen erreicht (Zeile 6). Werden keine der aufgeführten IRL-Kriterien erfüllt ist die Technologie/Komponente im Sinne der Beurteilung der Integrationsreife nicht klassifizierbar.

#	IRL Identification Method	Input	Description of task	Output
1		Technology that reach appropriate TRL according to TRL Identification Method. IRL Criteria Catalogue.	Check IRL criteria (according to specified Criteria Catalogue) to identify IRL regarding the predetermined TRL of Technology (component).	Component's TRL is defined.
2		IRL Criteria Catalogue with regard to level "IRL 5".	Prove if Technology is an operational system fabrication, launch completed and operations commenced. Additionally check IRL 5-criteria of Catalogue.	If criteria are met the Technology is classified <b>IRL 5</b> . Otherwise go to step #3.
3		IRL Criteria Catalogue with regard to level "IRL 4".	Prove if Technology is available as Prototype/Demonstrator subjected to representative flight environment. Additionally check IRL 4-criteria of Catalogue.	If criteria are met the Technology is classified <b>IRL 4</b> . Otherwise go to step #4.
4		IRL Criteria Catalogue with regard to level "IRL 3".	Prove if Technology is available as a system physical mockup or prototype, subjected to ground test environment. Additionally check IRL 3-criteria of Catalogue.	If criteria are met the Technology is classified <b>IRL 3</b> . Otherwise go to step #5.
5		IRL Criteria Catalogue with regard to level "IRL 2".	Prove if detailed system design of Technology is completed. Additionally check IRL 2-criteria of Catalogue.	If criteria are met the Technology is classified <b>IRL 2</b> . Otherwise go to step #6.
6		IRL Criteria Catalogue with regard to level "IRL 1".	Prove if concept systems analyses are completed. Additionally check IRL 1-criteria of Catalogue.	If criteria are met the Technology is classified <b>IRL 1</b> . Otherwise go to step #7 and stop IRL Identification.
7		Technology without IRL classification.	Technology is not classifiable regarding IRL.	No IRL is reached.

## 6.6. Kriterienkatalog

Der folgende Kriterienkatalog legt die Kriterien für die TRL- (Bild 40-44) und IRL-Einstufung (Bild 45-46) fest.

Unter dem Punkt „Criteria to be met“ („Muss“-Kriterien) sind alle Kriterien aufgeführt, die erfüllt sein müssen, um den entsprechenden TRL zu erreichen.

Der Punkt „Criteria may be met“ („Kann“-Kriterien“) hingegen umfasst die Kriterien, die für die TRL-Einstufung zusätzlich dienlich bzw. hilfreich, alleinstehend aber nicht hinreichend bzgl. einer TRL-Einstufung sind.

Für jedes aufgeführte TRL-Kriterium im Kriterienkatalog sollen folgende Begründungen durch den Anwender dargelegt werden:

- Wie wurde das Kriterium erfüllt,
- Warum ist das Kriterium ggf. nicht anwendbar, bzw.
- Wenn das Kriterium nicht erfüllt werden kann:
  - Werden Maßnahmen zur Erfüllung dieses Kriteriums durchgeführt, oder
  - sind gezielte Maßnahmen geplant und
  - wann können die Anforderungen, die durch das Kriterium festgelegt sind, erfüllt werden.

Die Verfahrensweise zur Anwendung des Kriterienkataloges und TRL-/IRL-Einstufung einer Technologie ist in den Kapiteln 6.3, 6.4 und 6.5 näher beschrieben.

Analog zur Struktur des TRL-Kriterienkatalogs wurde der IRL-Kriterienkatalog erstellt. Der IRL-Kriterienkatalog enthält ebenfalls „Muss“- und „Kann“-Kriterien zur IRL-Einstufung.

TRL Criteria Catalogue				
TRL Definition	TRL 1 - Basic principles observed and reported	Met <sup>1</sup>	Not Met <sup>2</sup>	not applicable <sup>3</sup>
Criteria to be met	1. Scientific research begins to be translated into technology's basic properties (Have some concept in mind for further technology development)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	2. Physical laws and assumptions used in new technologies defined	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	3. Basic scientific principles observed	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Criteria may be met	1. Paper studies (published research) confirm basic principles	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	2. Organisation identified which may perform research and where it could be done	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
TRL Definition	TRL 2 - Technology concept and/or application formulated	Met <sup>1</sup>	Not Met <sup>2</sup>	not applicable <sup>3</sup>
Criteria to be met	1. Basic elements (Components) of technology have been identified	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	2. Application examples identified. However experimental proof or detailed analysis are not yet available to support the conjecture.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Criteria may be met	1. Publications or other references that outline the application being considered and that provide general analysis to support the concept and address the feasibility and benefit	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	2. Capabilities and limitations of organisation which will perform research identified	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1. Provide relevant information for each marked criterion 2. Provide status for each marked criterion and if action is taken, when the criterion will be met 3. Provide justification why criterion is not applicable				

TRL Definition	TRL 3 - Analytical and experimental critical function and/or characteristic	Met <sup>1</sup>	Not Met <sup>2</sup>	not applicable <sup>3</sup>
<b>Criteria to be met</b>	1. Basic elements (components) of technology have been characterized	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	2. Detailed analysis or proof of feasibility of concept or practical application is available	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	3. Documented analytical or experimental results, modelling and simulation validate predictions of key parameters (technology capability)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	4. Identification of Key parameters: Preliminary system performance characteristics and measures have been identified and estimated (e.g. paper study indicated that subsystems and components ought to work together)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	5. Results of laboratory tests performed to measure parameters of interest of subsystems or components and comparison to analytical predictions for critical subsystems.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>Criteria may be met</b>	1. Customer supports transition and application of technology	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

TRL Definition	TRL 4 - Component or breadboard validation in laboratory environment	Met <sup>1</sup>	Not Met <sup>2</sup>	not applicable <sup>3</sup>
<b>Criteria to be met</b>	1. Overall system requirements are known, requirements for each function are established	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	2. Relevant (operational) environment defined	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	3. Draft conceptual hardware and software designs available	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	4. Low-fidelity system / component breadboard available	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	5. System concepts that have been considered and results from testing laboratory-scale breadboard(s).	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	6. Test performance demonstrates agreement with analytical predictions	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	7. Individual functions or modules demonstrated in a laboratory environment	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>Criteria may be met</b>	1. Provide an estimate of how breadboard hardware and test results differ from the expected system goals.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	2. INPUT: Draft function tree available	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	3. Safety, maintainability, reliability, and supportability issues mainly identified	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

1. Provide relevant information for each marked criterion
2. Provide status for each marked criterion and if action is taken, when the criterion will be met
3. Provide justification why criterion is not applicable

