

Einsatz der Modellierung und Simulation in Motorregelung

Prof. Dr.-Ing. **Victor Gheorghiu**

Fachbereich Maschinenbau und Produktion

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

[Return](#)

Anforderungen an Motor und Fahrzeug und Maßnahmen zu deren Erfüllung

Anforderungen an Motor und Fahrzeug	Motorische Maßnahmen	Außermotorische Maßnahmen
<ul style="list-style-type: none">• Reduzierung der Emissionen• Erhöhung der Effektivität• Verbesserung des Ansprechverhaltens• Senkung des Kaufpreises• Erhöhung der Lebensdauer ...	<ul style="list-style-type: none">• Optimierung der inneren Prozesse<ul style="list-style-type: none">– Gemischbildung– Verbrennung ...• Optimierung der Regelung• Optimierung der Konstruktion der Bauteile u. Systeme• Neue Konzepte (GDI, CR, EGR, VTG, VVT...)	<ul style="list-style-type: none">• Reduzierung der Fahrzeugmasse• Verbesserung der Aerodynamik• Synchronisieren der Ampel in den Städten• Begrenzung der Geschwindigkeit auf Autobahnen ...

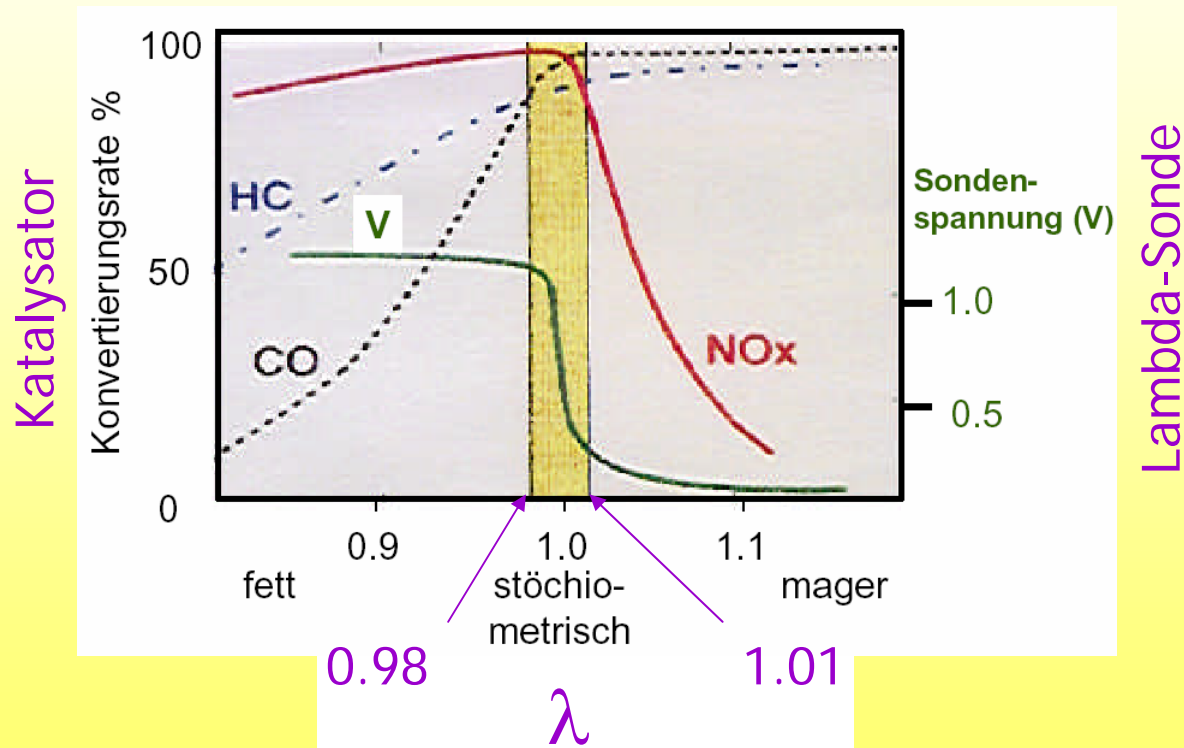
Anforderungen an Motor und Fahrzeug und Maßnahmen zu deren Erfüllung

Anforderungen an Motor und Fahrzeug	Motorische Maßnahmen	Außermotorische Maßnahmen
<ul style="list-style-type: none"> • Reduzierung der Emissionen • Erhöhung der Effektivität • Verbesserung des Ansprechverhaltens • Senkung des Kaufpreises • Erhöhung der Lebensdauer ... 	<ul style="list-style-type: none"> • Optimierung der inneren Prozesse <ul style="list-style-type: none"> – Gemischbildung – Verbrennung ... • Optimierung der Regelung • Optimierung der Konstruktion der Bauteile u. Systeme • Neue Konzepte (GDI, CR, EGR, VTG, VVT...) 	<ul style="list-style-type: none"> • Reduzierung der Fahrzeugmasse • Verbesserung der Aerodynamik • Synchronisieren der Ampel in den Städten • Begrenzung der Geschwindigkeit auf Autobahnen ...

Problematik des klassischen Ottomotors:

(d.h. mit Saugrohreinspritzung und **homogene** Gemischbildung)

Einhaltung des Lambda-Fensters



Katalysator

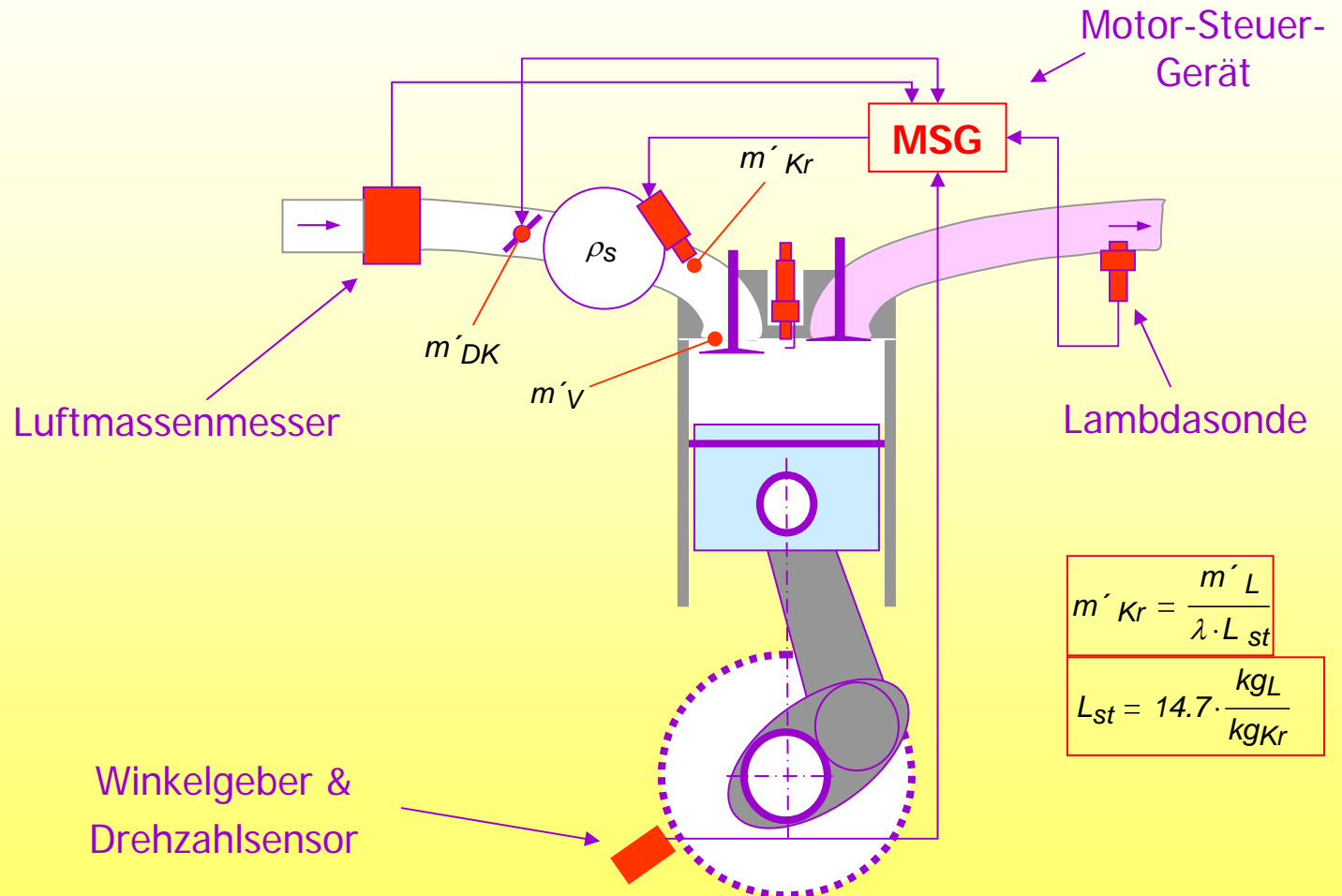
Lambda-Sonde

[Return](#)

Luftverhältnis

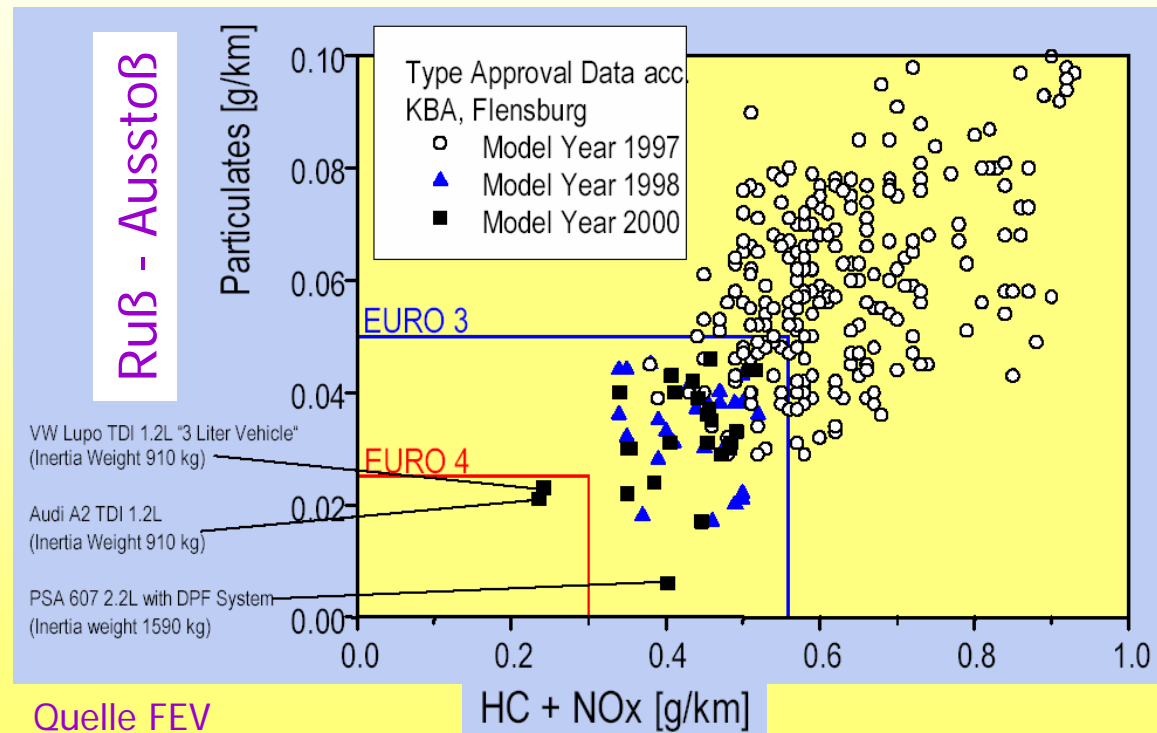
$\lambda=1 \rightarrow 14.7 \text{ kg Luft / kg Kr.}$

