Modellbasierte Evaluierung von Anforderungen in Kombination mit Polarion®

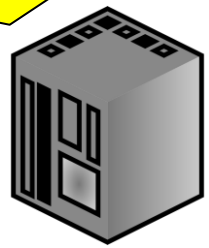
Vitus Meidinger
Dienstag, 2. Juli 2019

Entwicklung eines **eVTOL** Fluggeräts

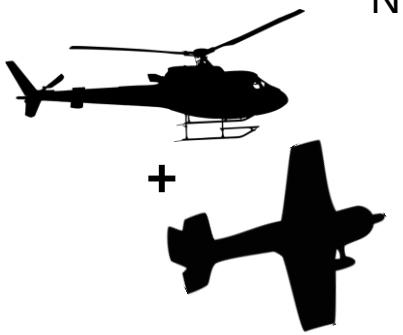
Ziel: Entwicklung Regler im FCS

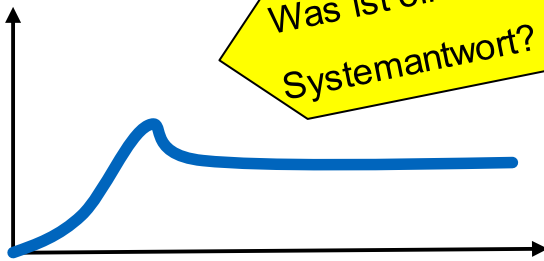
Pilot

Stick



Flight Control System





Was ist eine „gute“ Systemantwort?

Dynamische Systemantwort

Standards und Normen

MIL-HDBK-1797

ADS-33E

AS 94900

…

Projektpartner

Kunden

Alle Anforderungen müssen erfüllt werden!

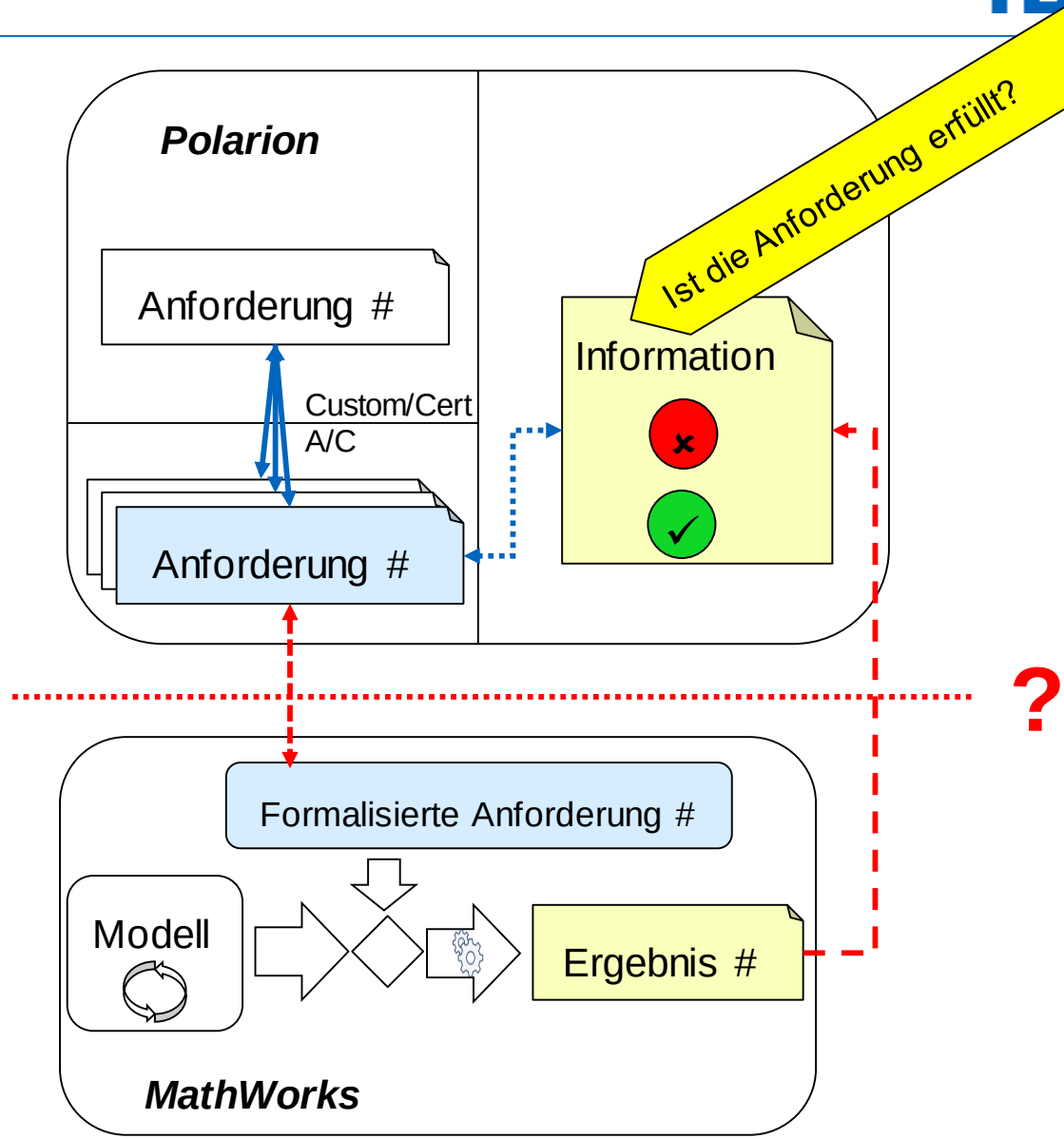
Problemdefinition

Wie kann sichergestellt werden, dass Anforderungen erfüllt sind?

- ***Polarion***:
  - ➡ Kommerzielle Software von Siemens
  - ➡ Anforderungsmanagement und Nachverfolgbarkeit
- ***MathWorks:***
  - ➡ Modelle im Rahmen der Entwicklung vorhanden
  - ➡ Modelle für Anforderungsevaluierung nutzen

Wie kann dieser Prozess realisiert werden?

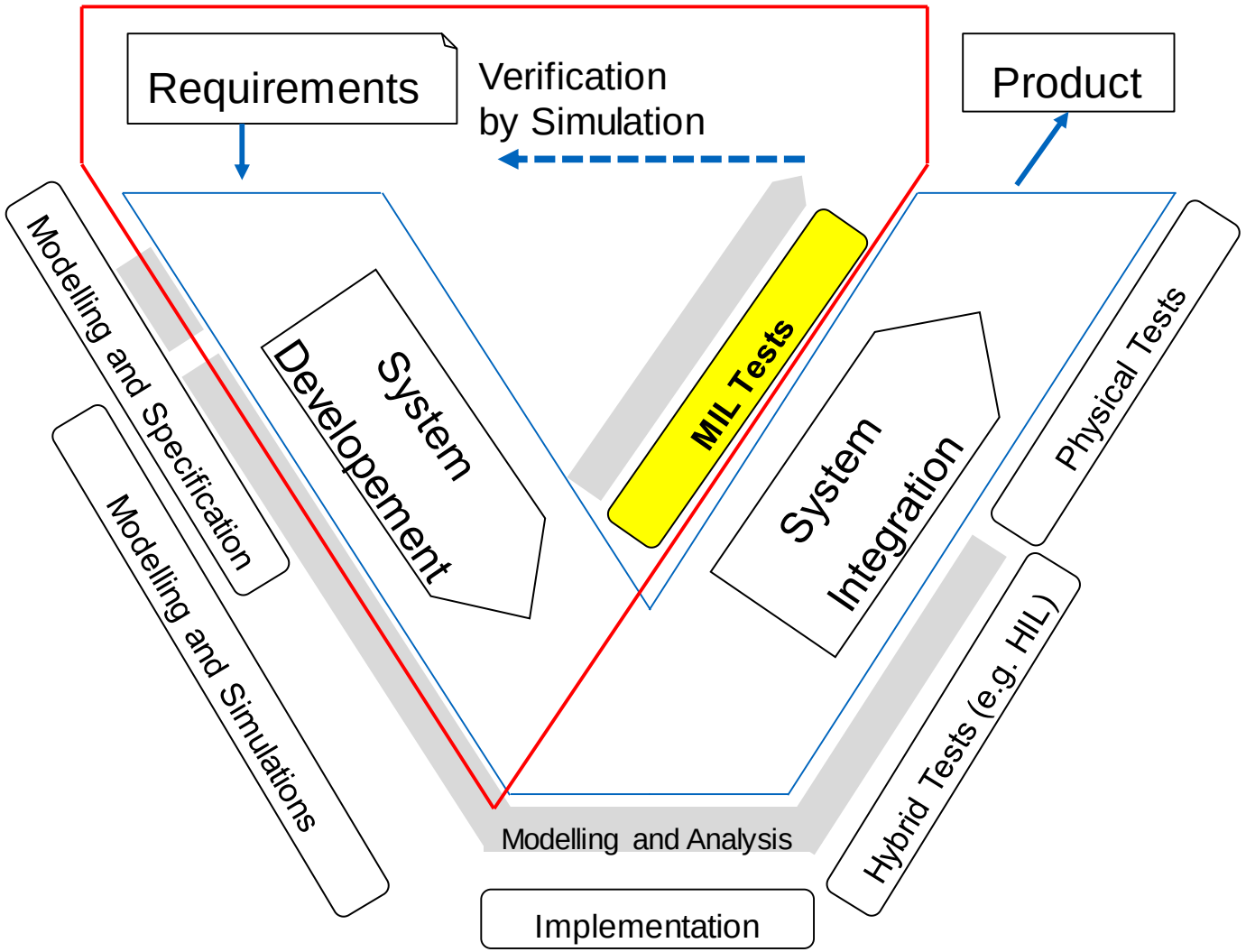
Wie kann die Nachverfolgbarkeit gewährleistet werden?