TRL Definition	TRL 5 - Component and/or breadboard validation in a relevant operational environment	Met <sup>1</sup>	Not Met <sup>2</sup>	not applicable <sup>3</sup>
Criteria to be met	1. System interface (to relevant operational environment) requirements identified	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	2. Mid-fidelity system / component breadboard available	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	3. Demonstration of overall performance and agreement with analytical predictions in simulated operational environment	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	4. TRL-4 results from testing a laboratory breadboard system are integrated with other supporting elements in a simulated operational environment	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	5. Documented definition of scaling requirements	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Criteria may be met	1. Draft System Engineering Plan (Component Level: Integration, test, evaluation, mechanical and electrical interfaces, performance)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	2. Safety, maintainability, reliability, and supportability data mainly verified	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	3. Component level FMEA/FMECA performed	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

TRL Definition	TRL 6 - System / subsystem model or prototype demonstration in an relevant operational environment (Ground or Space)	Met <sup>1</sup>	Not Met <sup>2</sup>	not applicable <sup>3</sup>
Criteria to be met	1. Technology system specification completed	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	2. High-fidelity system / component breadboard available	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	3. A high-fidelity system / component prototype (e.g. scalable model) that adequately addresses all critical scaling issues is built and operated in a relevant operational environment (ground, airborne or space) to demonstrate operations under critical enviro	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	4. Laboratory demonstration that prototype system meets desired configuration (analytical predictions) in terms of performance, weight and volume and are documented	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Criteria may be met	1. Operating conditions are known and documented	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	2. System Engineering Plan (Component Level) finalized	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	3. Safety, maintainability, reliability, and supportability data mainly validated	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

1. Provide relevant information for each marked criterion
2. Provide status for each marked criterion and if action is taken, when the criterion will be met
3. Provide justification why criterion is not applicable

TRL Definition	TRL 7 - System prototype demonstration in an space environment	Met <sup>1</sup>	Not Met <sup>2</sup>	not applicable <sup>3</sup>
<b>Criteria to be met</b>	1. A high-fidelity engineering unit (full scale prototype) that adequately addresses all critical scaling issues is built and operated in a relevant operational environment to demonstrate performance in the actual operational environment (ground, airborne or	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	2. Each system/software interface tested individually under stressed and relevant operational conditions	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	3. Documented test performance demonstrating agreement with analytical predictions	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	4. Components are representative of final components	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>Criteria may be met</b>	1. Safety, maintainability, reliability, and supportability data mainly validated for full-scale prototype	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
TRL Definition	TRL 8 - Actual system completed and "fight qualified" through test and demonstration	Met <sup>1</sup>	Not Met <sup>2</sup>	not applicable <sup>3</sup>
<b>Criteria to be met</b>	1. Final configuration (e.g. internal and external interfaces, cross-component issues, TT&C, SW-interfaces...) successfully demonstrated: components are form, fit, and function compatible with operational system	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	2. Technology has been proven to work in its final form according to operational requirements. This includes that safety, maintainability, reliability, and supportability data are validated for Flight Model; safety issues have been mitigated...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	3. The final product in its final configuration is successfully demonstrated through test and analysis for its intended operational environment and platform (ground, airborne or space).	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	4. Development tests and evaluation successfully completed for the intended operational environment	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	5. Documented test performance: analytical predictions verified	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	6. Requirements of Acceptance Review (AR) implemented	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>Criteria may be met</b>	1.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1. Provide relevant information for each marked criterion 2. Provide status for each marked criterion and if action is taken, when the criterion will be met 3. Provide justification why criterion is not applicable				

TRL Definition	TRL 9 - Actual System "flight proven" through successful mission	Met <sup>1</sup>	Not Met <sup>2</sup>	not applicable <sup>3</sup>
<b>Criteria to be met</b>	1. Technology successfully operated in operational environment (ground, airborne, space)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>Criteria may be met</b>	1. Documented mission operational results.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1. Provide relevant information for each marked criterion 2. Provide status for each marked criterion and if action is taken, when the criterion will be met 3. Provide justification why criterion is not applicable				

IRL Criteria Catalogue							
<b>IRL Definition</b>	<b>IRL 1 - Concept systems analyses completed</b>				<b>Met<sup>1</sup></b>	<b>Not Met<sup>2</sup></b>	<b>not applicable<sup>3</sup></b>
<b>Criteria to be met</b>	1.	Formal risk management program initiated			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	2.	Go-No Go: Rough evaluation of potential market and customers			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	3.	Rough estimation of risk areas (on-cost, on-time, performance)			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	4.	System concepts have been identified and paper studies indicate that interfaces to the target system are identified (function description)			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
					<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>Criteria may be met</b>	1.				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
					<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>IRL Definition</b>	<b>IRL 2 - Detailed system design completed</b>				<b>Met<sup>1</sup></b>	<b>Not Met<sup>2</sup></b>	<b>not applicable<sup>3</sup></b>
<b>Criteria to be met</b>	1.	Analysis of internal interface requirements completed			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	2.	Function tree available			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	3.	Risk management plan available			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	4.	Basic technology components are integrated to establish that pieces will work together			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
					<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>Criteria may be met</b>	1.	FMECA analysis performed			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
					<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>IRL Definition</b>	<b>IRL 3 -System physical mockup or prototype, subjected to ground test environment</b>				<b>Met<sup>1</sup></b>	<b>Not Met<sup>2</sup></b>	<b>not applicable<sup>3</sup></b>
<b>Criteria to be met</b>	1.	Integration demonstration completed, including demonstration that sub-systems/system elements work together			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	2.	Performance characteristics validation completed			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
					<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>Criteria may be met</b>	1.				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	2.				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1. Provide relevant information for each marked criterion 2. Provide status for each marked criterion and if action is taken, when the criterion will be met 3. Provide justification why criterion is not applicable							

IRL Definition	IRL 4 - Prototype/Demonstrator subjected to representative flight environment	Met <sup>1</sup>	Not Met <sup>2</sup>	not applicable <sup>3</sup>
Criteria to be met	1. Demonstrate performance in a relevant operational environment of the final system (integrated FM), including platform (ground, airborne or space) and packaging	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	2. System prototype successfully tested in a relevant operational environment	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Criteria may be met	1.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

IRL Definition	IRL 5 - Operational system fabrication, launch completed and operations commenced	Met <sup>1</sup>	Not Met <sup>2</sup>	not applicable <sup>3</sup>
Criteria to be met	1. Operational system fabrication, launch completed and operations commenced	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Criteria may be met	1.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

1. Provide relevant information for each marked criterion
2. Provide status for each marked criterion and if action is taken, when the criterion will be met
3. Provide justification why criterion is not applicable

## 7. Ausblick

Mit dem vorliegenden Bericht wurde ein Bewertungsverfahren für die Einstufung der Entwicklungsreife einer Technologie hinsichtlich ihrer Verwendung als Komponente eines Raumfahrtsystems definiert. Während des Projektablaufes wurden Meilensteine definiert, an denen dieses Bewertungsverfahren jeweils initiiert wird. Ein Kriterienkatalog, der eine standardisierte Bewertung ermöglicht, vervollständigt den Verfahrensentwurf.