Problematik des klassischen Ottomotors: Einhaltung des Lambda-Fensters



Problematik des klassischen Dieselmotors: (d.h. mit Direkteinspritzung und inhomogene Gemischbildung)

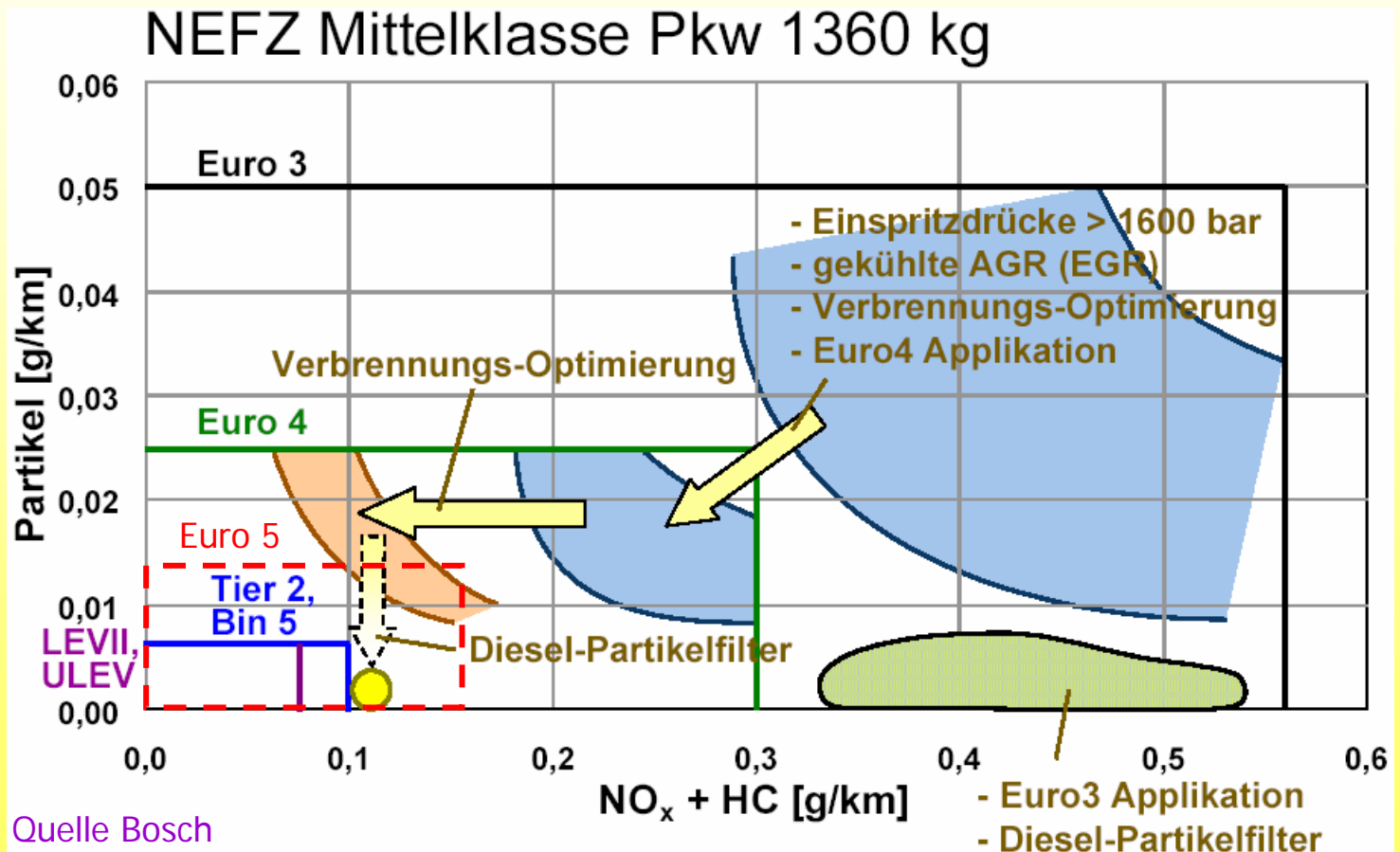
Gleichzeitige Einhaltung der Ruß- und NO_x-Grenzwerte ohne große Verbrauchseinbuße



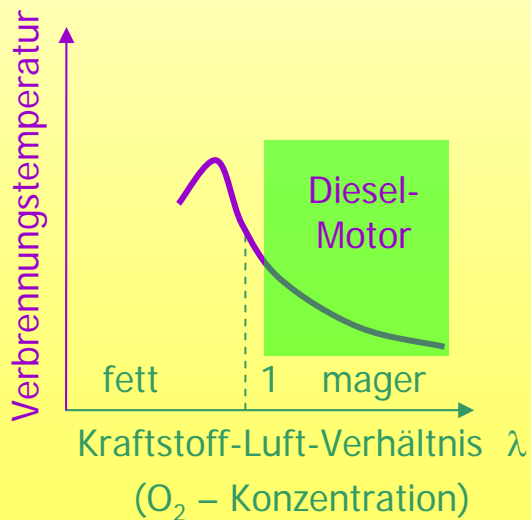
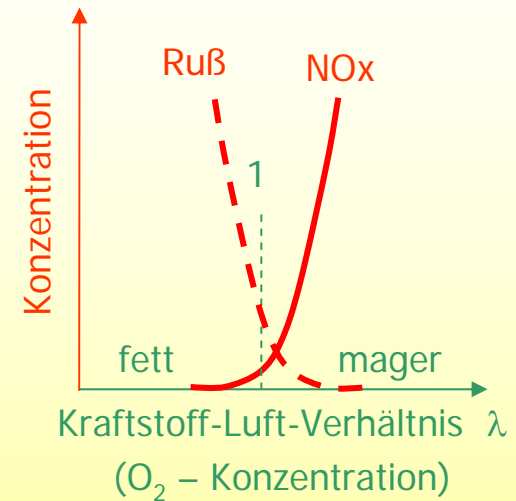
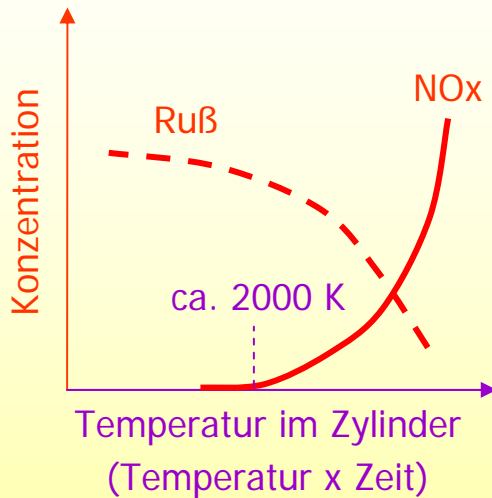
Unverbrannte Kohlenwasserstoffe (HC)
und Stickoxide (NO_x)

Maßnahmen zum Erreichen der Grenzwerte von EURO 5

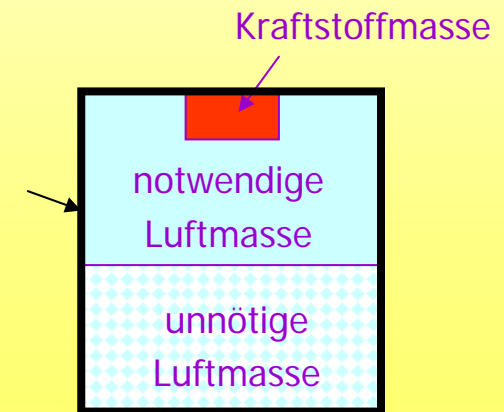
Anforderungen: Gleichzeitige Einhaltung der Ruß- und NO_x-Grenzwerte ohne große Verbrauchseinbuße



Zusammenhänge zwischen Emissionen und Zustandsgrößen vom Zylinder

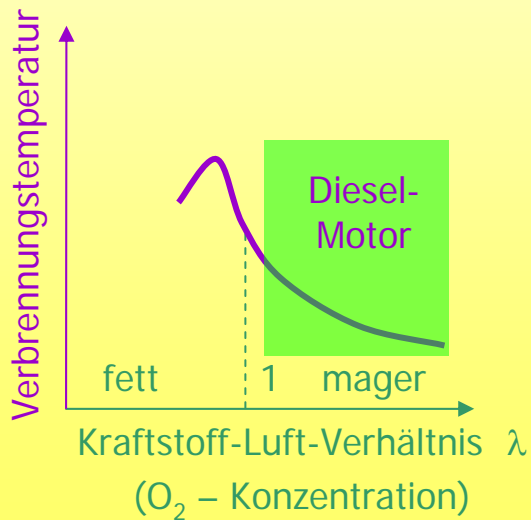
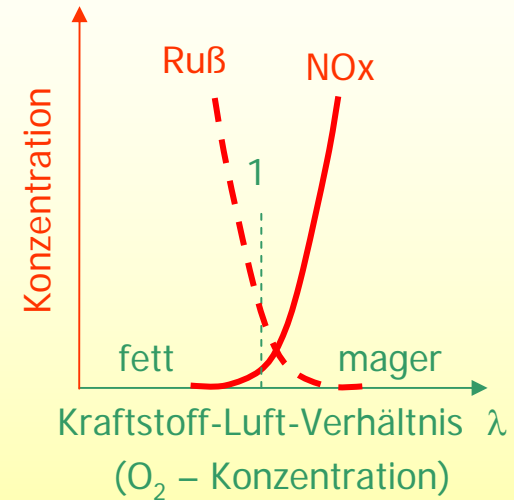
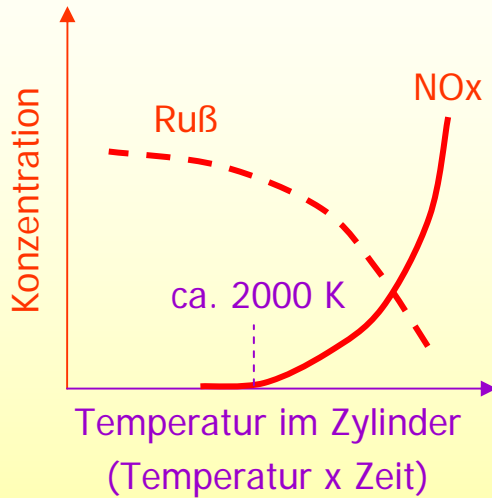


Hubvolumen eines Dieselmotors **ohne** Abgasrückführung (d.h. **ohne** AGR)

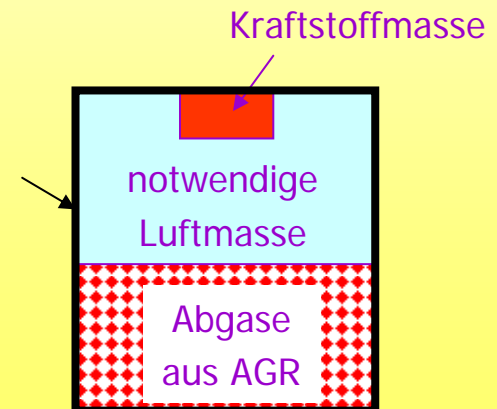


Zu viel unnötiger O₂ !!!