Agenda

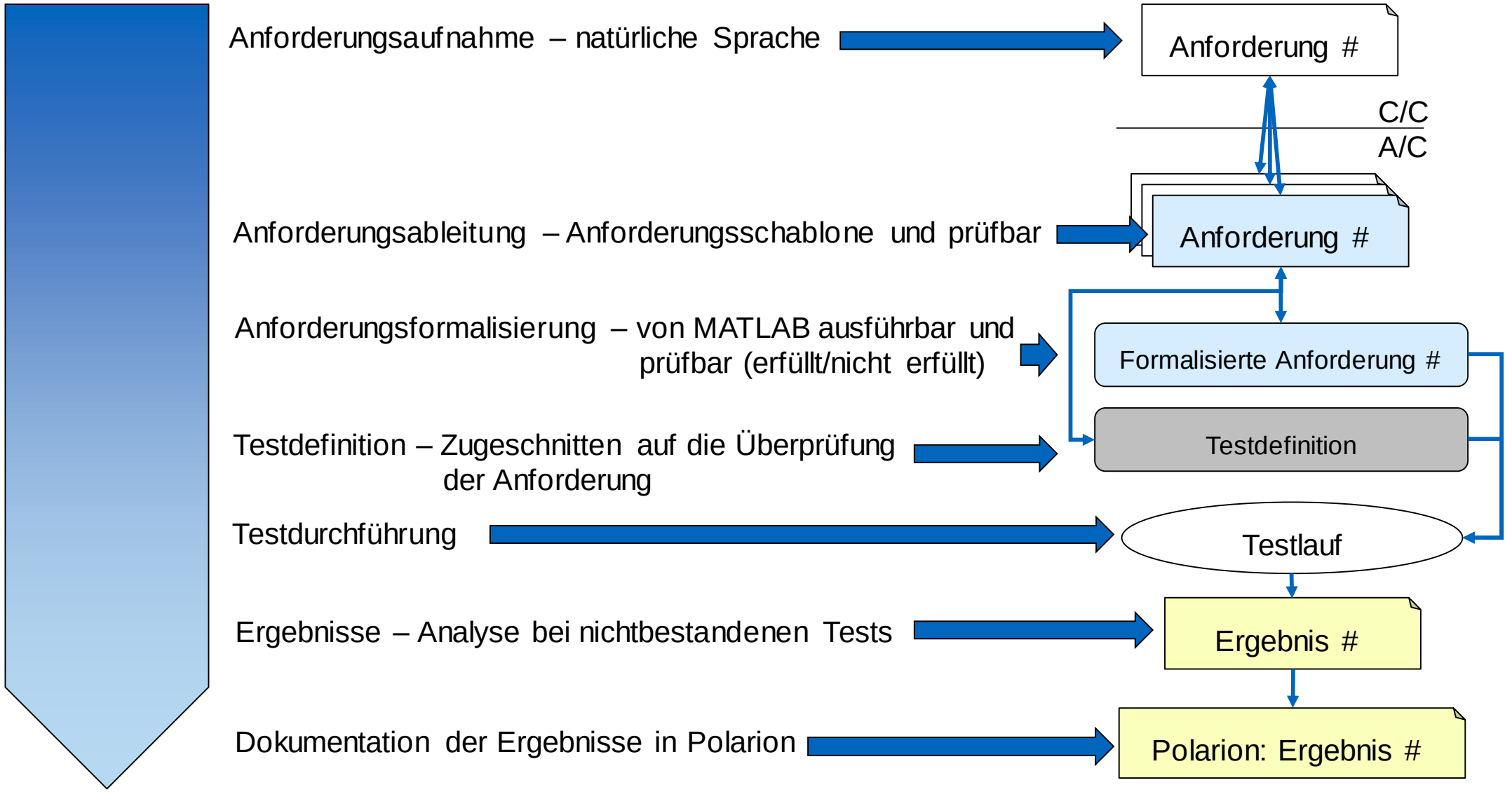
1. Kontext – Virtuelle Produktentwicklung
2. Prozess – Von der Anforderung zum Testergebnis
3. Verwendete Toolboxen
4. Beispiel
5. Prozess im Kontext der Reglerentwicklung
6. Zusammenfassung

1. Kontext - Systementwicklung



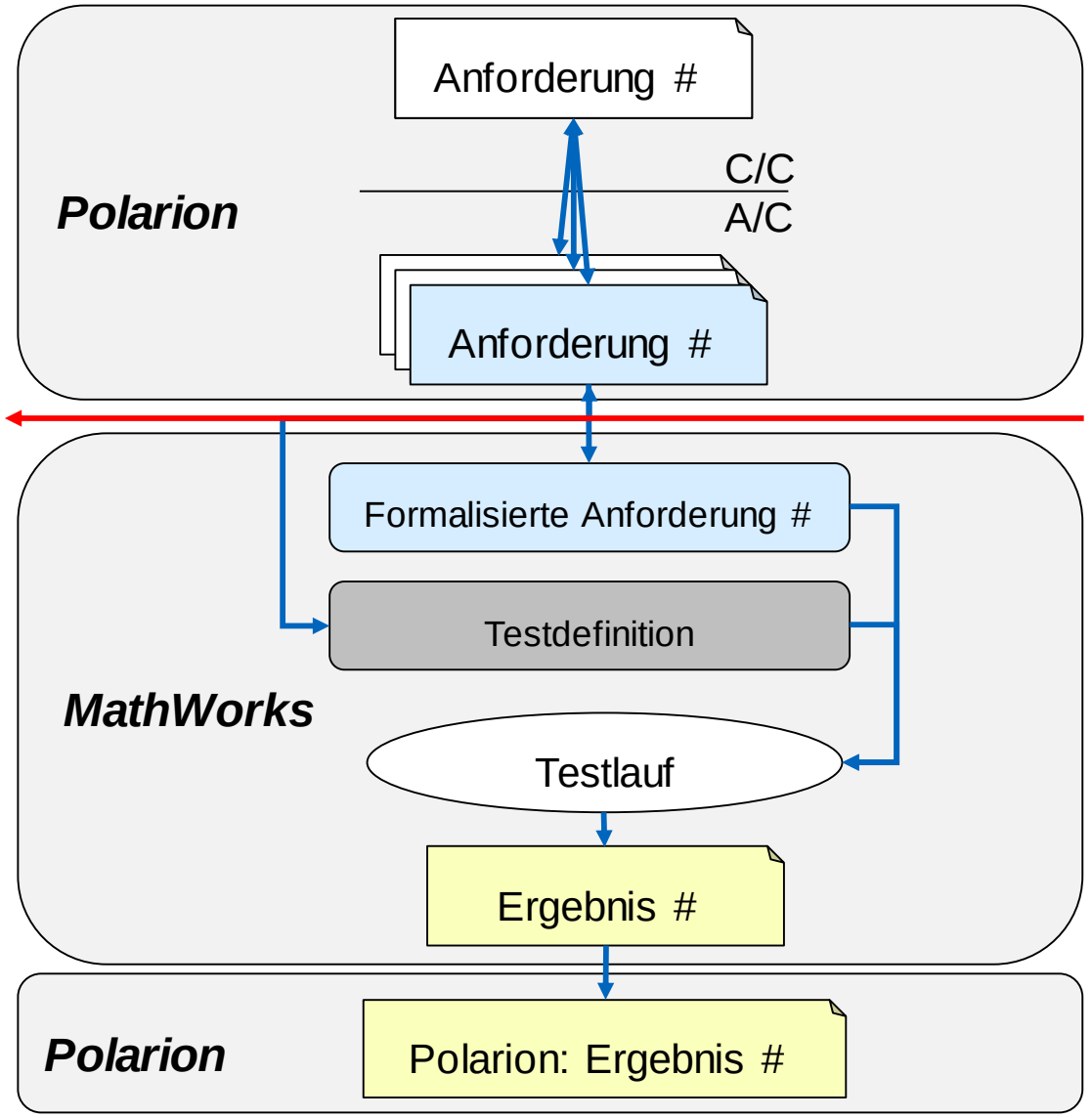
Source:
Eigner, Martin; Roubanov, Daniil;
Zafirov, Radoslav (2014): Modellbasierte
virtuelle Produktentwicklung. Berlin,
Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
Page 87

2. Prozess


Anforderungsaufnahme – natürliche Sprache
Anforderung #
C/C
A/C
Anforderungsableitung – Anforderungsschablone und prüfbar
Anforderung #
Anforderungsformalisierung – von MATLAB ausführbar und prüfbar (erfüllt/nicht erfüllt)
Formalisierte Anforderung #
Testdefinition – Zugeschnitten auf die Überprüfung der Anforderung
Testdefinition
Testdurchführung
Testlauf
Ergebnisse – Analyse bei nichtbestandenen Tests
Ergebnis #
Dokumentation der Ergebnisse in Polarion
Polarion: Ergebnis #

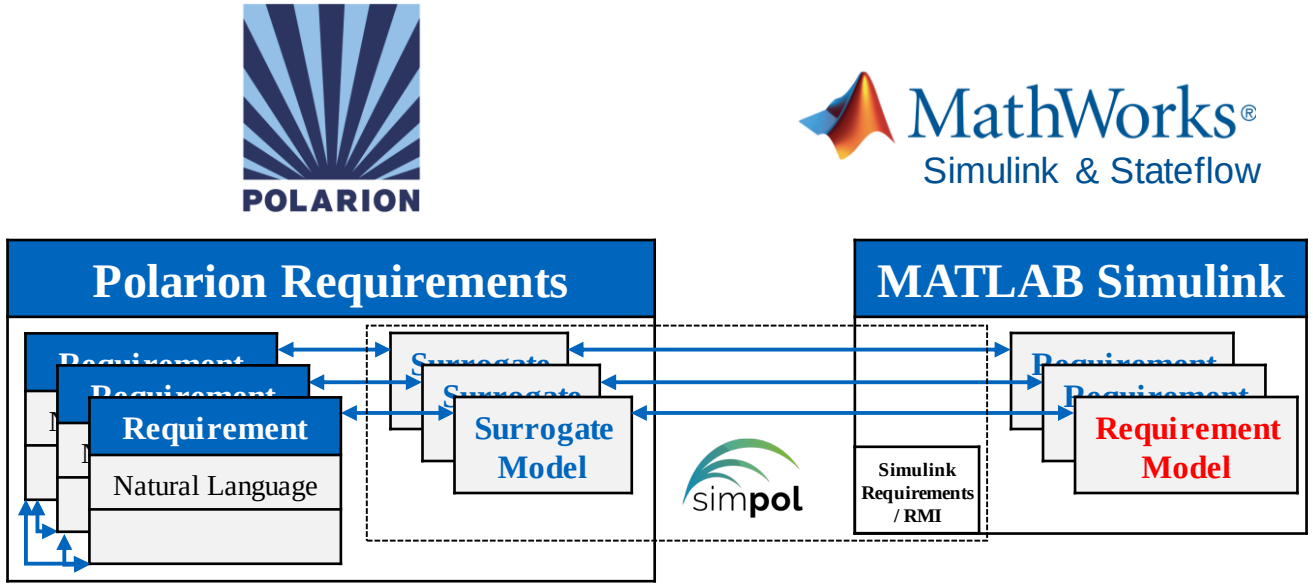
3. Toolboxen – SimPol

SimPol:
=> gewährleistet eine Bi-Direktionale Verbindung



Requirements Linking: Simulink – Polarion Connector SimPol

- Kostenloses und MATLAB basiertes Tool.
- Erstellung, Wartung und Evaluierung der bi-direktionalen Verbindung zwischen Simulink und Polarion.
- Unterstützung des Entwicklungsprozesses von sicherheitskritischen Systemen.