Mögliche weitere Schritte für die künftige Weiterführung und Ausarbeitung des vorliegenden Projektergebnisses sind nachfolgend aufgeführt:

- Identifikation des Geltungsbereichs (zuständiges Normungsgremium)
- Erstellung des englischsprachigen TRL-Normentwurfes, bestehend aus dem Kapitel 6 und den TRL / IRL Definitionen aus dem Kapitel 4
- Beantragung eines Normentwurfes im zuständigen Normungsgremium
- Identifizierung eines Pilotprojektes zur Anwendung des Bewertungsverfahrens mit anschließender Bewertung der Methodik hinsichtlich der Einsetzbarkeit und Grenzen des Bewertungsverfahrens
- Ausweitung der Anwendbarkeit auf Bereiche außerhalb der Raumfahrt, wie z. B. die Industriesektoren Luftfahrt und Automotive
- Informationsaustausch mit der bestehenden internationalen TRL-Arbeitsgruppe in Hinblick auf die Identifikation von Synergiepotenzialen und gemeinsamen/komplementären Aktivitäten.

Die Verwendung der TRL zur Bewertung des Reifegrades einer Technologie in Bezug auf ihre Anwendung unterliegt jedoch auch Einschränkungen:

- Die TRL-Einstufung ist nicht immanent. Die Bewertung erfolgt immer relativ zum Kenntnisstand des Bewertungsgremiums (z. B. können Vertraulichkeitsvereinbarungen die Verfügbarkeit von Informationen einschränken). Darüber hinaus ist die Bewertung abhängig vom Einsatz- bzw. Anwendungsszenario. Eine bereits im Einsatz befindliche Komponente kann unter Umständen heruntergestuft werden, sollte sie unter anderen Bedingungen verwendet werden.
- TRL enthalten keine Informationen zur Machbarkeit bzw. den möglicherweise damit verbundenen Schwierigkeiten, einen höheren Reifegrad zu erreichen.
- TRL berücksichtigen nicht die Integrationsreife oder Systemaktivitäten (andere Methoden: IRL, SRL, MRL, etc.)
- TRL lassen industrielle Herstellungsfähigkeiten (z. B. Produktions-know-how, Produktionskapazitäten) oder auch wirtschaftspolitische Einschränkungen (z. B. ITAR, EAR) unberücksichtigt
- TRL berücksichtigen den kompletten Lebenszyklus einer Technologie nicht (z. B. "obsolescence")
- TRL ersetzen Entwicklungszyklen oder Qualitätsrichtlinien nicht, Anpassungen müssen jedoch identifiziert werden.

Die TRL-Einstufung an sich definiert kein vollständiges Bild des tatsächlichen Technologiestatus oder der Risiken, um eine spezielle Technologie an den Bedarf eines gegebenen Beschaffungsprogramms anzupassen. Eine hinreichende Aussage zur objektiven Technologieentwicklungsreife bzw. zur Produktreife in der kaufmännischen Welt verlangt eine multi-dimensionale Metrik. In der Fachliteratur wurden bis zu 16 verschiedene Dimensionen zur Produkt- oder Technologie-Reife identifiziert (zum Beispiel die "System Readiness Levels" des UK MoD veröffentlicht 2006: 9 Systemdisziplinen und 7 weitere Entwicklungslinien).

Wesentliche Herausforderungen bezüglich der Technologieentwicklungsreife-Bewertung sind:

- Metriken etablieren für Systeme/Technologien bezüglich Leistung, Kosten und Termine
- Konsequente Bewertung sicherstellen für technologische Metriken, Reife & Einsatzbereitschaft, Fortschritt
- Frühzeitiges und kontinuierliches Modellieren von neuen Systemen und Technologien (zugänglich seitens der Parteien, die in den Forschungs- und Entwicklungsprozessen involviert sind)

- Ein Verfahren etablieren, wie die Unsicherheit von Technologie-Entwicklung bewertet werden kann, insbesondere die mit Alternativ-Kandidaten verbundenen Entwicklungen neuer Systeme
- Zusätzlich zu der Technologieentwicklungsreife-Bewertung auf Subsystem- / Komponenten-Ebene zur Ermittlung eines ggf. erforderlichen Technologieentwicklungsbedarfs kann das Verfahren durch eine Priorisierung der erforderlichen Technologieweiterentwicklungen für die verschiedenen Subsysteme (Projektmanagementschnittstellen, wie z. B. WBS, Roadmap, Zeitmanagement, Risikomanagement) ermittelt werden.
  - Zusammenspiel der technischen Subsysteme: "building blocks" (Funktionsblöcke, wieder verwendbare Einheiten oder Baugruppen/Servicegruppen/Subsysteme, die so gebaut verschiedene Verwendungen finden), Sub-Technologien...
  - Abbildung des Entwicklungspfades der einzelnen "building blocks"
  - Konsistente Darstellung der einzelnen "building blocks"
  - Die eigentliche Systemauslegung erfolgt durch Zusammenstellen der Funktionsblöcke (Tailoring/Konfektionieren).
    - Beispiel Raumfahrt: die Empfangskette einer Satellitennutzlast kann, einmal getestet und qualifiziert, in vielen verschiedenen Satelliten wieder verwendet werden. Der Satellit wird in seiner Einzigartigkeit dann dadurch bestimmt, welche anderen Blocks er dazu erhält (Sendekette, AOCS, Bus usw.)
    - Beispiel Kantine: alle Vorspeisen, Hauptspeisen Nachspeisen usw. sind vorgefertigte "building Blocks" - das Menü bestimmt sich aus der Kombination.

#### Erweiterungen des vorgestellten Verfahrens:

Betrachtet man ein System als Zusammensetzung mehrerer Komponenten, kann man aus einer angestrebten Systemeigenschaft den notwendigen IRL/SRL oder TRL einer notwendigen Komponente für ein bestimmtes Zeitfenster, einem „TRL-Gate“, bestimmen.

Gegenwärtig wird im industriellen Bereich eher eine Technologie-Push-Strategie verfolgt, d. h., sobald eine Technologie hinsichtlich ihres Einsatzbereiches hinreichend ausgereift ist, wird versucht, sie auf den Markt zu bringen.

Eine alternative Strategie, die eine höhere Kosteneffizienz der Maßnahmen verspricht, wäre wie folgt zu definieren:

- 1) Szenario erstellen (z. B. Marsmission, Micro-Gravitation Forschung ( $\mu$ -g-Flyer-Technologie) o. ä.)
- 2) Aufteilung des Szenarios in TRL-Elemente und Ableitung von TRL-Gates, (z. B. Rechendichte eines Rechner > 200 MIPS, TRL 6 für ein elektromagnetisches Heatshield bis zum Jahr 2010)
- 3) Ausrichtung des erforderlichen Forschungsaufwands an diesen Zielsetzungen (Erreichen der TRL-Gates).