Zusammenhänge zwischen Emissionen und Zustandsgrößen vom Zylinder

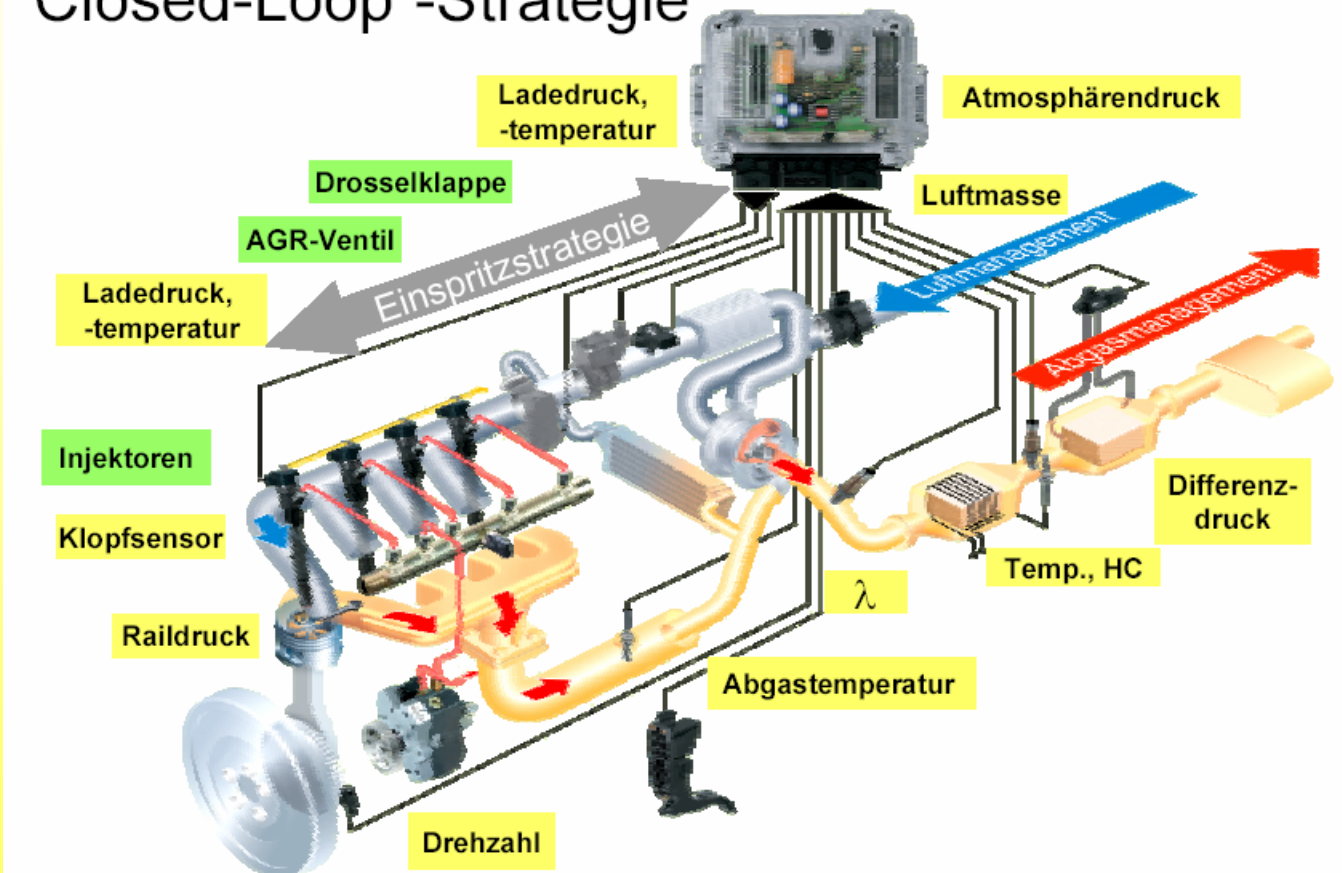


Hubvolumen eines Dieselmotors mit Abgasrückführung (d.h. mit AGR)



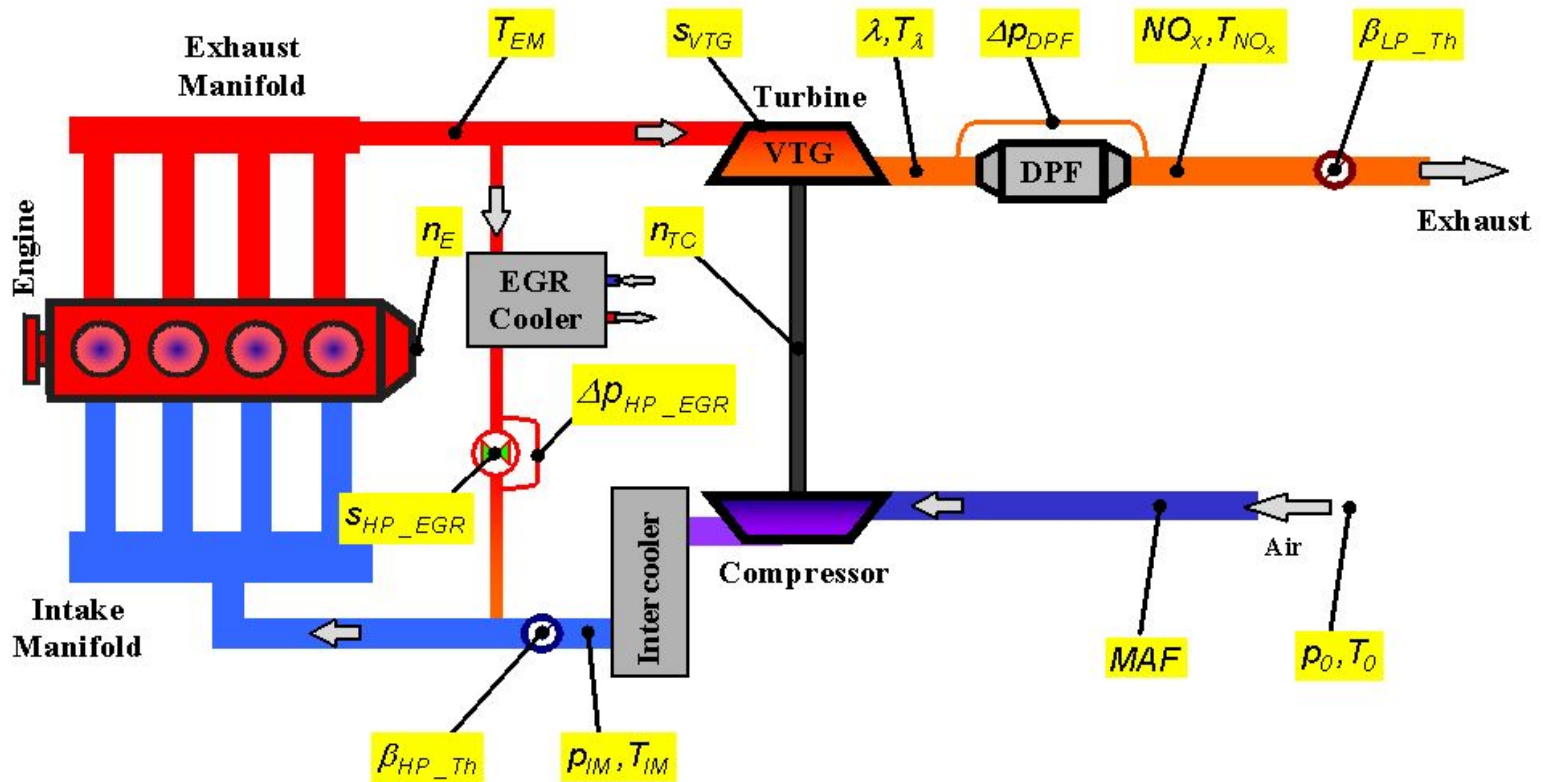
Schema eines modernen Dieselmotors mit Turboaufladung, gekühlter Hochdruck-AGR und Common-Rail-Einspritzsystem

“Closed-Loop“-Strategie



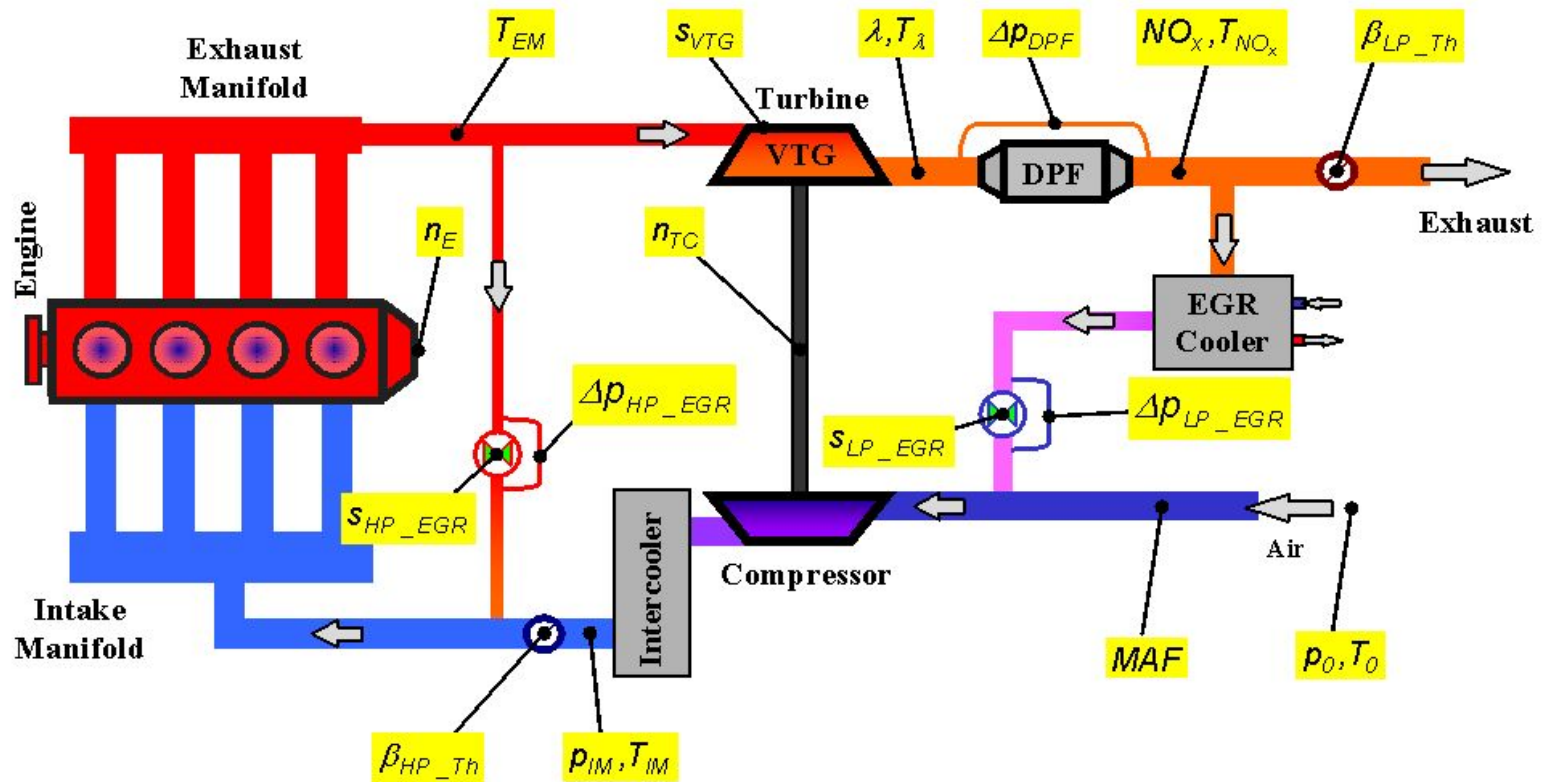
Aufgeladener Dieselmotor mit Ladeluftkühler und gekühlter Hochdruck AGR (HP_EGR) / Prinzip- und Sensorschema

Nachteil: Die zurückgeführten Abgase bleiben nach der Kühlung immer noch zu warm!