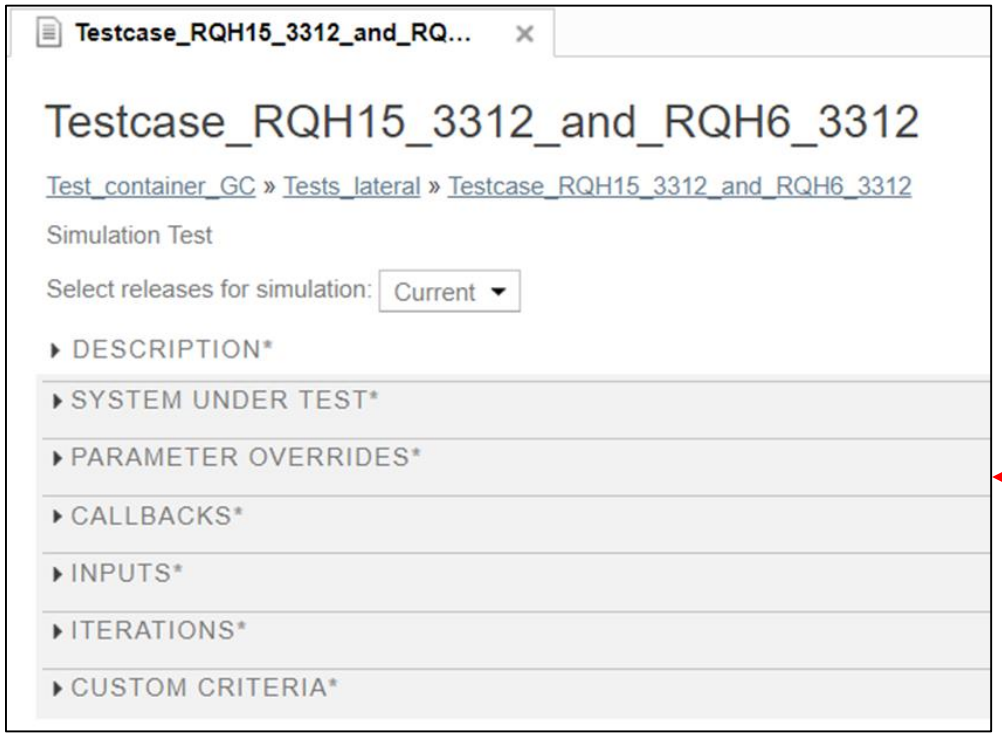


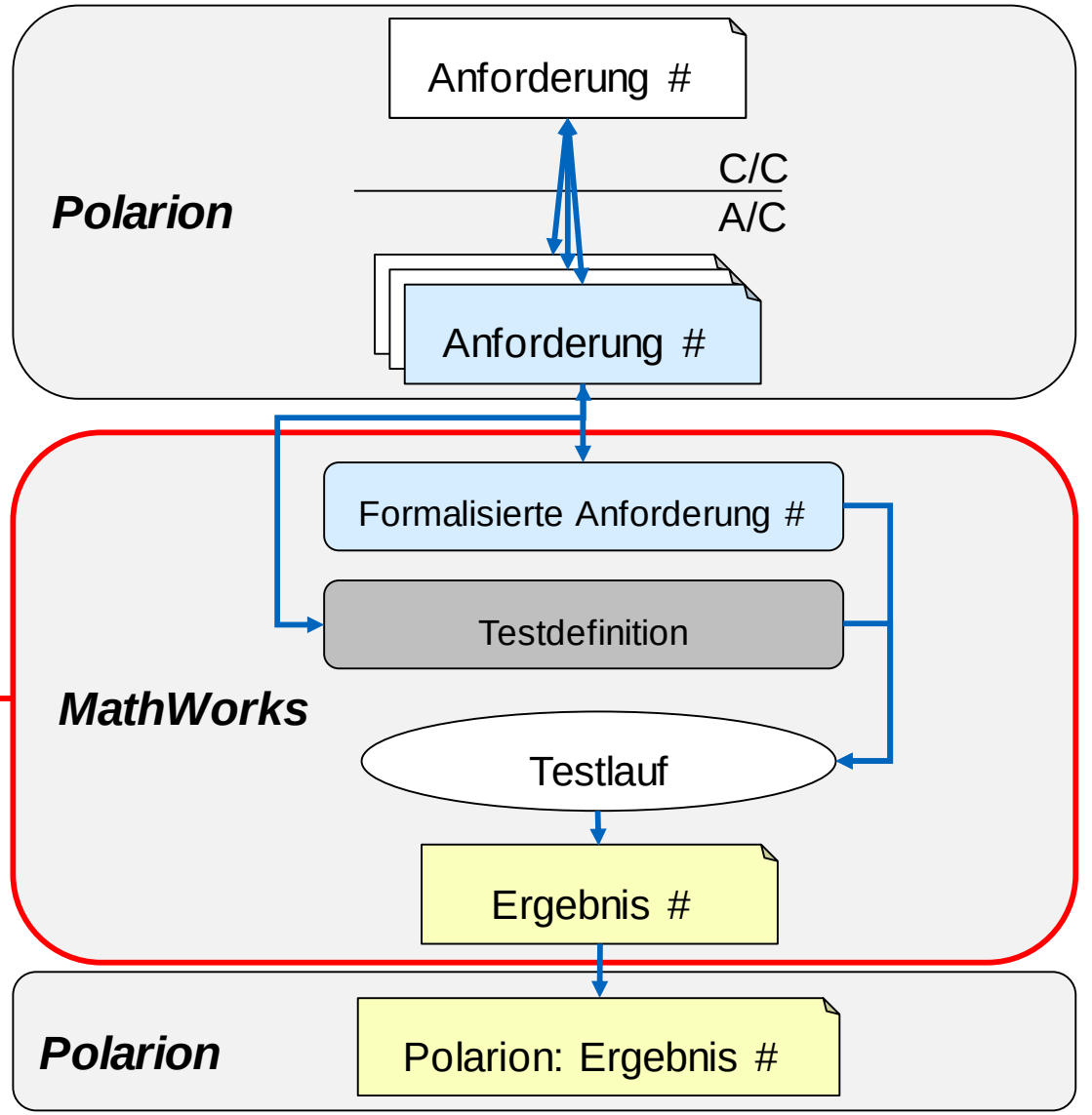
Markus Hochstrasser
Ehem. Mitarbeiter FSD - MATLAB Stipendiat

Download: http://www.fsd.mw.tum.de/software/simpol/

3. Toolboxen - Simulink und Simulink Testmanager

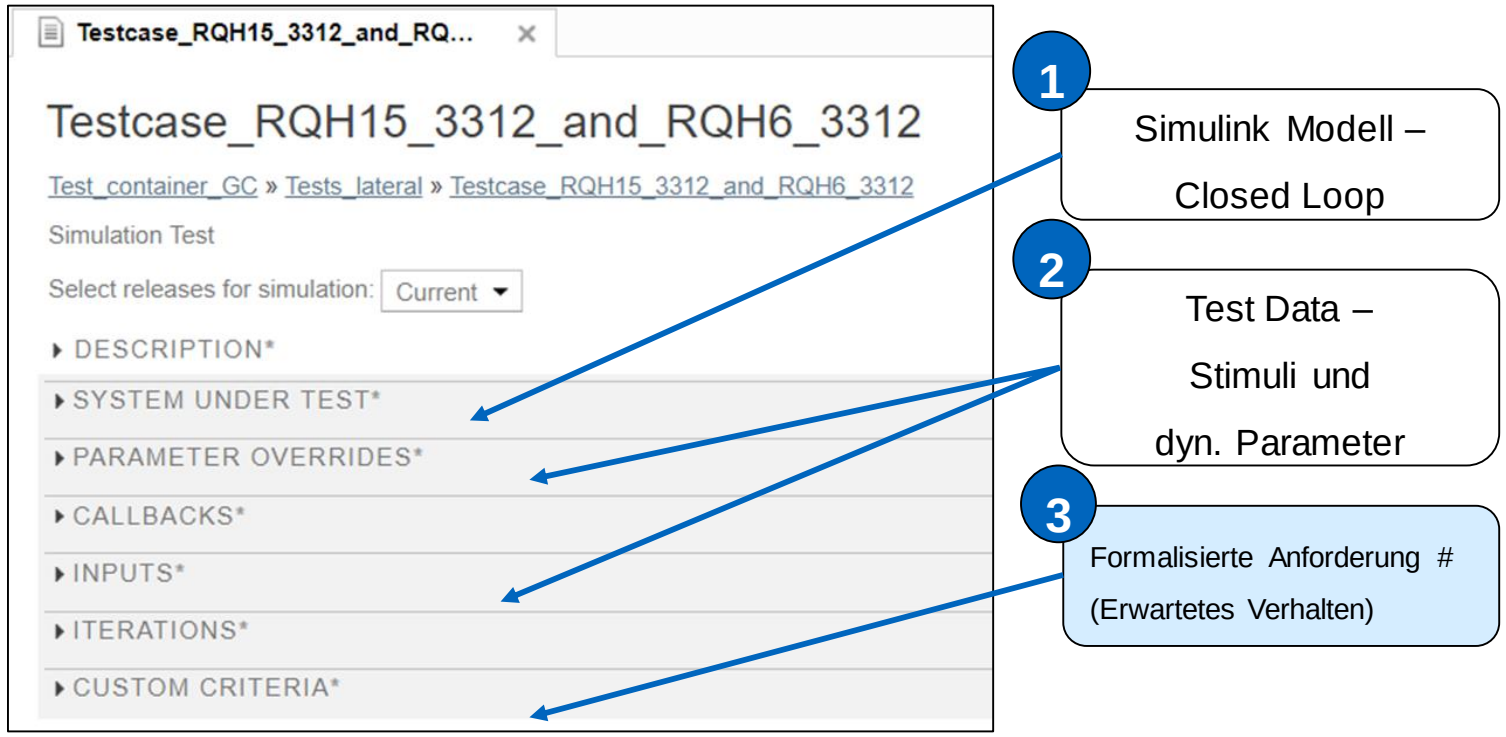
Simulink Testmanager:
Testdefinition und Management