In dieser Form wird Technologie-Bedarf ("Technologie-Pull") erzeugt und definiert. Der Normung und Standardisierung kommt bei Anwendung dieser Strategie eine Schlüsselrolle zu. Ein Paradebeispiel ist der GSM Standard einschließlich des "QoS" (Quality of Service), welcher bereits definiert wurde bevor das erste Gerät fertig gestellt war. Danach haben Hersteller im Wettbewerb die Entwicklung vorangetrieben, so dass heute Europa Weltmarktführer im GSM/UMTS Bereich ist.

Am Beispiel von Anwendungsbereichen mit Raumfahrtbezug (Satellite Servicing, Orbit Maneuvering) läge es am Kunden zu definieren, ab wann er ein System/eine Komponente akzeptiert, also kauft. Dies könnten im Falle eines Counter-Satellite-Protector der Fall sein (technische Einrichtung am Satelliten um eine Zerstörung des Satelliten zu verhindern; z. B. gegen herannahende Projektile/Kollisionskörper: Ausweichsystem der den Satellit kurzfristig und kurzzeitig auf eine andere Bahn lenkt, oder Laser zur Abwehr gegen Plasmawolken oder Elektromagnetische Angriffe: Magnetfelddeflektoren oder Satelliten-Antennen-Feed Schutzsysteme), wenn beispielsweise folgende Randbedingungen erfüllt sind:

- a) Preis < 200 M€
- b) vor Jahr 2015 operabel
- c) innerhalb von 6 Monaten verfügbar usw.

Das Potential der TRL /SRL/IRL-Bewertungsmethodik im Hinblick auf wesentliche Vorteile wie

- die Steigerung der Kostenwirksamkeit angesetzter Maßnahmen,
- die Entscheidungstransparenz und
- die Ganzheitlichkeit des methodischen Ansatzes

sollte von Deutschland/Europa umgesetzt und gesteigert werden.

## 8. Literaturverzeichnis

A Structured Approach to RLV Technology Flight Testing; 2003-03-18; NASA; AstroExpo.com

Additional Knowledge Needed In Developing System for Intercepting Long-Range Missiles; GAO Missile Defense; 2003-08

Air Force Research Laboratory's Hardware and Software Transition Readiness Level Calculator, Version 2.2; 2003-01; US DoD

AMS Guidance on Technology Readiness Levels (TRLs); FBG/36/10; 2005-01-11

An Alternative to Technology Readiness Levels for Non-Developmental Item (NDI) Software; James D. Smith II; Carnegie Mellon Software Engineering Institute; 2005

Defense Acquisition Guidebook; US DoD; <https://akss.dau.mil/dapc/index.aspx>

DoDD 5000.1, "The Defense Acquisition System"; 2003-05-12; US DoD

DoDI 5000.2, "Operation of the Defense Acquisition System"; 2003-05-12; US DoD

ECSS-M-30A, "Space Project Management, Project Phasing and Planning"; 1996-04-19

EN 13290-4, "Luft- und Raumfahrt - Raumfahrt-Projektmanagement; Allgemeine Anforderungen - Teil 4: Projektphaseneinteilung und -planung (ECSS M 30)"

EN 13701, "Luft- und Raumfahrt - Raumfahrttechnik – Glossar (ECSS P-001)"

ESA Science & Technology Strategic Readiness Levels (ESA internet)

ESA Telecommunications - Call for Ideas - Internal Form (ESA internet)

European Space Technology Master Plan (ESTMP); Ed. 2007; ESA/ESTEC

ISO/DIS 16192, "Space systems - Assessment of practical knowledge - Principles and guidelines"

R&D3: Research and development degree of difficulty; 1998-03; NASA

R&T steering process using TRL; FBG/36/10; 2005-01-11; UK MoD

Rigorous, Multimode Equivalent Network Representation of Inductive Discontinuities; Marco Guglielmi and Clive Newport; 1990-11; IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol 38, No. 11; pp. 1651-1659

Technology Management Guidance for the UK MoD Defence Acquisition Community version 1.3; 2007-08; [www.aof.mod.uk](http://www.aof.mod.uk)

Technology Readiness Assessment (TRA) Deskbook; 2005-05; US DoD

Technology Readiness Assessments: A Retrospective; John C. Mankins; 58th International Astronautical Congress - 2007; Artemis Innovation Management Solutions LLC; Ashburn, Virginia USA

Technology Readiness Levels - A White Paper; John C. Mankins; 1995-04-06; Advanced Concept Office, Office of Space Access and Technology; NASA

Technology Readiness / Risk Assessments; John C. Mankins; 2006-11; [www.artemisinnovation.com](http://www.artemisinnovation.com)

Using the Technology Readiness Levels Scale to Support Technology Management in the DoD's ATD/STO Environments, A Findings and Recommendations Report conducted for Army CECOM;

Caroline P. Graettinger, Suzanne Garcia; Jeannine Sivi; Robert J. Schenk; Peter J. Van Syckle; 2002-08; Software Engineering Institute

UK MoD Acquisition Management System: TRL guide, SRL self-assessment ([www.ams.mod.uk](http://www.ams.mod.uk)); defense procurement: [www.dpa.mod.uk](http://www.dpa.mod.uk))

Wikipedia; (<http://en.wikipedia.org>: "Technology Readiness Level"; <http://de.wikipedia.org>: "Technikfolgenabschätzung")

WIND: a CAD package for microwave filters based on thick inductive windows; Marco Guglielmi, Giorgio Gheri, Alejandro Alvarez Melcon; 1993-03/04; Microwave Engineering Europe; pp. 25-30

## 9. Anhang

### 9.1. Ansprechpartner

Folgende Personen haben den vorliegenden Bericht erarbeitet:

Dr. André La Croix  
Astrium Space Transportation  
Airbus-Allee 1  
28199 Bremen  
Telefon: +49 421 539-5378  
E-mail: andre.lacroix@astrium.eads.net

Dr. Andreas Jain  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.  
Linder Höhe  
51147 Köln  
Telefon: +49 2203 601-2954 (-3618)  
E-mail: Andreas.Jain@dlr.de

Benjamin Gentz  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.  
Linder Höhe  
51147 Köln  
Telefon: +49 2203 601-2409  
E-mail: Benjamin.Gentz@dlr.de

Uwe Wirt  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.  
Koenigswinterer Str. 522-524  
53227 Bonn  
Telefon: +49 228 447-311  
E-mail: uwe.wirt@dlr.de

Achim Schaube  
DIN Deutsches Institut für Normung e. V.  
Normenausschuss Luft- und Raumfahrt (NL)  
Burggrafenstraße 6  
10787 Berlin  
Telefon: +49 30 2601-2096  
E-Mail: achim.schaube@din.de

## 9.2. Unit Descriptions (NASA)

**Flight Proven:**

Hardware that is identical to hardware that has been successfully operated in a space mission.

**Flight Qualified Unit:**

Actual flight hardware that has been through acceptance testing. Acceptance test levels are designed to demonstrate flight-worthiness, to screen for infant failures without degrading performance. The levels are typically less than anticipated levels.