Aufgeladener Dieselmotor mit Ladeluftkühler, ungekühlter Hochdruck AGR und gekühlter Niederdruck AGR (LP_EGR) / Prinzip- und Sensorschema

Vorteil: Bessere Abkühlung für die AGR!



Entwicklungsziel:

- Testen des Potenzials einer solchen Konfiguration

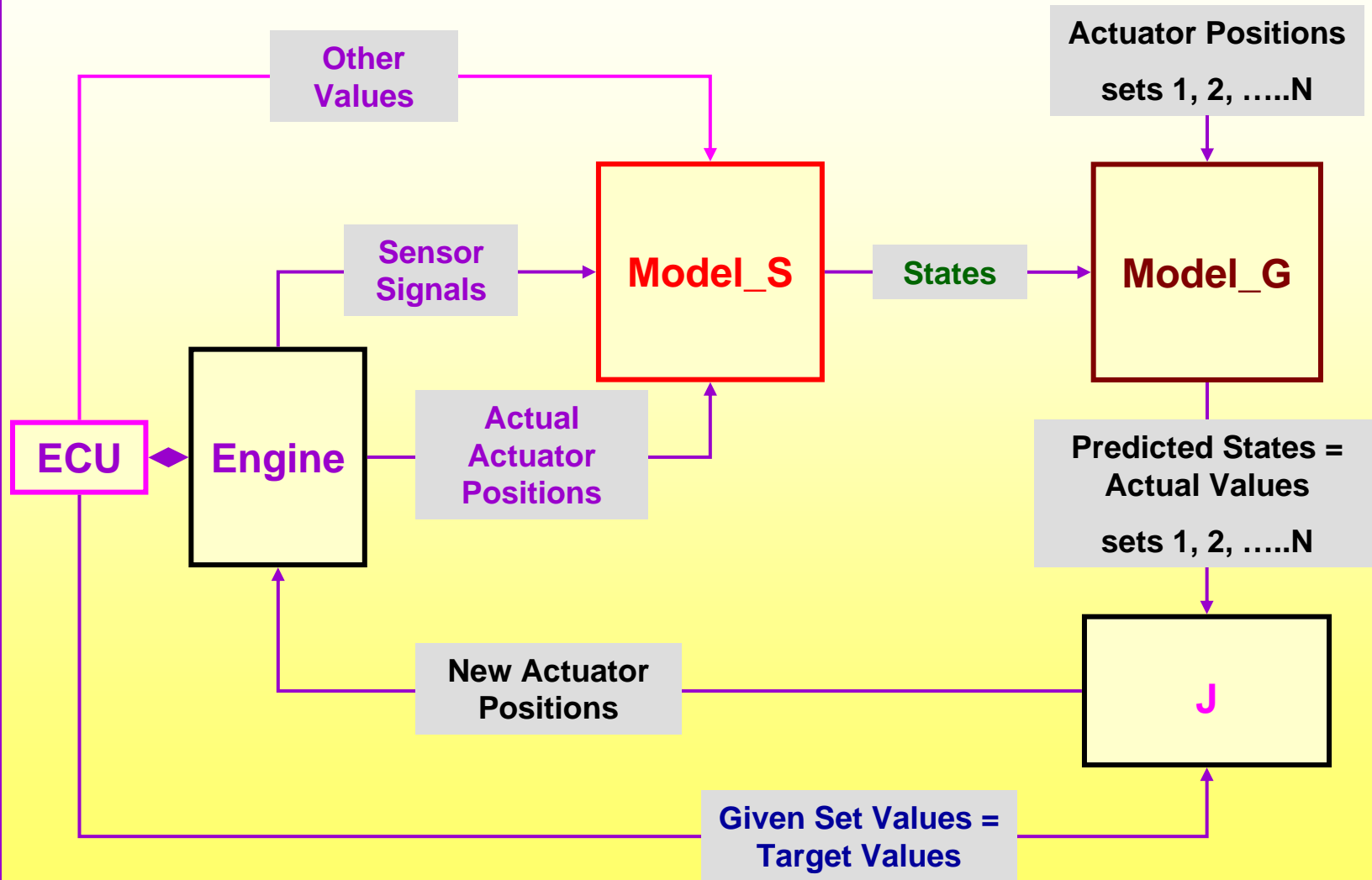
Durchführungsart:

- Kombination von **a)** Modellierung und Simulation und **b)** Motorversuchen zur Validierung und Kalibrierung der Modelle und des neuen Reglers

Implementierung:

1. Ein Serienmotor mit HP_EGR und Serien-MSG wurde entsprechend (wie vorher gezeigt) modifiziert.
2. Das **MSG (ECU)** sollte weiterhin viele seiner vorhandenen Funktionen ausüben, andernfalls würde der Aufwand viel zu groß alle diese neu zu programmieren.
3. Die Regelung der AGR-Rate, des Ladedruckes und des angesaugten Luftmassenstroms musste aber durch **Bypassung des MSG** separat erfolgen.

Schema der Implementierung des modellgestützten Prädiktivreglers im „Rapid Prototyping“ - Verfahren

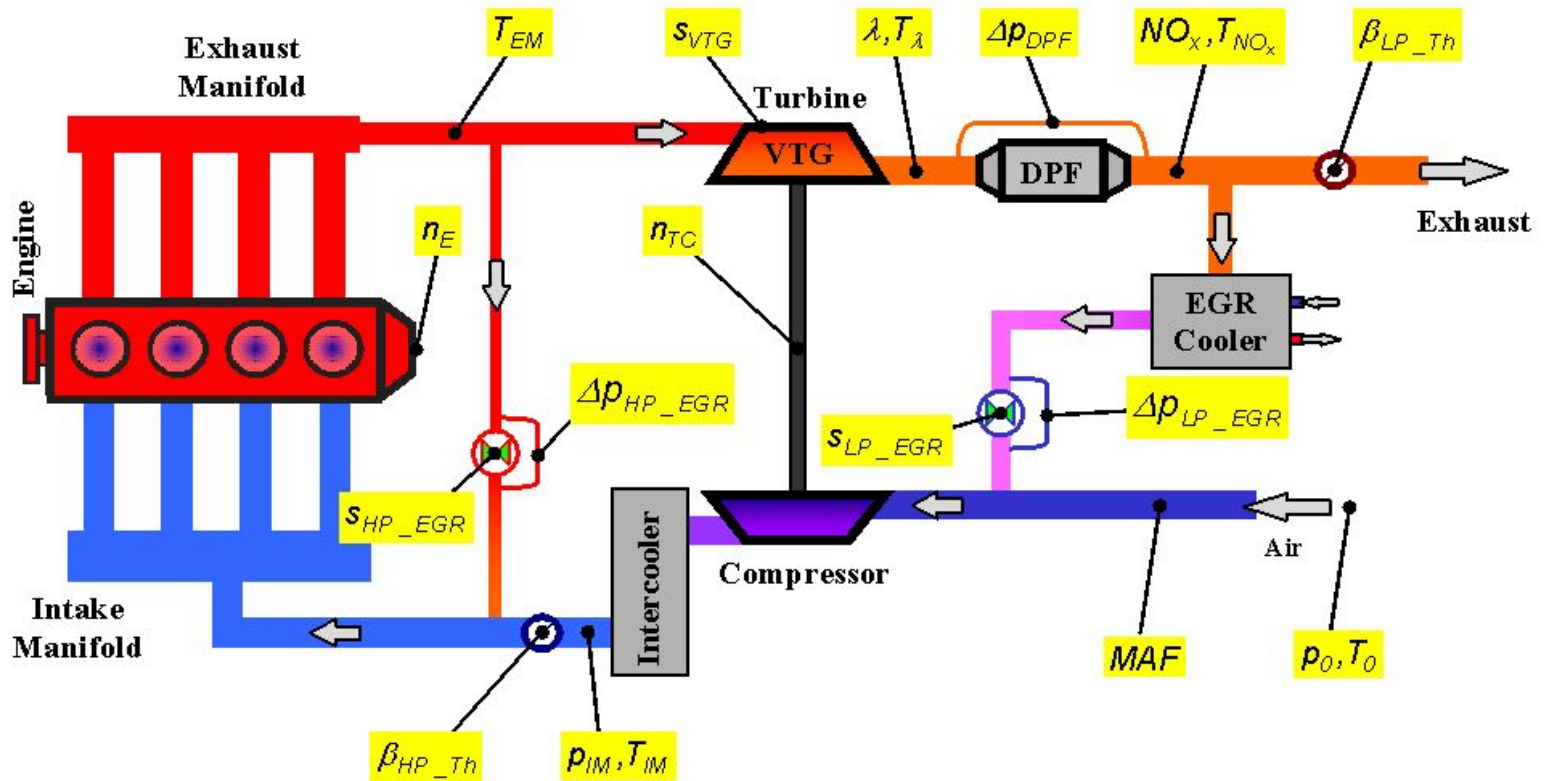


Implementierung (Fortsetzung 1):

4. Zunächst wurde ein physikalisches Modell des Motors in der neuen Konfiguration erstellt.
5. Das Motormodell (**Model_E**) sollte im Simulink erstellt werden, um später ohne großen Aufwand in der Echtzeitregelung implementiert werden zu können.
6. Das **Model_E** sollte anhand von relativ wenigen Prüfstandsmessungen kalibriert und validiert werden können (d.h. es muss **physikalisch** und nicht empirisch sein).
7. Das **Model_E** sollte ohne großen Aufwand an anderen Hardware-Konfigurationen (z.B. zweistufige Aufladung) angepasst werden können (d.h. es muss **physikalisch** und nicht empirisch sein).