3. Toolboxen - Simulink Testmanager

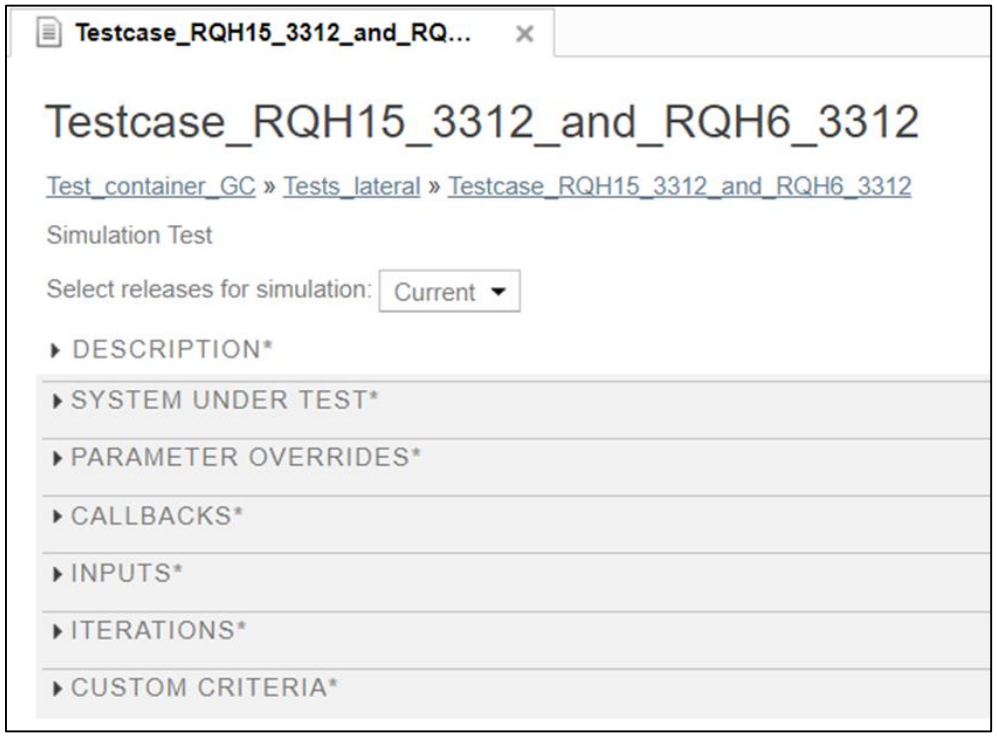
Simulink Testmanager:
Testdefinition und Management

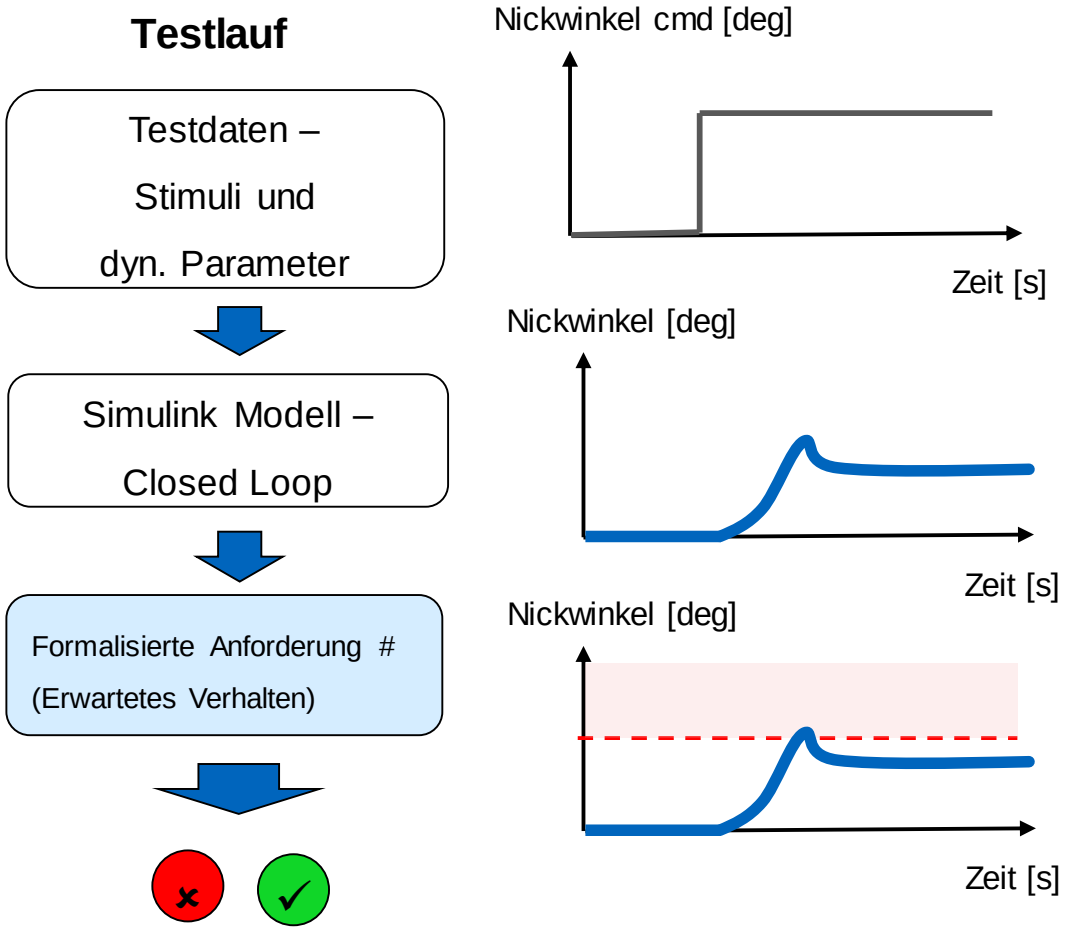


1. Simulink Modell – Closed Loop
2. Test Data – Stimuli und dyn. Parameter
3. Formalisierte Anforderung # (Erwartetes Verhalten)

3. Toolboxen - Simulink Testmanager

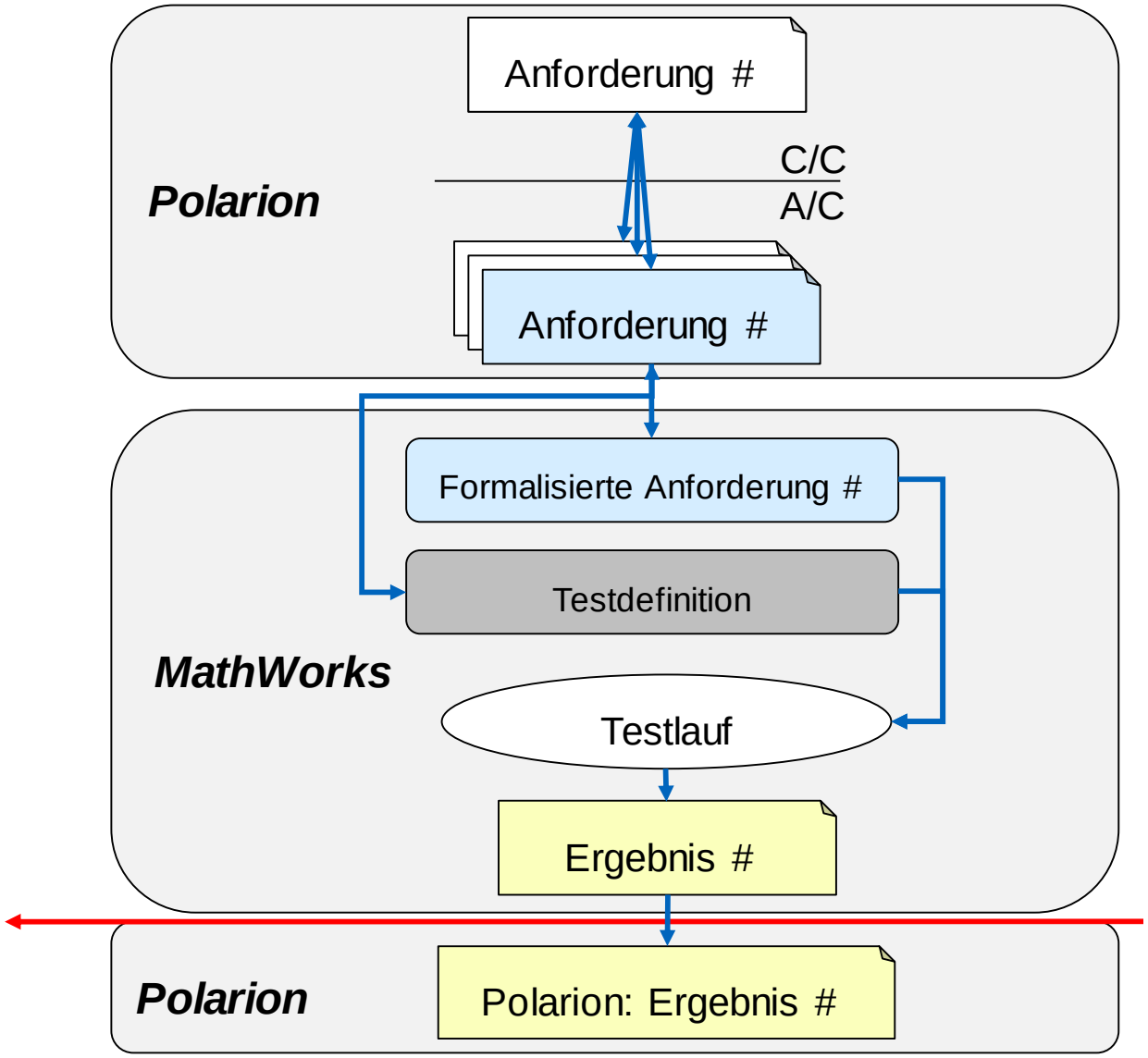
Simulink Testmanager:
Testdefinition und Management