**Proto-Flight Unit:**

Flight unit to be tested to 5%-10% over the expected environments to be encountered.

**Flight Qualification Unit:**

Flight Hardware that is tested to the levels that demonstrate the desired margins, typically 20-30%. Sometimes this means testing to failure. This unit is never flown.

**Proto-type Unit:**

The proto-type unit demonstrates form, fit and function. It is to every possible extent identical to flight hardware, and is built to test the manufacturing and testing processes and is intended to be tested to flight qualification levels. The only difference from the flight unit is that it is realized that elements of the proto-type unit will in all probability be changed as a result of experiences encountered in the development and testing of the Proto-type unit.

**Development Unit:**

Any of a series of units built to evaluate various aspects, form, fit, function or any combination thereof.

**Engineering Unit:**

A unit that demonstrates critical aspects of the engineering processes involved in the manufacturing of the flight unit. In some cases, the engineering unit will become the prototype or even the qual unit.

**Scale Model:**

A unit that demonstrates either function, form, fit or any combination thereof at a scale that is deemed to be representative of the final article. This can range from a wind tunnel model at a fraction of a percent of full scale to a full scale unit of a critical piece of hardware where manufacturability/testability of a unit of the required size is in question.

**Mass Model:**

A unit that demonstrates form and fit only.

**Brassboard Unit:**

A unit that lies somewhere between a breadboard unit and a proto-type unit. It typically tries to make use of as much flight hardware/software as possible.

**Breadboard Unit:**

A unit that demonstrates function only without respect to form or fit. It has no flight hardware/software.

**Proof of Concept:**

Analytical and experimental demonstration of hardware/software concepts that may or may not be incorporated into subsequent development and flight units.

## 9.3. Engineering Terms commonly used in ESA

### **Breadboard Model (BB) – TRL 3**

Any equipment or part of it which is functionally and electrically representative of flight hardware and which is used to validate a new or critical feature of the design. There are no specific requirements for configuration and interface control.

### **Elegant Breadboard (EB) – TRL 4**

The term Elegant Breadboard refers to an equipment between BB and EM. It is built using commercial grade components and a configuration close to that of the flight model. In other words, it is not a breadboard with physically separated units interconnected by cables and wires but a fully integrated unit in a configuration and with interfaces representative of the flight model. There are no specific requirements for configuration and interface control.

### **Engineering Model (EM) – TRL 5**

An EM shall be fully representative of Flight Models except that a lower standard of electrical components may be used. The standard of these components shall be the highest achievable within the schedule constraints. Any and all redundancy which will be in the flight standard model shall be provided in the EM unless otherwise agreed with the customer. If redundancy is not required in the EM by the customer, switching functions associated with redundant functions shall be demonstrated and dummy hardware may be required to ensure the EM is representative for certain tests. A clear statement of the EM as designed / as built status shall be made available by the supplier.

### **Engineering Qualification Model (EQM) – TRL 6**

An EQM shall be fully representative of Flight Models except that a lower standard of electrical components may be used. The standard of these components shall be the highest achievable within the schedule constraints but using the same manufacturer, the same type and the same package as for the Flight Models. Only the testing and the screening of the parts might be different compared to the Flight Models. Any and all redundancy which will be in the flight standard model shall be provided in the EQM unless otherwise agreed with the customer. If redundancy is not required by the customer, switching functions associated with redundant functions shall be demonstrated and dummy hardware may be required to ensure the EQM is representative for certain tests.

The EQM shall be subjected to the full equipment level qualification test sequence. EQM shall be built to full flight standard in accordance with the PA and CADM requirements except for EEE parts (see above in this paragraph). Interchange ability status shall be identified. Testing shall be in accordance with supplier issued plans approved by the customer. Test reports shall be produced and issued.

### **Qualification Model (QM)**

The QM shall be built to full flight standard in accordance with the PA and CADM requirements imposed on Flight Models. Flight standard parts shall be used. Qualification models shall be subjected to full qualification testing.

The customer shall approve the relevant test plans and reports to establish acceptance of the qualification status.

Following successful qualification testing, the QM is not considered suitable for use on the satellite.

### **Protoflight Model (PFM) – TRL 7**

The PFM shall be built to full flight standard in accordance with the PA and CADM requirements imposed on Flight Models. Flight standard parts shall be used.

Protoflight models shall be subjected to protoflight qualification testing. The customer shall approve the relevant test plans and reports to establish acceptance of protoflight qualification.

Following successful protoflight model testing, the PFM shall be used during protoflight model testing of the satellite protoflight model and shall successfully withstand these environmental tests in order to achieve full qualification.

If more than one of the same standard equipment is required for use on the satellite, only one of these needs to be a PFM; the other ones need only to be acceptance tested, unless otherwise specified by the customer.

**Flight Model (FM) – TRL 7**

The FM shall be built to full flight standard in accordance with PA and CADM requirements. Flight standard parts shall be used.

Flight models shall be subject to flight acceptance testing. The customer shall approve the relevant test plans and reports to establish that testing is performed to the required level.

**Hardware integrated in payload and tested at satellite level – TRL 8**

**Satellite launched and tested successfully in orbit – TRL 9**

**9.4. Terms commonly used by US DoD for Technology Readiness Assessment (TRA)**

Breadboard	Integrated components that provide a representation of a system/subsystem and that can be used to determine concept feasibility and to develop technical data. Typically configured for laboratory use to demonstrate the technical principles of immediate interest. May resemble final system/subsystem in function only
High Fidelity	Addresses form, fit, and function. A high-fidelity laboratory environment would involve testing with equipment that can simulate and validate all system specifications within a laboratory setting.
Low Fidelity	A representative of the component or system that has limited ability to provide anything but first-order information about the end product. Low-fidelity assessments are used to provide trend analysis.
Model	A functional form of a system, generally reduced in scale, near or at operational specification. Models will be sufficiently hardened to allow demonstration of the technical and operational capabilities required of the final system.
Operational Environment	Environment that addresses all the operational requirements and specifications required of the final system to include platform/ packaging.
Prototype	A physical or virtual model used to evaluate the technical or manufacturing feasibility or military utility of a particular technology or process, concept, end item, or system.
Relevant Environment	Testing environment that simulates the key aspects of the operational environment.
Simulated Operational Environment	Either (1) a real environment that can simulate all the operational requirements and specifications required of the final system or  (2) a simulated environment that allows for testing of a virtual prototype. Used in either case to determine whether a developmental system meets the operational requirements and specifications of the final system.