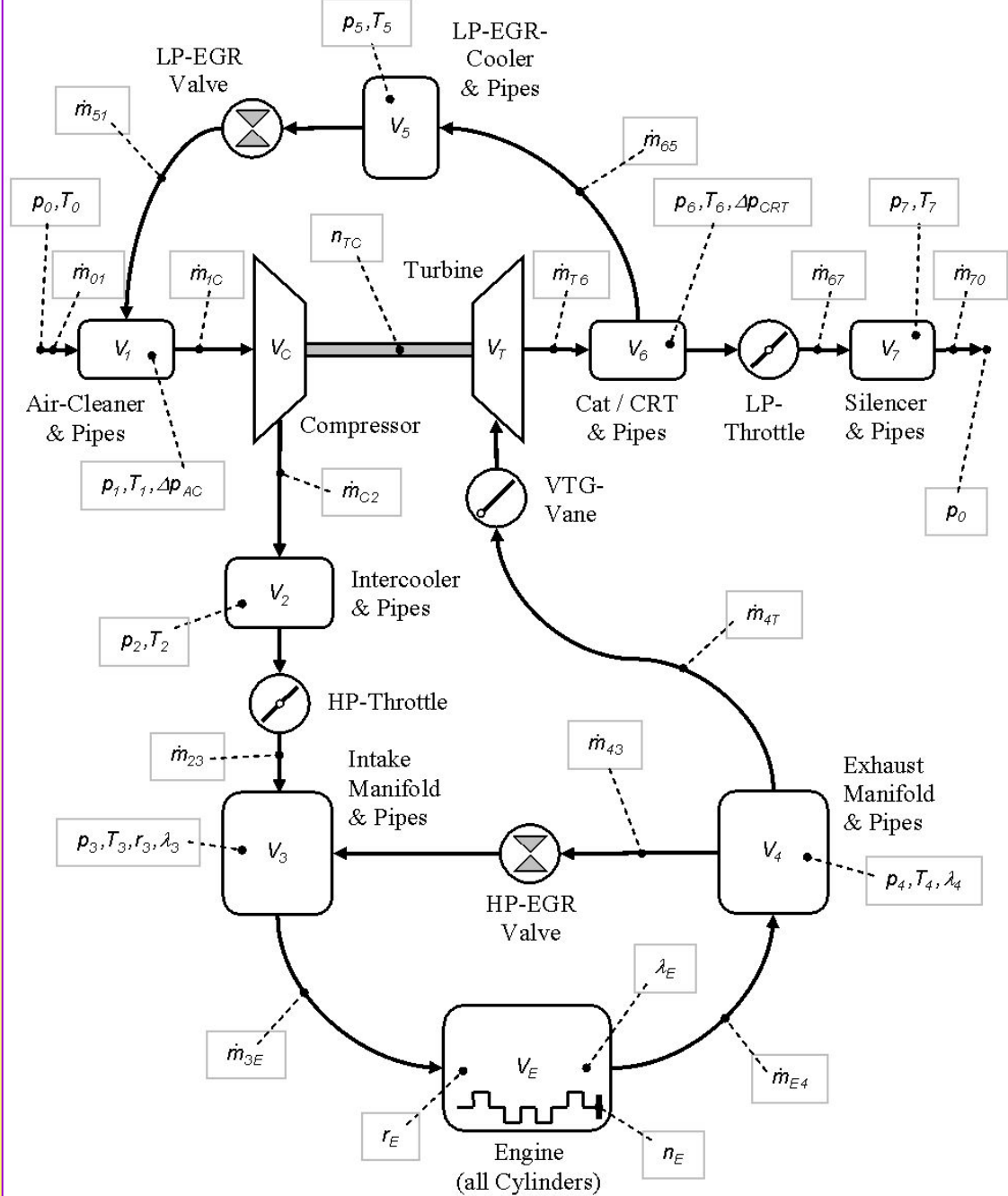
Aufgeladener Dieselmotor mit Ladeluftkühler, ungekühlter Hochdruck AGR und gekühlter Niederdruck AGR (LP_EGR) / Prinzip- und Sensorschema

Vorteil: Bessere Abkühlung für die AGR!