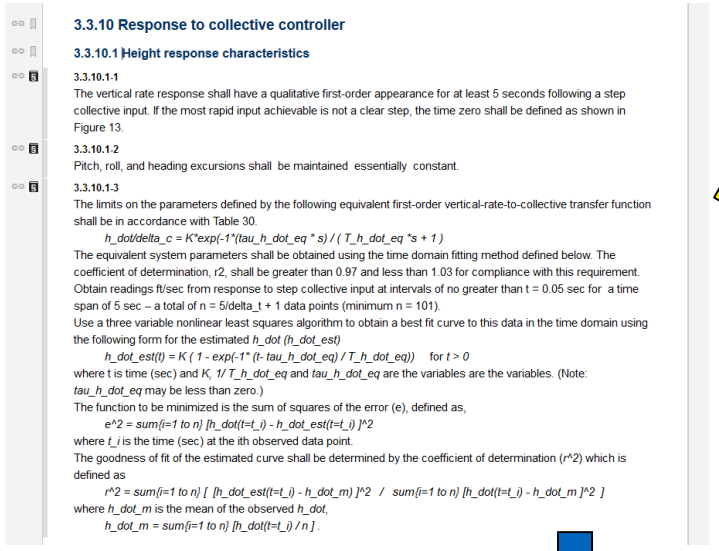
MATLAB Funktion um Signale gegenüber Anforderungskriterien zu evaluieren

3. Toolboxen – XML Wrapper



XML-Wrapper:
=> Ergebnisse in XML Format können in Polarion hochgeladen und interpretiert werden

4. Beispiel – Anforderung in Polarion



3.3.10 Response to collective controller

3.3.10.1 Height response characteristics

3.3.10.1-1
The vertical rate response shall have a qualitative first-order appearance for at least 5 seconds following a step collective input. If the most rapid input achievable is not a clear step, the time zero shall be defined as shown in Figure 13.

3.3.10.1-2
Pitch, roll, and heading excursions shall be maintained essentially constant.

3.3.10.1-3
The limits on the parameters defined by the following equivalent first-order vertical-rate-to-collective transfer function shall be in accordance with Table 30.

*h_dot/delta_c = K*exp(-1*(tau_h_dot_eq * s) / (T_h_dot_eq *s + 1)*

The equivalent system parameters shall be obtained using the time domain fitting method defined below. The coefficient of determination, r2, shall be greater than 0.97 and less than 1.03 for compliance with this requirement. Obtain readings ft/sec from response to step collective input at intervals of no greater than t = 0.05 sec for a time span of 5 sec – a total of n = 5/delta_t + 1 data points (minimum n = 101).
Use a three variable nonlinear least squares algorithm to obtain a best fit curve to this data in the time domain using the following form for the estimated *h_dot (h_dot_est)*

h_dot_est(t) = K (1 - exp(-1 (t- tau_h_dot_eq) / T_h_dot_eq)) for t > 0*

where t is time (sec) and *K, 1/ T_h_dot_eq* and *tau_h_dot_eq* are the variables are the variables. (Note: *tau_h_dot_eq* may be less than zero.)
The function to be minimized is the sum of squares of the error (e), defined as,

e^2 = sum{i=1 to n} [h_dot(t=t_i) - h_dot_est(t=t_i)]^2

where *t_i* is the time (sec) at the ith observed data point.
The goodness of fit of the estimated curve shall be determined by the coefficient of determination (*r^2*) which is defined as

r^2 = sum{i=1 to n} [[h_dot_est(t=t_i) - h_dot_m)]^2 / sum{i=1 to n} [h_dot(t=t_i) - h_dot_m]^2]

where *h_dot_m* is the mean of the observed *h_dot*,

h_dot_m = sum{i=1 to n} [h_dot(t=t_i) / n] .

Originale Anforderung

1 ADS-33 Requirements

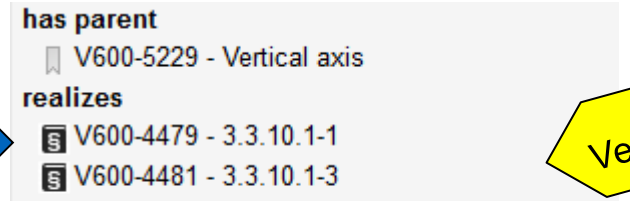
1.1 Nominal Flight Controller - Hover Flight Phase

1.1.1 Vertical axis

V600-5232 - Height response characteristics – rise time and delay

If there is a step input in vertical direction with maximum stick deflection, the A/C must have a PT1 like response in vertical velocity in C-frame with a rise time of not more than 5 seconds and a time delay of not more than 0.2 seconds.

Abgeleitete Anforderung



has parent
V600-5229 - Vertical axis
realizes
V600-4479 - 3.3.10.1-1
V600-4481 - 3.3.10.1-3

Verbindungen und Links

Wenn SimPol Link definiert ist

4. Beispiel – Formalisierte Anforderung als Funktion

has parent
V600-5229 - Vertical axis
realizes
V600-4479 - 3.3.10.1-1
V600-4481 - 3.3.10.1-3
is implemented by
V600-5302 - RQH13_33101.m|737392.645.1

Formalisierte Anforderung

Anforderungskriterium

```
%% ************* (1) Specifications for this requirement *****************%
r_square_min = 0.97;                                                    % Min estimation quality value [-]
r_square_max = 1.03;                                                    % Max estimation quality value [-]
Tau_max = 0.2;                                                          % Max delay value [s]
Time_constant_max = 5;                                                  % Max time constant value [s]
%*************************************************************************%
```

[...]

```
test.verifyTrue(flag,['RQ-H13-3.3.10.1 - Height response characteristics -risetime and delay:',...
    newline, 'Time constant T_h_dot ',...
    'must be smaller than: ',num2str(Time_constant_max), ' [s].' , newline , ...
    'Calculated value is: ', num2str(T_res) , ' [s]' ,...
    newline, 'Time delay tau_h_dot must be smaller than: ',num2str(Tau_max),'[s].',...
    newline, 'Calculated value is: ', num2str(tau_res),...
   ' [s].']);
```

MATLAB „verification function“

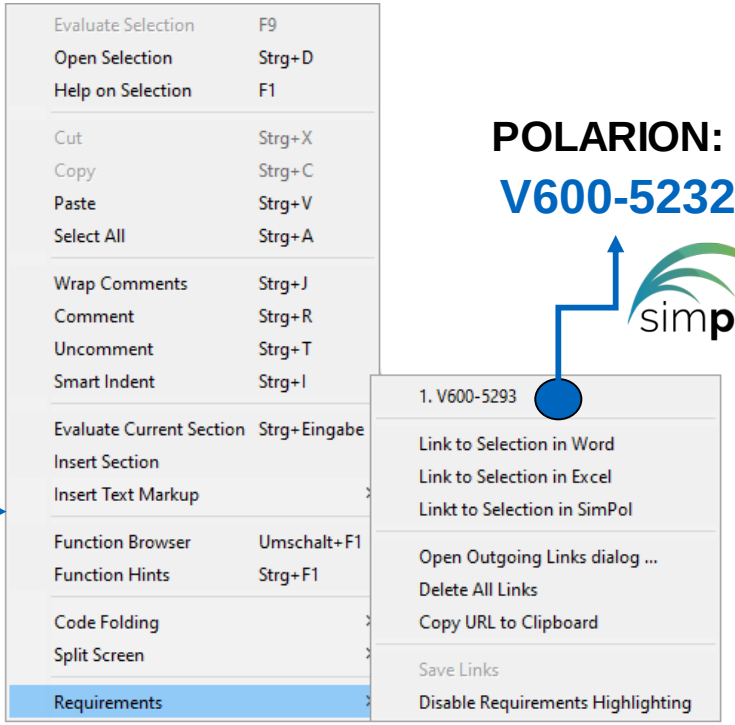
4. Beispiel – Formalisierte Anforderung mit SimPol Link