## 9.5. TRL Definitions (NASA, US DoD, NATO, UK MoD)

TRL	TRL Definition (NASA, 1995)	TRL Definition (DoD)	TRL Definition (NATO framework)	TRL Definition (UK MoD)
0	N/A		Basic Research with future Military Capability in mind	
1	Basic principles observed and reported	Basic principles observed and reported	Basic Principles Observed and Reported in context of a Military Capability Shortfall	Basic principles observed and reported
2	Technology concept and/or application formulated	Technology concept and/or application formulated	Technology Concept and / or Application Formulated	Technology concept and/or application formulated
3	Analytical and experimental critical function and/or characteristic proof-of-concept	Analytical and experimental critical functions and/or characteristic proof-of-concept	Analytical and Experimental Critical Function and / or Characteristic Proof of Concept	Analytical and experimental critical function and/or characteristic proof-of-concept
4	Component and/or breadboard validation in laboratory environment	Component and/or breadboard validation in laboratory environment	Component and / or "Breadboard" Validation in Laboratory / Field (eg ocean) Environment	Technology component and/or basic technology subsystem validation in laboratory environment
5	Component and/or breadboard validation in relevant environment	Component and/or breadboard validation in relevant environment	Component and / or "Breadboard" Validation in a Relevant (operating) Environment	Technology component and/or basic technology subsystem validation in relevant environment
6	System/subsystem model or prototype demonstration in a relevant environment (Ground or Space)	System/subsystem model or prototype demonstration in a relevant environment	System / Subsystem Model or Prototype Demonstration in a Realistic (operating) Environment or Context	Technology system / subsystem model or prototype demonstration in a relevant environment
7	System prototype demonstration in a space environment	System prototype demonstration in an operational environment	System Prototype Demonstration in an Operational Environment or Context (eg exercise)	Technology system prototype demonstration in an operational environment
8	Actual system completed and "flight qualified" through test and demonstration (Ground or Flight)	Actual system completed and qualified through test and demonstration	Actual System Completed and Qualified through Test and Demonstration	Actual technology system completed and qualified through test and demonstration
9	Actual system "flight proven" through successful mission operations	Actual system "flight proven" through successful mission operations	Actual System Operationally Proven through Successful Mission Operations	Actual technology system qualified through successful mission operations

## 9.6. TRL Descriptions (NASA, US DoD, NATO, UK MoD)

TRL	TRL Description (NASA, 1995)	TRL Description (DoD 5000.2-R App6 05_Apr-02)	TRL Description (ARMY) (S/HW/SW)	TRL Description (NATO framework)	TRL Description (UK MoD guidance 3.0)
0	N/A	N/A	N/A	Systematic study directed toward greater knowledge or understanding of the fundamental aspects of phenomena and /or observable facts with only a general notion of military applications or military products in mind. Many levels of scientific activity are included here but share the attribute that the technology readiness is not yet achieved.	
1	This is the lowest "level" of technology maturation. At this level, scientific research begins to be translated into applied research and development. Examples might include studies of basic properties of materials (e.g., tensile strength as a function of temperature for a new fiber). Cost to Achieve: Very Low 'Unique' Cost (investment cost is borne by scientific research programs) But: May be Facility dependent.	Lowest level of technology readiness. Scientific research begins to be translated into applied research and development. Examples might include paper studies of a technology's basic properties.	HW/S: Lowest Level of Technology Readiness. Scientific research begins to be translated into applied research and development. Examples might include paper studies of a technology's basic properties. SW: Lowest level of software readiness. Basic research begins to be translated into applied research and development. Examples might include a concept that can be implemented in software or analytic studies of an algorithm's basic properties.	Lowest level of technology readiness. Scientific research begins to be evaluated for military applications. Examples of R&T outputs might include paper studies of a technology's basic properties and potential for specific utility.	System: Lowest level of technology readiness. Blue skies scientific research begins to be translated into applied research and development (R&D). Examples might include paper studies of a technology's basic properties
2	Once basic physical principles are observed, then at the next level of maturation, practical applications of those characteristics can be 'invented' or identified. For example, following the observation of high critical temperature (HTc) superconductivity, potential applications of the new material for thin film devices (e.g., SIS mixers) and in instrument systems (e.g., telescope sensors) can be defined. At this level, the application is still speculative: there is not experimental proof or detailed analysis to support the conjecture. Cost to Achieve: Very Low 'Unique' Cost (investment cost is borne by scientific research programs)	Invention begins. Once basic principles are observed, practical applications can be invented. Applications are speculative and there may be no proof or detailed analysis to support the assumptions. Examples are limited to analytic studies.	HW/S/SW: Invention begins. Once basic principles are observed, practical applications can be invented. Applications are speculative and there is no proof or detailed analysis to support the assumptions. Examples are limited to analytic studies.	Invention begins. Once basic principles are observed, practical applications can be postulated. The application is speculative and there is no proof or detailed analysis to support the assumptions. Example R&T outputs are still mostly paper studies.	System: Invention begins. Once basic principles are observed, practical applications can be invented. Applications are speculative, and there may be no proof or detailed analysis to support the assumptions. Examples are limited to analytic studies
3	At this step in the maturation process, active research and development (R&D) is initiated. This must include both analytical studies to set the technology into an appropriate context and laboratory-based studies to physically validate that the analytical predictions are correct. These studies and experiments should constitute "proof-of-concept" validation of the applications/concepts formulated at TRL 2. For example, a concept for High Energy Density Matter (HEDM) propulsion might depend on slush or super-cooled hydrogen as a propellant: TRL 3 might be attained when the concept-enabling phase/temperature/pressure for the fluid was achieved in a laboratory. Cost to Achieve: Low 'Unique' Cost (technology specific)	Active research and development is initiated. This includes analytical studies and laboratory studies to physically validate analytical predictions of separate elements of the technology. Examples include components that are not yet integrated or representative.	HW/S: Active research and development is initiated. This includes analytical studies and laboratory studies to physically validate analytical predictions of separate elements of the technology. Examples include components that are not yet integrated or representative. SW: Active research and development is initiated. This includes analytical studies to produce code that validates analytical predictions of separate software elements. Examples include software components that are not yet integrated or representative but satisfy an operational need. Algorithms run on a surrogate processor in a laboratory environment.	Analytical studies and laboratory/field studies to physically validate analytical predictions of separate elements of the technology are undertaken. Example R&T outputs include software or hardware components that are not yet integrated or representative of final capability or system.	HW: Active R&D is initiated. This includes analytical studies and laboratory studies to physically validate the analytical predictions of separate elements of the technology. Examples include components that are not yet integrated or representative SW: Active R&D is initiated. The level at which scientific feasibility is demonstrated through analytical and laboratory studies. This level extends to the development of limited functionality environments to validate critical properties and analytical predictions using non integrated software components and partially representative data