Graphische Darstellung des physikalischen Modells

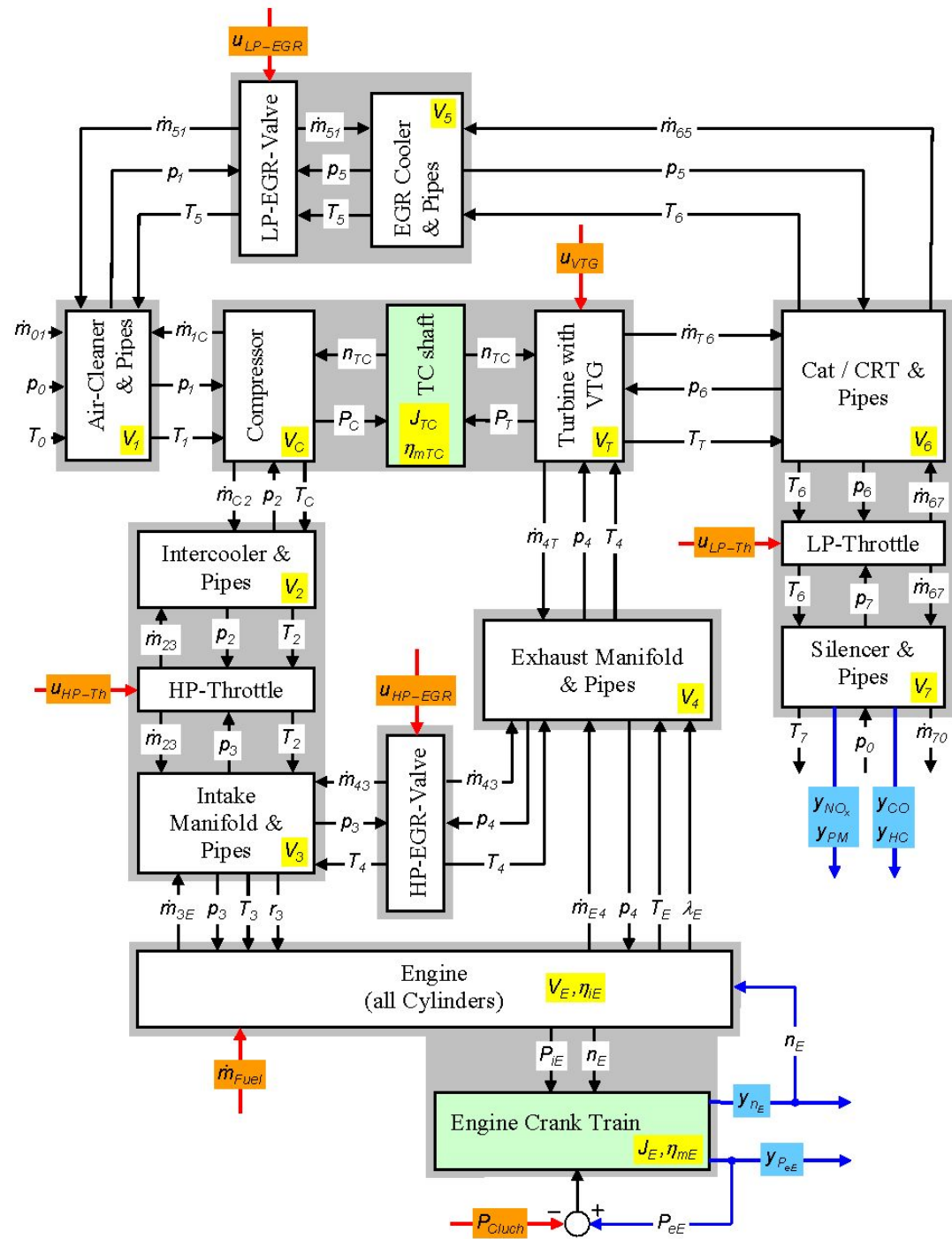
Model_E



Return

Graphische Darstellung des physikalischen Modells

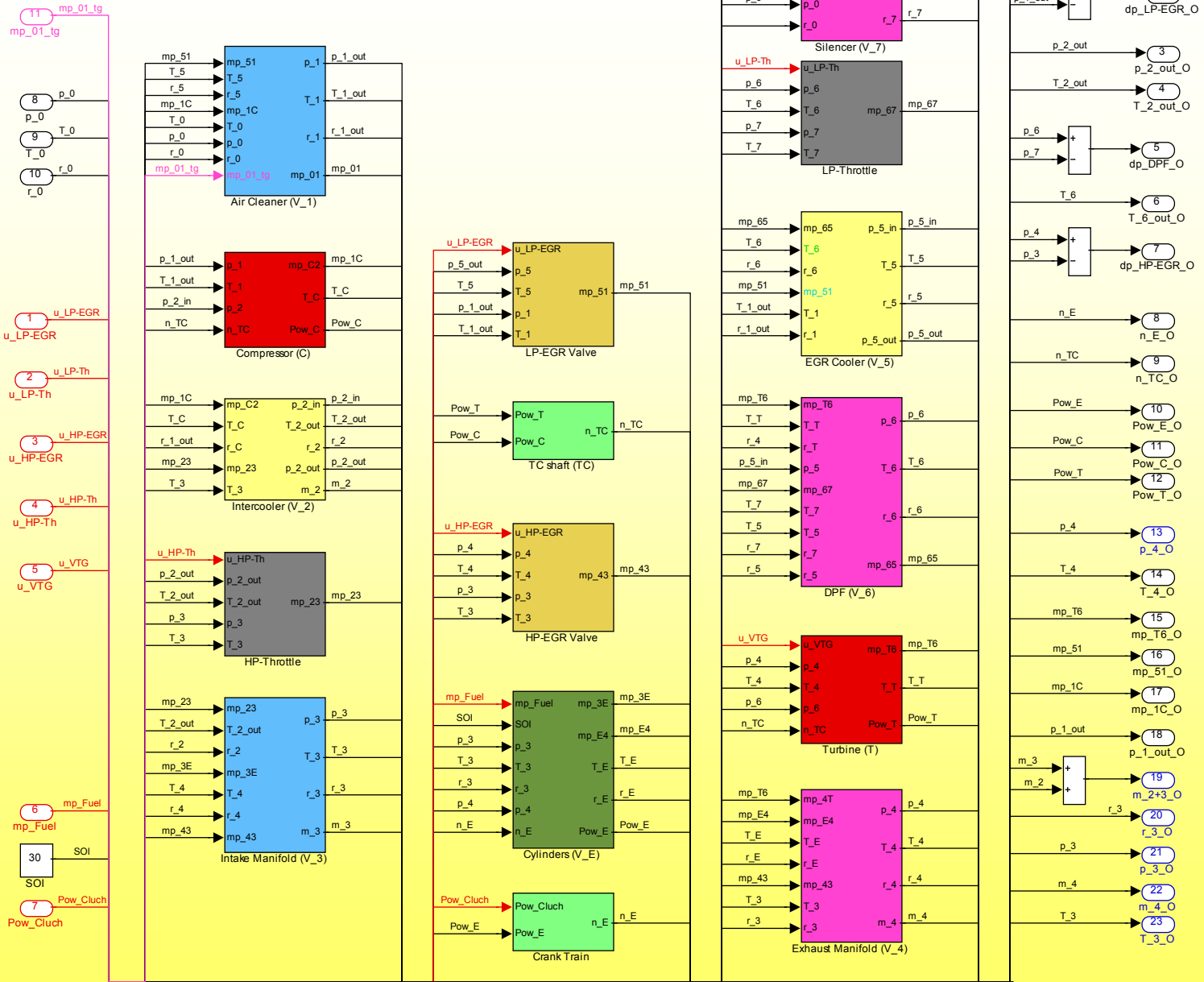
Model_E



Return

Model_E

Simulink - Implementierung



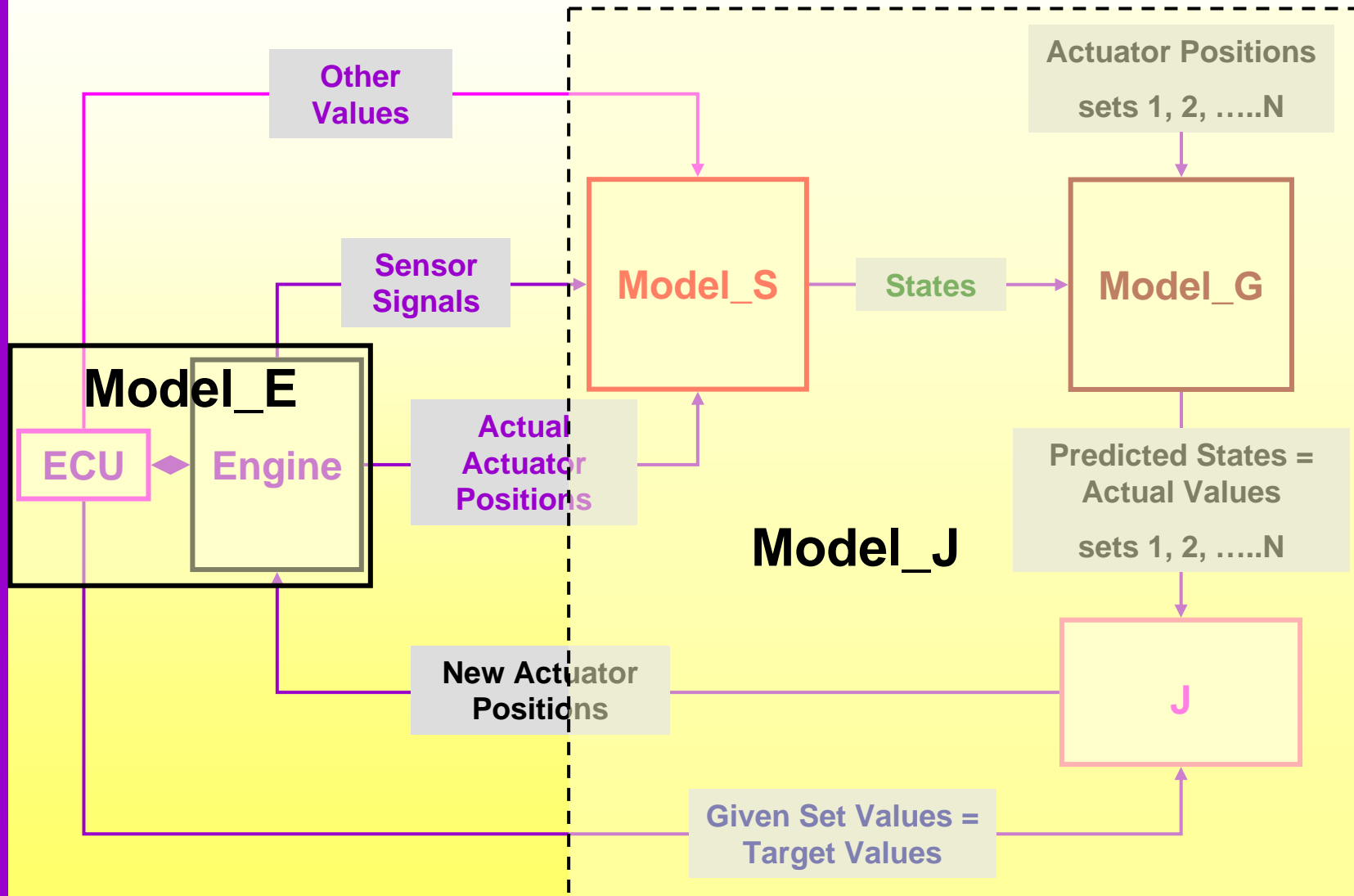
Return

Implementierung (Fortsetzung 2):

8. Das **Model_E** wird später bei Entwicklung des Reglers den realen Motor ersetzen (simulieren), so dass die Entwicklung des Regelalgorithmus in eine so genannte **Software-in-the-Loop Umgebung** durchgeführt wird. Somit könnten die sehr aufwändigen Prüfstandstesten minimiert werden.

Software-in-the-Loop Umgebung zur Entwicklung des modellgestützten Prädiktivreglers Model_J

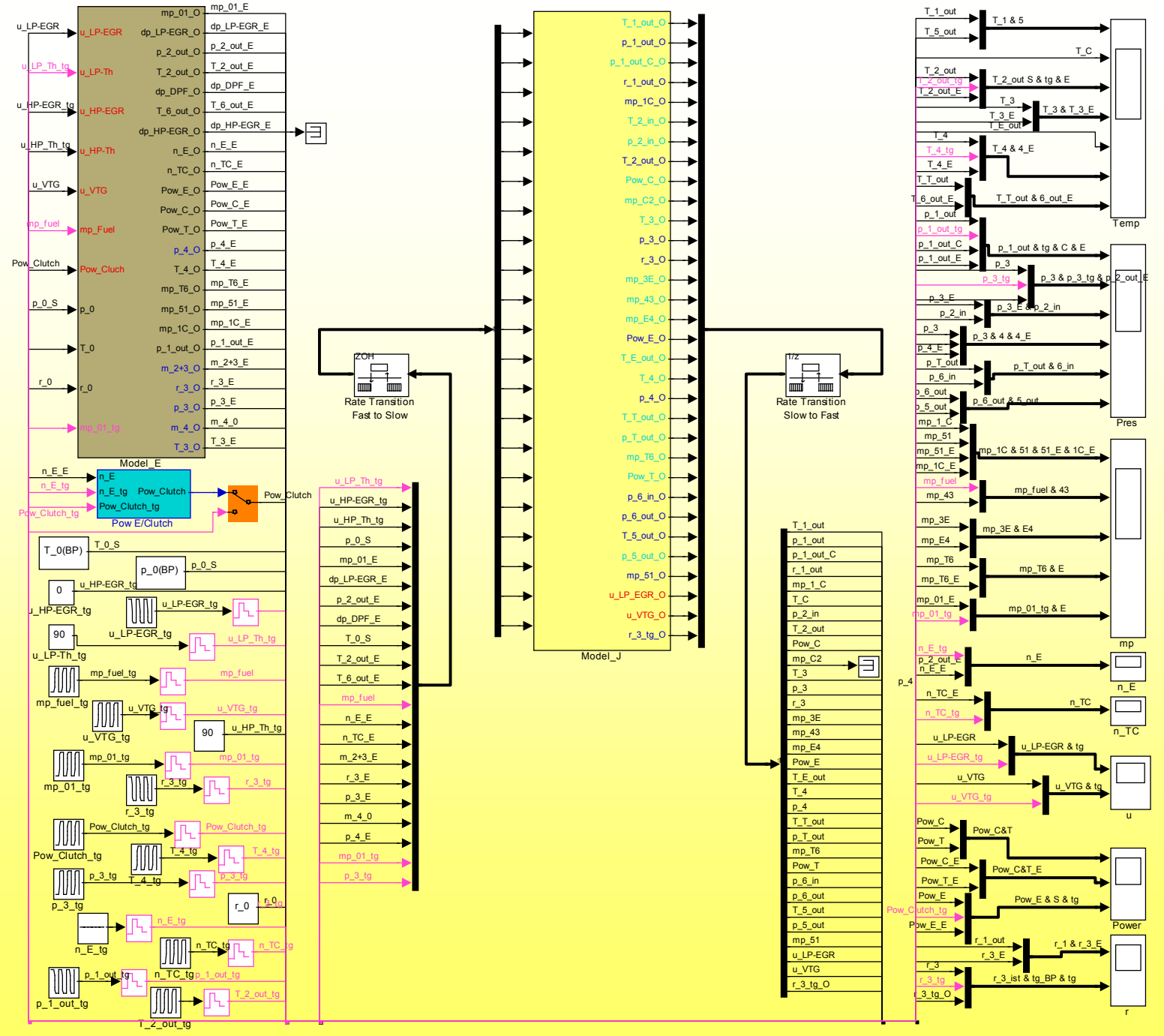
Software-in-the-Loop Umgebung



Return

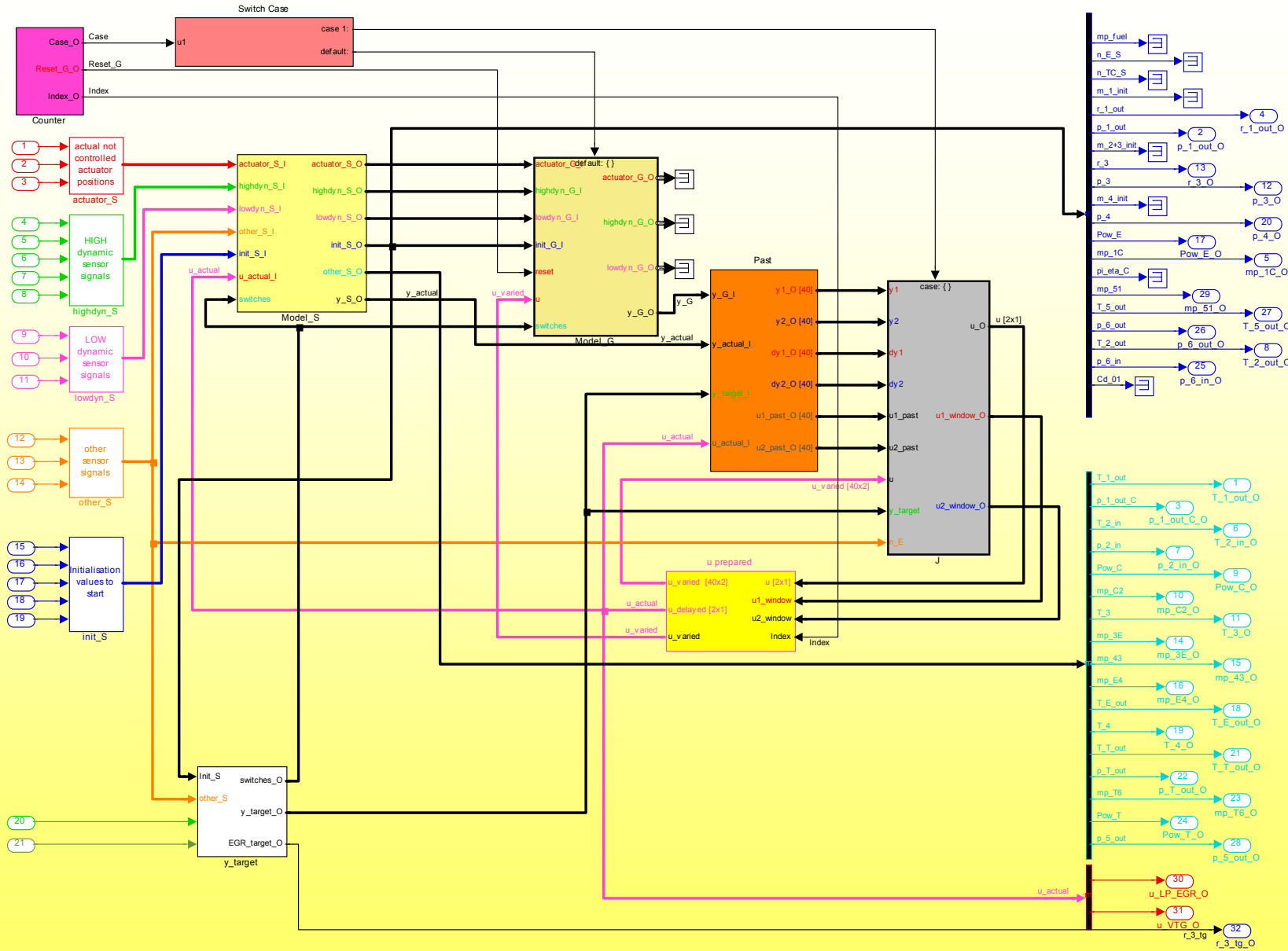
Simulink – Implementierung der Software-in-the-Loop Umgebung

Return



Modellgestützter Prädiktivregler Model_J

Model_J



Return

Implementierung (Fortsetzung 3):

9. Konzepte für den **Regler** wurden entwickelt.

Hinweis: Das Problem ist hier, dass die Regelgrößen Ladedruck, AGR-Rate und Luftmassenstrom voneinander abhängig sind, so dass eine getrennte Regelung dieser Größen keine Chance zu funktionieren hat.