Formalisierte Anforderung

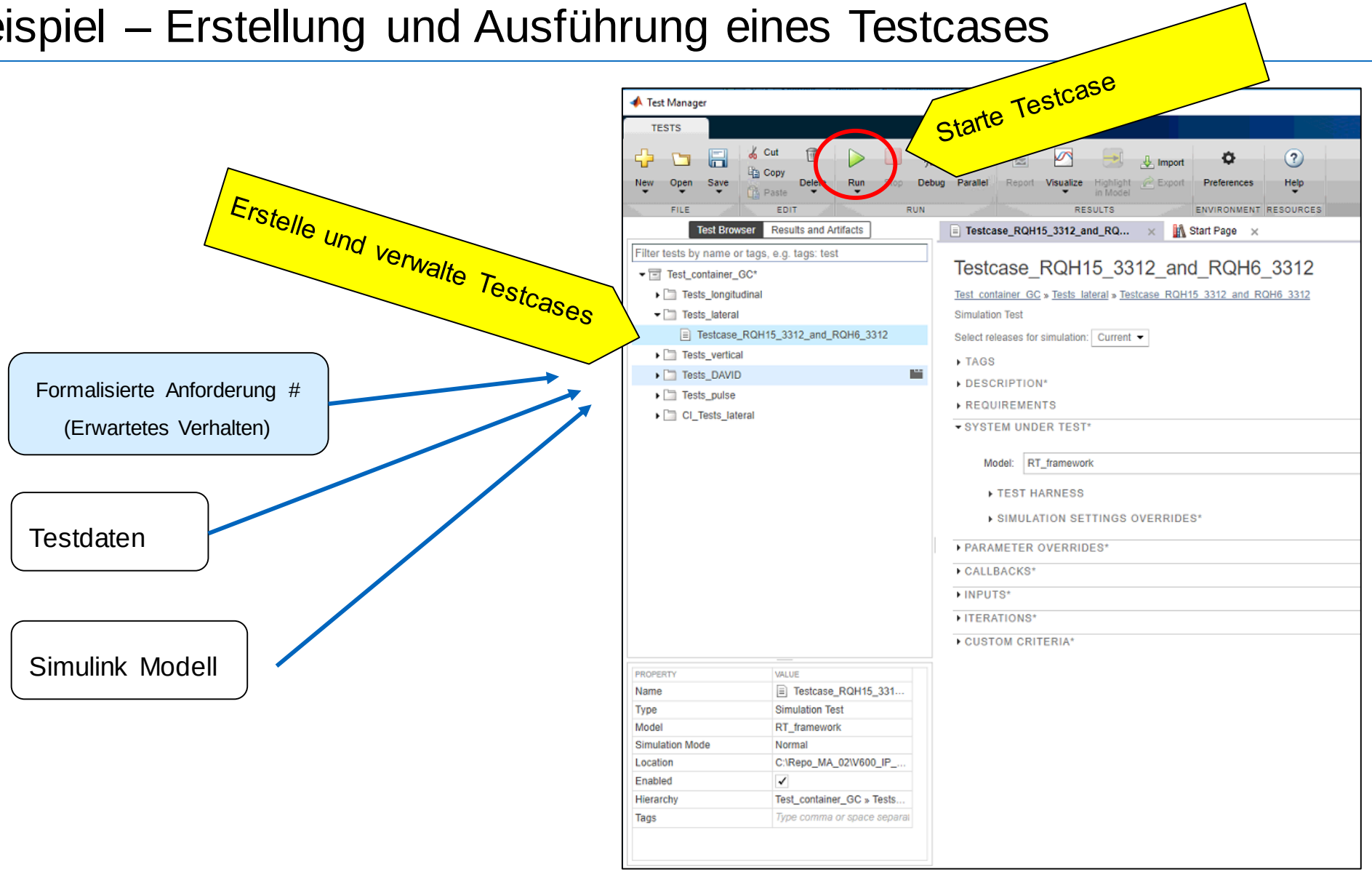
```
%% ************* (1) Specifications for this requirement ******************%
r_square_min = 0.97;                                          % Min estimation quality value [-]
r_square_max = 1.03;                                          % Max estimation quality value [-]
Tau_max = 0.2;                                                % Max delay value [s]
Time_constant_max = 5;                                        % Max time constant value [s]
%**************************************************************************%
```

[…]

```
test.verifyTrue(flag,['RQ-H13-3.3.10.1 - Height response characteristics -risetime and delay:',...
    newline, 'Time constant T_h_dot ',...
    'must be smaller than: ',num2str(Time_constant_max), ' [s].' , newline , ...
    'Calculated value is: ', num2str(T_res) , ' [s]' ,...
    newline, 'Time delay tau_h_dot must be smaller than: ',num2str(Tau_max),'[s].',...
    newline, 'Calculated value is: ', num2str(tau_res),...
   ' [s].']);
```



4. Beispiel – Erstellung und Ausführung eines Testcases



4. Beispiel – Evaluierung der Anforderung

Output der Simulation:

Vertikale Geschwindigkeit

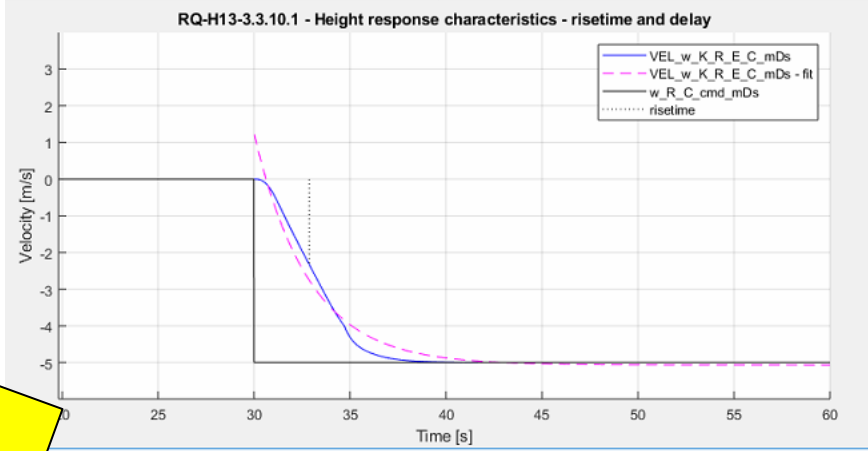
Formalisierte Anforderung

```
%% ************* (1) Specifications for this requirement ****************%
r_square_min = 0.97;                                                    % Min estimation quality value [-]
r_square_max = 1.03;                                                    % Max estimation quality value [-]
Tau_max = 0.2;                                                          % Max delay value [s]
Time_constant_max = 5;                                                  % Max time constant value [s]
%**************************************************************************%
```

[...]

```
test.verifyTrue(flag,['RQ-H13-3.3.10.1 - Height response characteristics -risetime and delay:',...
    newline, 'Time constant T_h_dot ',...
    'must be smaller than: ',num2str(Time_constant_max), ' [s].' , newline , ...
    'Calculated value is: ', num2str(T_res) , ' [s]' ,...
    newline, 'Time delay tau_h_dot must be smaller than: ',num2str(Tau_max),'[s].',...
    newline, 'Calculated value is: ', num2str(tau_res),...
   ' [s].']);
```

Textuelles Feedback



Grafisches Feedback

```
------------------------------------------------------------------------
VerificationFailed in custom criteria of sltest.testmanager.TestCase.

    ----------------
    Test Diagnostic:
    ----------------
    RQ-H13-3.3.10.1 - Height response characteristics -risetime and delay:
    Time constant T_h_dot must be smaller than: 5 [s].
    Calculated value is: 2.8631 [s]
    Time delay tau_h_dot must be smaller than: 0.2[s].
    Calculated value is: 0.62465 [s].
```

1 ADS-33 Requirements

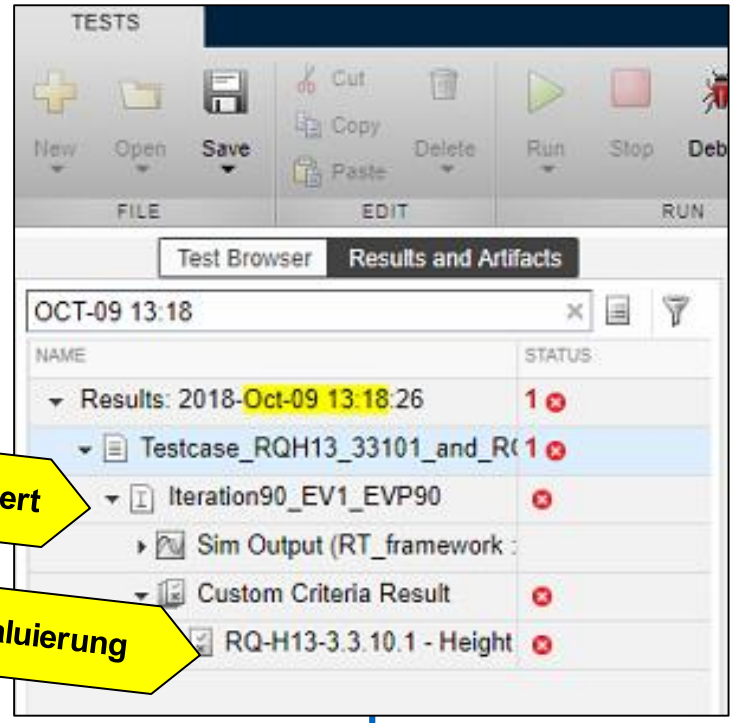
1.1 Nominal Flight Controller - Hover Flight Phase

1.1.1 Vertical axis

V600-5232 - Height response characteristics – rise time and delay

If there is a step input in vertical direction with maximum stick deflection, the A/C must have a PT1 like response in vertical velocity in C-frame with a rise time of not more than 5 seconds and a time delay of not more than 0.2 seconds.