TRL	TRL Description (NASA, 1995)	TRL Description (DoD 5000.2-R App6 05 Apr-02)	TRL Description (ARMY) (S/HW/SW)	TRL Description (NATO framework)	TRL Description (UK MoD guidance 3.0)
4	<p>Following successful "proof-of-concept" work, basic technological elements must be integrated to establish that the "pieces" will work together to achieve concept-enabling levels of performance for a component and/or breadboard.</p> <p>This validation must be devised to support the concept that was formulated earlier, and should also be consistent with the requirements of potential system applications.</p> <p>The validation is relatively "low-fidelity" compared to the eventual system: it could be composed of ad hoc discrete components in a laboratory. For example, a TRL 4 demonstration of a new 'fuzzy logic' approach to avionics might consist of testing the algorithms in a partially computer-based, partially bench-top component (e.g., fiber optic gyros) demonstration in a controls lab using simulated vehicle inputs.</p> <p>Cost to Achieve: Low-to-moderate 'Unique' Cost (investment will be technology specific, but probably several factors greater than investment required for TRL 3)</p>	<p>Basic technological components are integrated to establish that they will work together. This is relatively "low fidelity" compared to the eventual system. Examples include integration of "ad hoc" hardware in the laboratory.</p>	<p>HW/S: Basic technological components are integrated to establish that they will work together. This is relatively "low fidelity" compared to the eventual system. Examples include integration of "ad hoc" hardware in the laboratory.</p> <p>SW: Basic software components are integrated to establish that they will work together. They are relatively primitive with regard to efficiency and reliability compared to the eventual system. System software architecture development initiated to include interoperability, reliability, maintainability, extensibility, scalability and security issues. Software integrated with simulated current /legacy elements as appropriate.</p>	<p>Basic technology components are integrated. This is relatively "low fidelity" compared to the eventual system. Examples of R&amp;T results include integration and testing of "ad hoc" hardware in a laboratory/field setting. Often the last stage for R&amp;T (funded) activity.</p>	<p>HW: Basic technological components are integrated as sub-systems to establish that they will work together. This is relatively low fidelity compared with the eventual system. Examples include integration of ad-hoc hardware in the laboratory.</p> <p>SW: Basic software components are integrated to establish that they will work together. They are relatively primitive with regard to efficiency and robustness compared with the eventual system. Architecture development initiated to include interoperability, reliability, maintainability, extensibility, and scalability issues. Emulation with current/ legacy elements as appropriate. Prototypes developed to demonstrate different aspects of eventual system</p>
5	<p>At this level, the fidelity of the component and/or breadboard being tested has to increase significantly.</p> <p>The basic technological elements must be integrated with reasonably realistic supporting elements so that the total applications (component-level, sub-system level, or system-level) can be tested in a 'simulated' or somewhat realistic environment.</p> <p>From one-to-several new technologies might be involved in the demonstration.</p> <p>For example, a new type of solar photovoltaic material promising higher efficiencies would at this level be used in an actual fabricated solar array 'blanket' that would be integrated with power supplies, supporting structure, etc., and tested in a thermal vacuum chamber with solar simulation capability.</p> <p>Cost to Achieve: Moderate 'Unique' Cost (investment cost will be technology dependent, but likely to be several factors greater than cost to achieve TRL 4)</p>	<p>Fidelity of breadboard technology increases significantly. The basic technological components are integrated with reasonably realistic supporting elements so it can be tested in a simulated environment. Examples include "high fidelity" laboratory integration of components.</p>	<p>HW/S: Fidelity of breadboard technology increases significantly. The basic technological components are integrated with reasonably realistic supporting elements so that it can be tested in a simulated environment. Examples include "high fidelity" laboratory integration of components.</p> <p>SW: Reliability of software ensemble increases significantly. The basic software components are integrated with reasonably realistic supporting elements so that it can be tested in a simulated environment. Examples include "high fidelity" laboratory integration of software components. System software architecture established. Algorithms run on a processor(s) with characteristics expected in the operational environment. Software releases are 'Alpha' versions and configuration control initiated. Verification, Validation and Accreditation (VV&amp;A) initiated.</p>	<p>Fidelity of sub-system representation increases significantly. The basic technological components are integrated with realistic supporting elements so that the technology can be tested in a simulated operational environment. Examples include "high fidelity" laboratory/field integration of components.</p> <p>Rarely an R&amp;T (funded) activity if it is a hardware system of any magnitude or system complexity.</p>	<p>HW: Fidelity of technology increases significantly. The basic technological components are integrated with reasonably realistic supporting elements so they can be tested in a simulated environment. Examples include high fidelity laboratory integration of components, and basic field trials to prove capability concepts</p> <p>SW: Level at which software technology is ready to start integration with existing systems. The prototype implementations conform to target environment/ interfaces. Experiments with realistic problems. Simulated interfaces to existing systems. System software architecture established. Algorithms run on a processor(s) with characteristics expected in the operational environment</p>