10. Es wurde ein **modellgestützter Prädiktivregler** gewählt, obwohl für solche kleine Abtastrate (1 ms) solche Regler bisher noch nicht eingesetzt werden konnten.

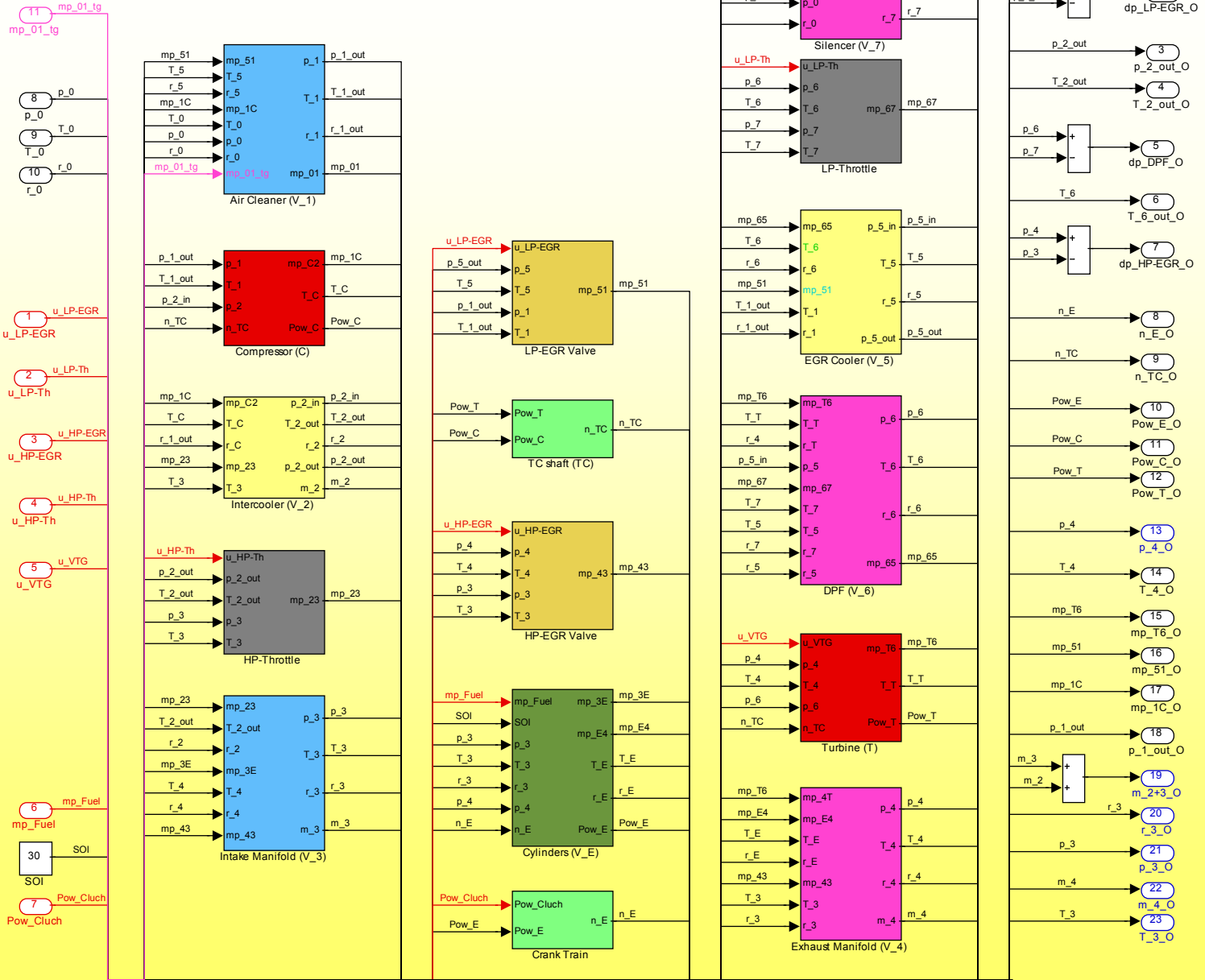
11. Der **modellgestützte Prädiktivregler Model_J** brauchte zuerst ein Modell des Motors. Dazu wurde als Basis das vorher entwickelte **Model_E** genommen.

Implementierung (Fortsetzung 4):

12. Das **Model_E** wurde zu **Model_S** reduziert, in dem alle vorhandenen Sensorsignale des Motors als Informationsquelle eingesetzt wurden.
13. Das reduzierte Modell **Model_S** hält den Schritt mit dem Motor und berechnet **in Echtzeit** (d.h. synchron mit dem realen Motor) alle Ist-Zustände in allen Motor-Submodellen.
14. Somit liefert **Model_S** Drücke, Temperaturen, Massenströme, AGR-Konzentrationen usw. den anderen Modulen von **Model_J** - genauer gesagt zu **Model_G** - weiter, d.h. viel mehr Informationen als von den Sensorsignalen zur Verfügung stehen.
15. Das **Model_G** berechnet die zukünftigen Zustände (Prädiktionen) beginnend immer von den aus **Model_S** stammenden Ist-Zuständen. Das **Model_G** selbst ist auch eine Modellreduktion des **Model_E**.

Model_E 16 Blöcke (0,005 ms)

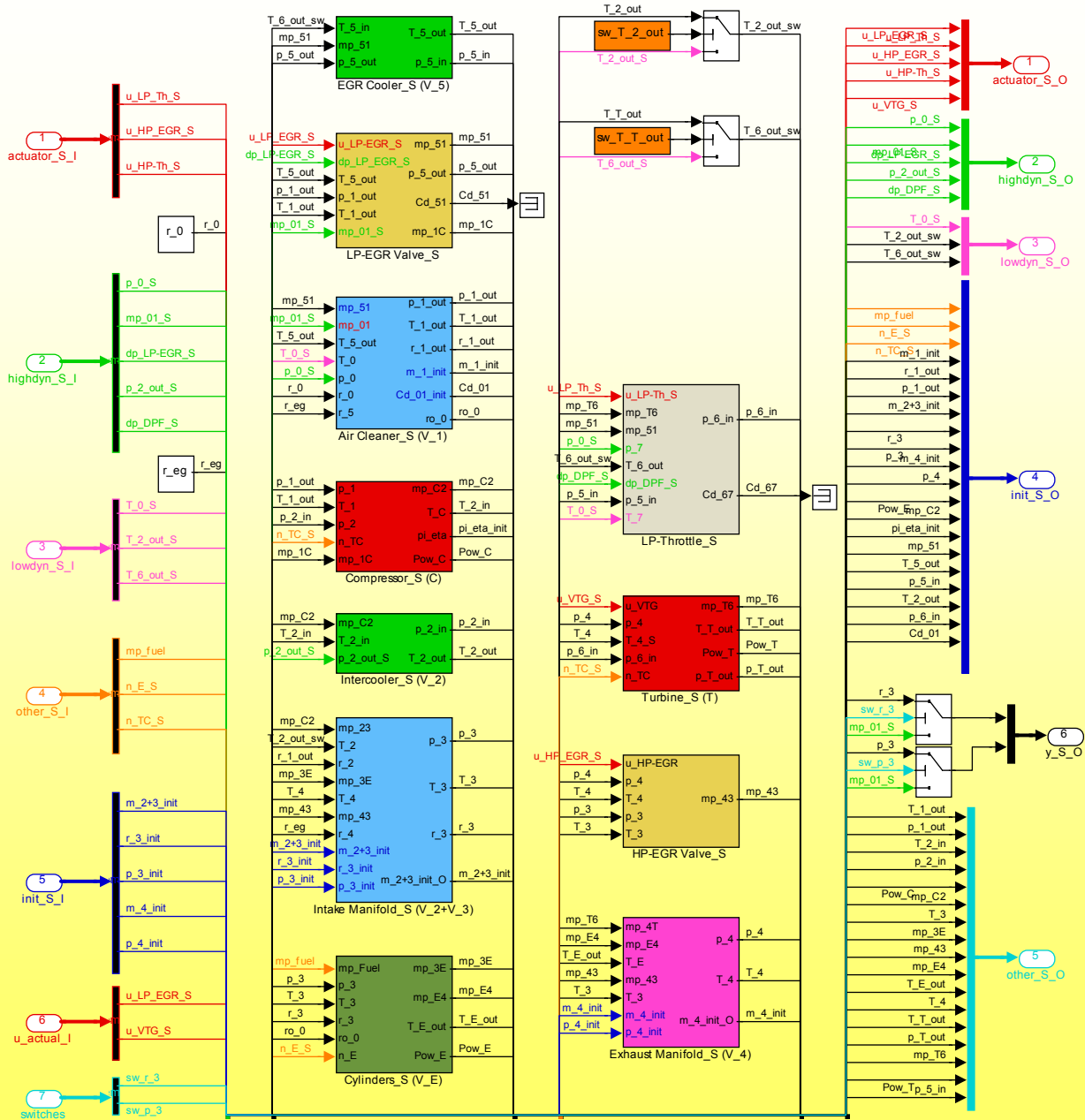
Simulink - Implementierung



Return

Model_S 11 Blöcke statt 16 im Model_E (1 ms)