4. Beispiel – Verwendung der Testergebnisse



Output der Simulation gespeichert

Ergebnisse der Anforderungsevaluierung

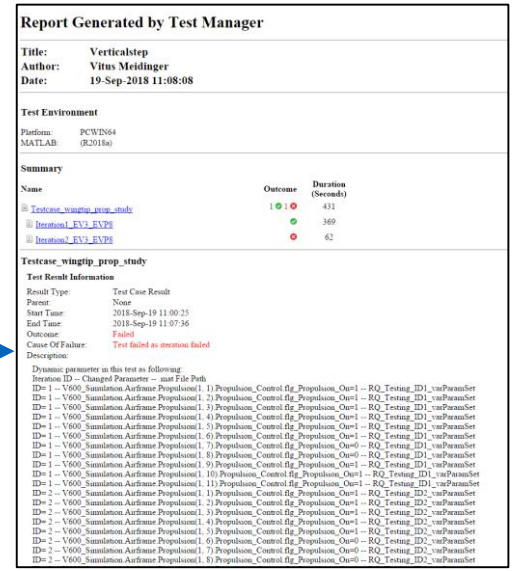
XML-Wrapper

Polarion

Ergebnis #

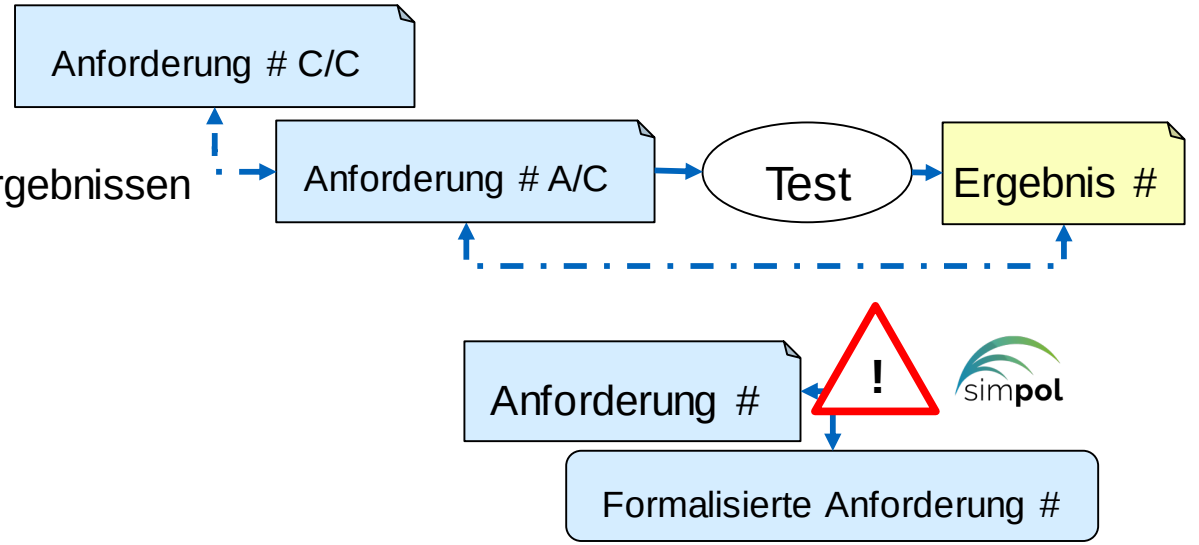
POLARION

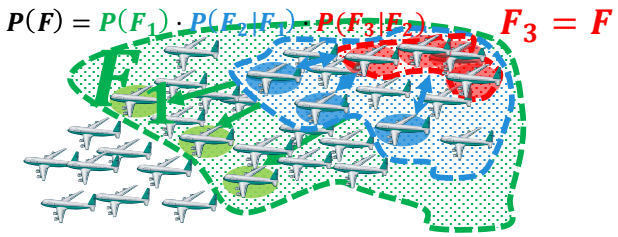
Automatischer Report



5. Prozess im Kontext der Reglerntwicklung

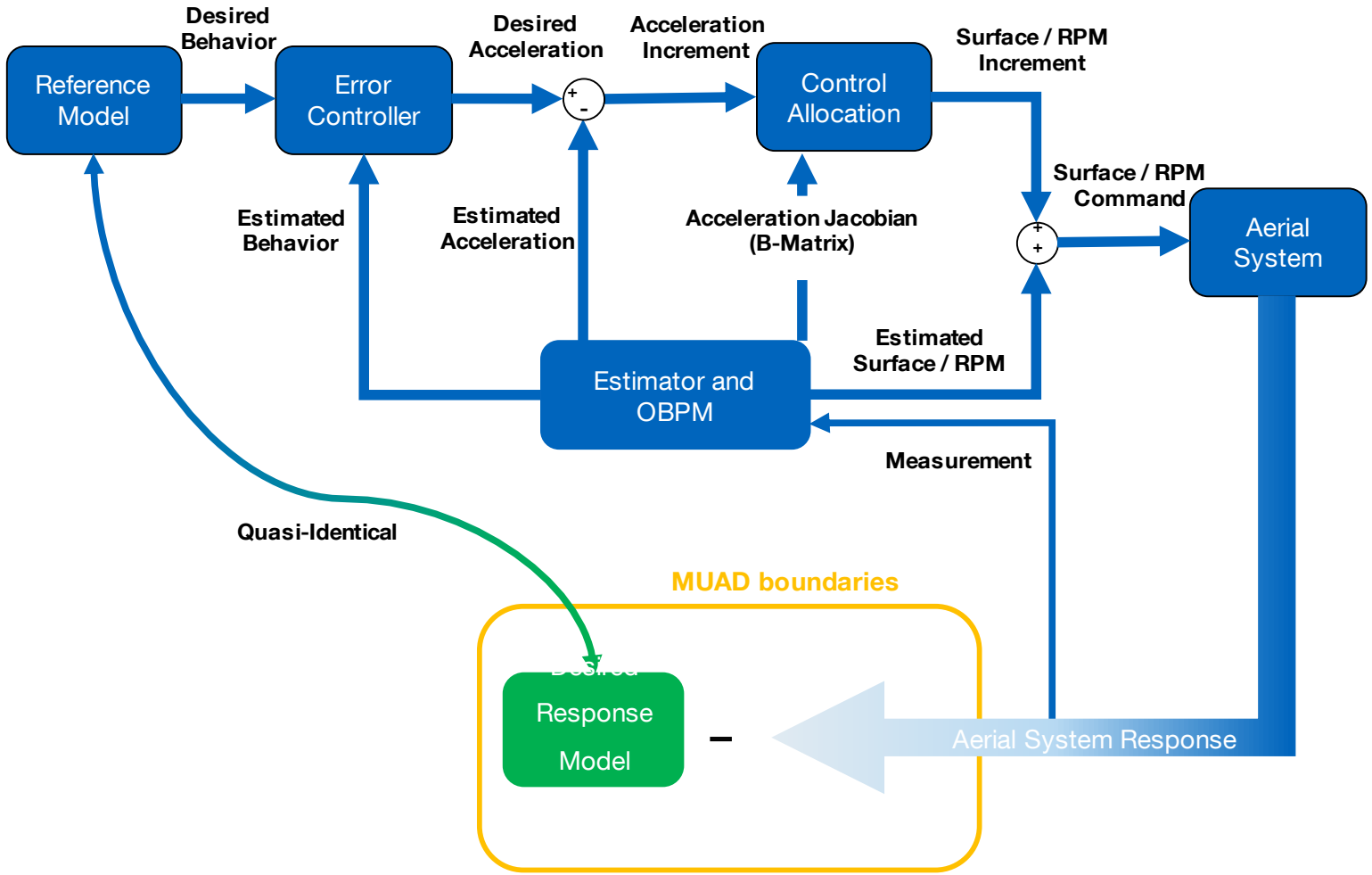
- **Traceability**
  ⇒ Nachverfolgbarkeit einzelner Anforderungen bis zu den Testergebnissen
- **Konsistenz**
  ⇒ Warnung bei Änderungen an einer Seite des SimPol Links – Autosuspect Polarion
- **Automatisierung** (in Continuous Integration Framework)
  ⇒ Automatische Überprüfung aller Anforderungen mit Warnung im Fall von nichtbestandenen Tests
- **Kombination mit anderen Analysemethoden**
  ⇒ Subset Simulationen -> Wahrscheinlichkeiten für die Verletzung von Anforderungen
  ⇒ Falsification -> Testdesign





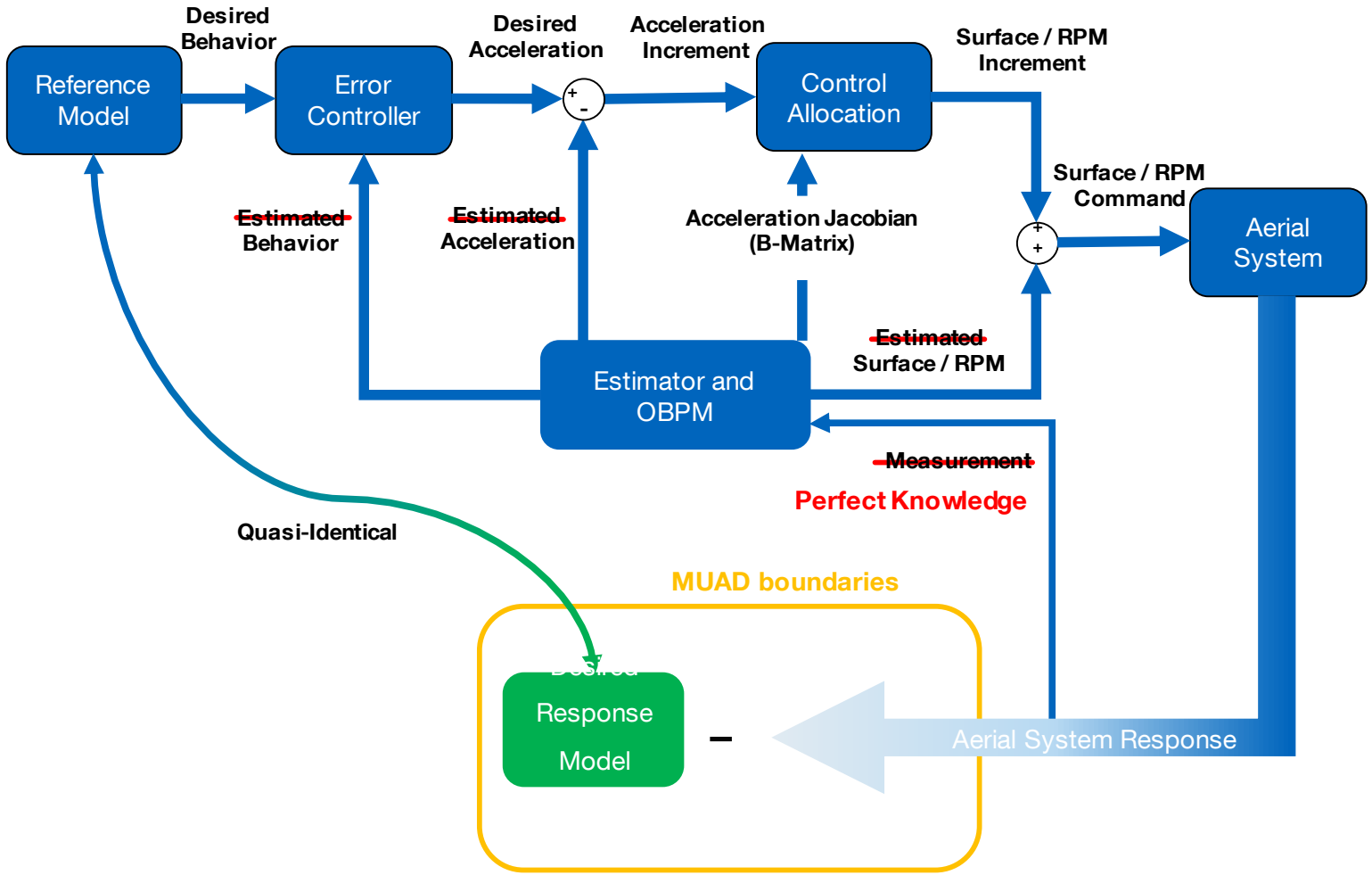
- **Validierung** von Anforderungen

Reglerarchitektur und Philosophie des Incremental Nonlinear Dynamic Inversion Reglers