TRL	TRL Description (NASA, 1995)	TRL Description (DoD 5000.2-R App6 05_Apr-02)	TRL Description (ARMY) (S/HW/SW)	TRL Description (NATO framework)	TRL Description (UK MoD guidance 3.0)
6	<p>A major step in the level of fidelity of the technology demonstration follows the completion of TRL 5. At TRL 6, a representative model or prototype system or system — which would go well beyond ad hoc, 'patch-cord' or discrete component level "bread-boarding" — would be tested in a relevant environment. At this level, if the only 'relevant environment' is the environment of space, then the model/prototype must be demonstrated in space. Of course, the demonstration should be successful to represent a true TRL 6.</p> <p>Not all technologies will undergo a TRL 6 demonstration: at this point the maturation step is driven more by assuring management confidence than by R&amp;D requirements. The demonstration might represent an actual system application, or it might only be similar to the planned application, but using the same technologies.</p> <p>At this level, several-to-many new technologies might be integrated into the demonstration. For example, a innovative approach to high temperature/low mass radiators, involving liquid droplets and composite materials, would be demonstrated to TRL 6 by actually flying a working, sub-scale (but scaleable) model of the system on a Space Shuttle or International Space Station 'pallet'. In this example, the reason space is the 'relevant' environment is that microgravity plus vacuum plus thermal environment effects will dictate the success/failure of the system — and the only way to validate the technology is in space. Cost to Achieve: Technology and demonstration specific; a fraction of TRL 7 if on ground; nearly the same if space is required</p>	<p>Representative model or prototype system, which is well beyond that of TRL5, is tested in a relevant environment. Represents a major step up in a technology's demonstrated readiness. Examples include testing a prototype in a high fidelity laboratory environment or in simulated operational environment.</p>	<p>HW/S: Representative model or prototype system, which is well beyond that of TRL 5, is tested in a relevant environment. Represents a major step up in technology's demonstrated readiness. Examples include testing a prototype in a high fidelity laboratory environment, or in a simulated operational environment. SW: Representative model or prototype system, which is well beyond that of TRL 5, is tested in a relevant environment. Represents a major step up in software demonstrated readiness. Examples include testing a prototype in a live/virtual experiment or in simulated operational environment. Algorithm run on processor or operational environment integrated with actual external entities. Software releases are 'Beta' versions and configuration controlled. Software support structure in development. VV&amp;A in process.</p>	<p>Representative model or prototype system, which is well beyond the representation tested for TRL 5, is tested in a more realistic operational environment. Represents a major step up in a technology's demonstrated readiness. Examples include testing a prototype in a high fidelity laboratory/field environment or in simulated operational environment. Rarely an R&amp;T (funded) activity if it is a hardware system of any magnitude or of significant system complexity..</p>	<p>HW: Representative model or prototype system, which is well beyond that of TRL 5, is tested in a relevant environment. Represents a major step up in a technology's demonstrated readiness. Examples include field testing a prototype in a high fidelity laboratory environment or in a simulated operational environment operating under proposed protocols SW: Level at which the engineering feasibility of a software technology is demonstrated. This level extends to laboratory prototype implementations on full-scale realistic problems in which the software technology is partially integrated with existing hardware/software systems</p>
7	<p>TRL 7 is a significant step beyond TRL 6, requiring an actual system prototype demonstration in a space environment. It has not always been implemented in the past. In this case, the prototype should be near or at the scale of the planned operational system and the demonstration must take place in space. The driving purposes for achieving this level of maturity are to assure system engineering and development management confidence (more than for purposes of technology R&amp;D). Therefore, the demonstration must be of a prototype of that application. Not all technologies in all systems will go to this level. TRL 7 would normally only be performed in cases where the technology and/or subsystem application is mission critical and relatively high risk. Example: the Mars Pathfinder Rover is a TRL 7 technology demonstration for future Mars micro-rovers based on that system design. Example: X-vehicles are TRL 7, as are the demonstration projects planned in the New Millennium spacecraft program. Cost to Achieve: Technology and demonstration specific, but a significant fraction of the cost of TRL 8 (investment = "Phase C/D to TFU" for demonstration system)</p>	<p>Prototype near or at planned operational system. Represents a major step up from TRL6, requiring demonstration of an actual system prototype in an operational environment, such as in aircraft, vehicle, or space. Examples include testing the prototype in a test bed aircraft.</p>	<p>HW/S: Prototype near, or at, planned operational system. Represents a major step up from TRL 6, requiring demonstration of an actual system prototype in an operational environment, such as an aircraft, vehicle, or space. Examples include testing the prototype in a test bed aircraft. SW: Represents a major step up from TRL 6, requiring the demonstration of an actual system prototype in an operational environment, such as in a command post or air/ground vehicle. Algorithms run on processor of the operational environment integrated with actual external entities. Software support structure in place. Software releases are in distinct versions. Frequency and severity of software deficiency reports do not significantly degrade functionality or performance. VV&amp;A completed.</p>	<p>Prototype near or at planned operational system level. Represents a major step up from TRL 6, requiring the demonstration of an actual system prototype in an operational environment, such as in a relevant platform or in a "system-of-systems". Information to allow supportability assessments is obtained. Examples include extensive testing of a prototype in a test bed vehicle or use in a military exercise. Not R&amp;T funded although R&amp;T experts may well be involved.</p>	<p>HW: Prototype near or at planned operational system. Represents a major step up from TRL 6 by requiring demonstration of an actual system prototype in an operational environment (e.g., in an aircraft, in a vehicle, or platform in the field). The operational environment may be defined as that which exposes the technology to the physical, electrical, environmental and security interfaces that will be experienced in service SW: Level at which the program feasibility of a software technology is demonstrated. This level extends to operational environment prototype implementations where critical technical risk functionality is available for demonstration and a test in which the software technology is well integrated with operational hardware/software systems</p>

TRL	TRL Description (NASA, 1995)	TRL Description (DoD 5000.2-R App6 05 Apr-02)	TRL Description (ARMY) (S/HW/SW)	TRL Description (NATO framework)	TRL Description (UK MoD guidance 3.0)
8	<p>By definition, all technologies being applied in actual systems go through TRL 8. In almost all cases, this level is the end of true 'system development' for most technology elements.</p> <p>Example: this would include DDT&amp;E through Theoretical First Unit (TFU) for a new reusable launch vehicle. This might include integration of new technology into an existing system. Example: loading and testing successfully a new control algorithm into the onboard computer on Hubble Space Telescope while in orbit.</p> <p>Cost to Achieve: Mission specific; typically highest unique cost for a new technology (investment = "Phase C/D to TFU" for actual system)</p>	<p>Technology has been proven to work in its final form and under expected conditions. In almost all cases, this TRL represents the end of true system development. Examples include developmental test and evaluation of the system in its intended weapon system to determine if it meets design specifications.</p>	<p>HW/S: Technology has been proven to work in its final form and under expected conditions. In almost all cases, TRL represents the end of true system development. Examples include developmental test and evaluation of the system in its intended weapon system to determine if it meets design specifications.</p> <p>SW: Software has been demonstrated to work in its final form and under expected conditions. In most cases, this TRL represents the end of system development. Examples include test and evaluation of the software in its intended system to determine if it meets design specifications. Software releases are production versions and configuration controlled, in a secure environment. Software deficiencies are rapidly resolved through support structure.</p>	<p>Technology has been proven to work in its final form and under expected conditions. In almost all cases, this TRL represents the end of Demonstration. Examples include test and evaluation of the system in its intended weapon system to determine if it meets design specifications, including those relating to supportability. Not R&amp;T funded although R&amp;T experts may well be involved.</p>	<p>System: Technology has been proven to work in its final form and under expected conditions. In almost all cases, this TRL represents the end of true technology and integration development. Examples include developmental test and evaluation of the system in its intended platform to determine if it meets design specifications. All functionality tested in simulated and operational scenarios</p>
9	<p>By definition, all technologies being applied in actual systems go through TRL 9. In almost all cases, the end of last 'bug fixing' aspects of true 'system development'.</p> <p>For example, small fixes/changes to address problems found following launch (through '30 days' or some related date). This might include integration of new technology into an existing system (such operating a new artificial intelligence tool into operational mission control at JSC). This TRL does not include planned product improvement of ongoing or reusable systems.</p> <p>For example, a new engine for an existing RLV would not start at TRL 9: such 'technology' upgrades would start over at the appropriate level in the TRL system.</p> <p>Cost to Achieve: Mission Specific; less than cost of TRL 8 (e.g., cost of launch plus 30 days of mission operations)</p>	<p>Actual application of the technology in its final form and under mission conditions, such as those encountered in operational test and evaluation. Examples include using the system under operational mission conditions.</p>	<p>HW/S: Actual application of the technology in its final form and under mission conditions, such as those encountered in operational test and evaluation. In almost all cases, this is the end of the last "bug fixing" aspects of system development. Examples include using the system under operational mission conditions. SW: Actual application of the software in its final form and under mission conditions, such as those encountered in operational test and evaluation. In almost all cases, this is the end of the last "bug fixing" aspects of system development. Examples include using the system under operational mission conditions. Software releases are production versions and configuration controlled. Frequency and severity of software deficiencies are at a minimum.</p>	<p>Application of the technology in its final form and under mission conditions, such as those encountered in operational test and evaluation and reliability trials. Examples include using the final system under operational mission conditions.</p>	<p>System: Actual application of the technology in its final form and under operational conditions. Technology proven in-service. Successful operational experience</p>