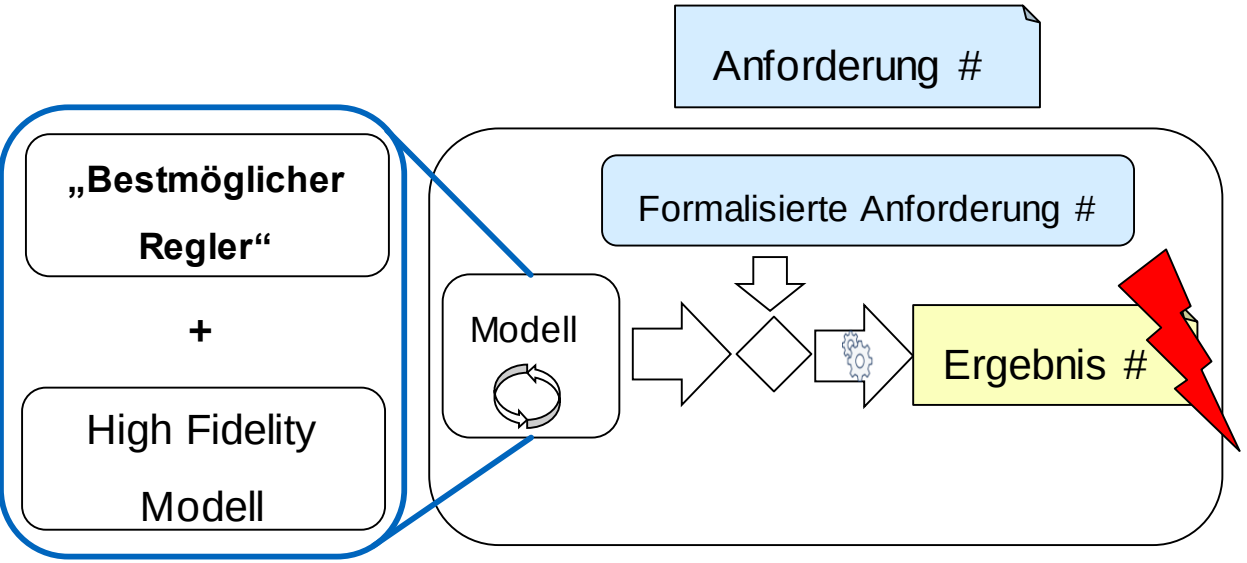


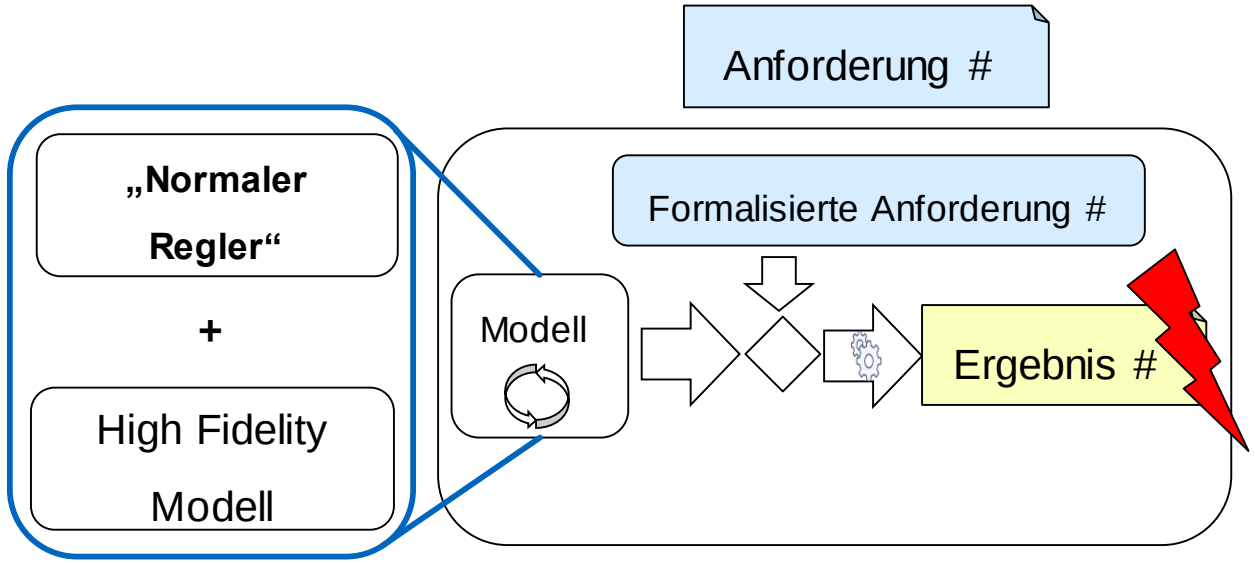
5. Prozess – Beispiel Reglerentwicklung idealer INDI

“Bestmöglicher” Regler nutzt ganzes Wissen über den Systemzustand (keine Sensoren und keine Daten Fusion)



5. Prozess – Reglerentwicklung





Bestmöglicher Regler kann die Anforderung nicht erfüllen

Anforderung nicht gültig für das eVTOL?
„Validierungssicht“

⇒ **Anforderung** überprüfen

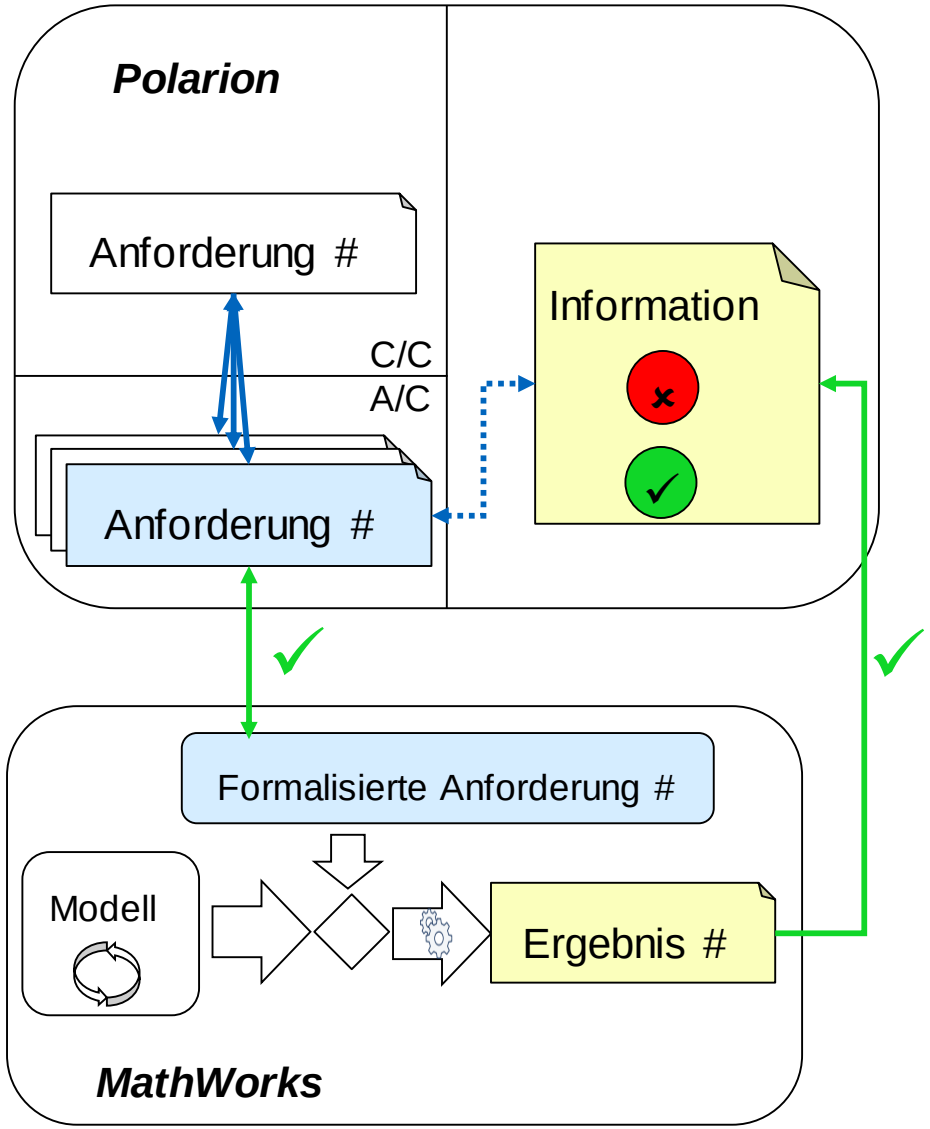
Der normale Regler kann die Anforderung nicht erfüllen

Anforderung mit aktuellem Reglerentwurf nicht erfüllbar?
„Verifikationssicht“

⇒ Anpassung des **Reglers/FCS** erforderlich

6. Zusammenfassung

- Anforderungsmanagement und Nachverfolgbarkeit
  - ✓ Traceability „Anforderung-Testergebnis“
  - ✓ Versionskontrolle
  - ✓ Warnung bei Änderungen
  - ✓ Dokumentation
- Modellbasierte Anforderungsevaluierung
  - ✓ Nutzung der Entwicklungsmodelle
  - ✓ Mögliche Aussagen über Validität der Anforderungen
  - ✓ Iterative Absicherung der Anforderungen
  - ✓ Verbindung zu anderen Analysemethoden



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!