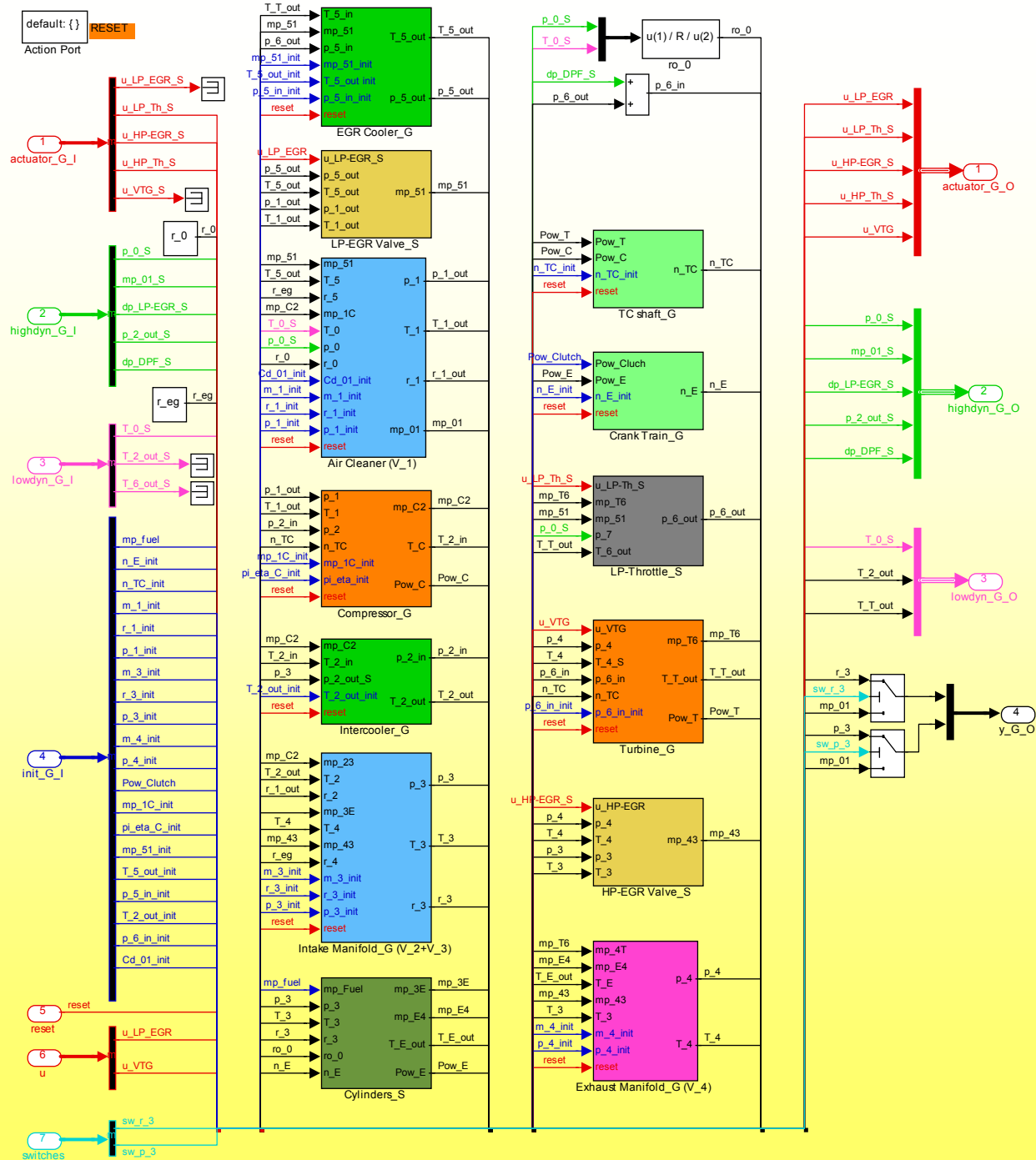
Simulink - Implementierung



Return

Model_G
13 Blöcke
statt 16 im
Model_E
und 11 im
Model_S

(1 ms)

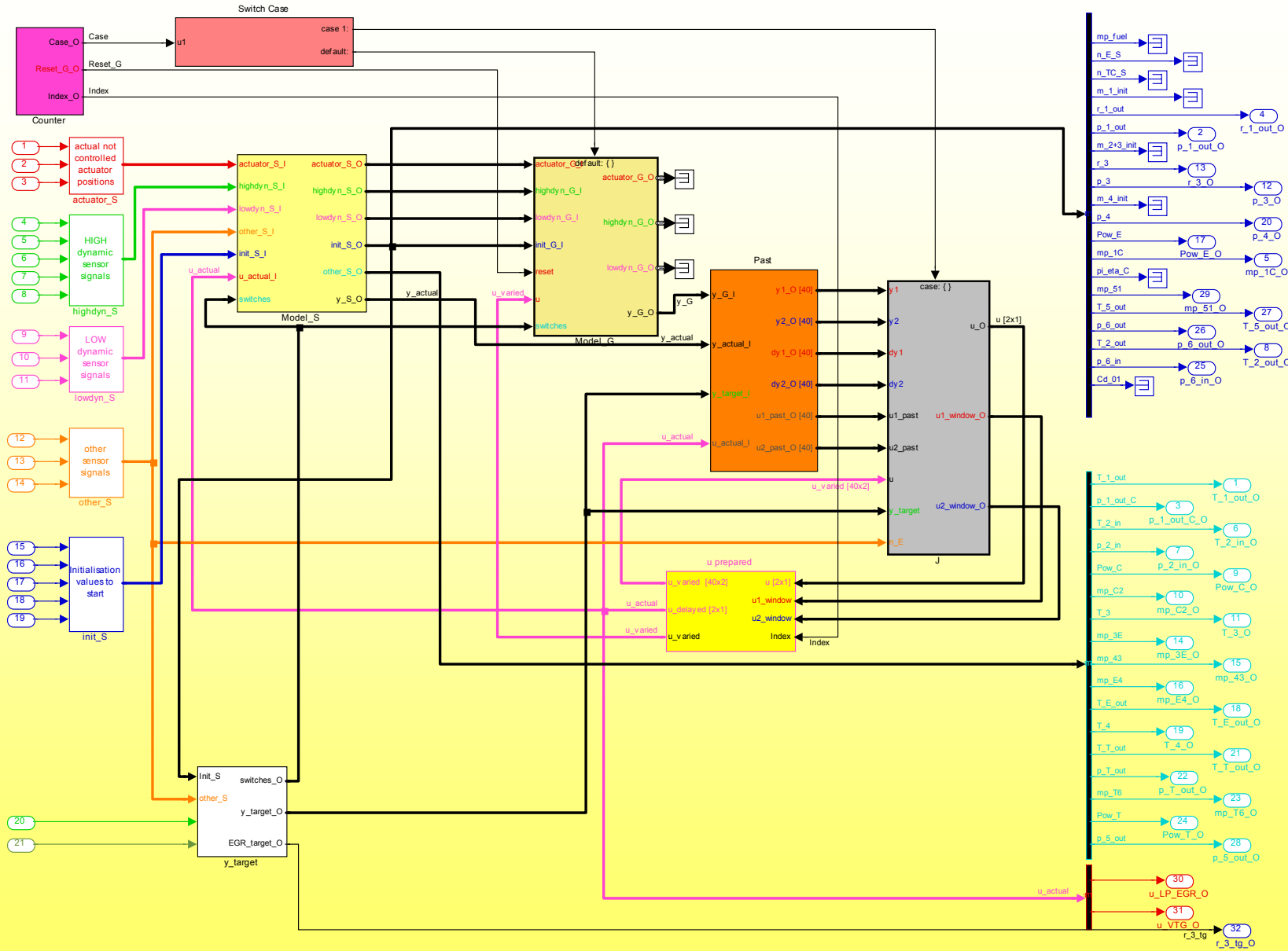


Return

Modellgestützter Prädiktivregler

Model_J

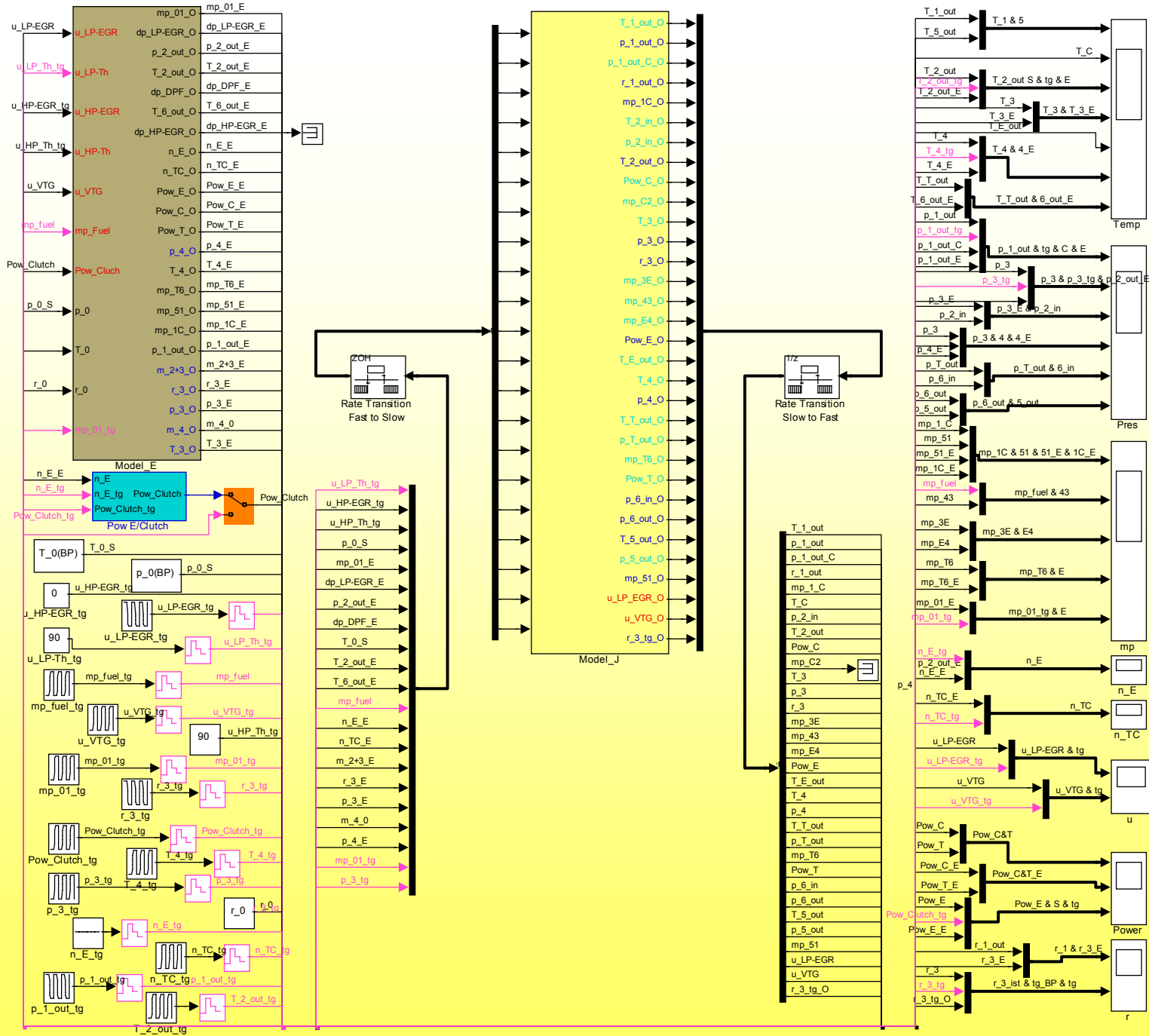
Model_J



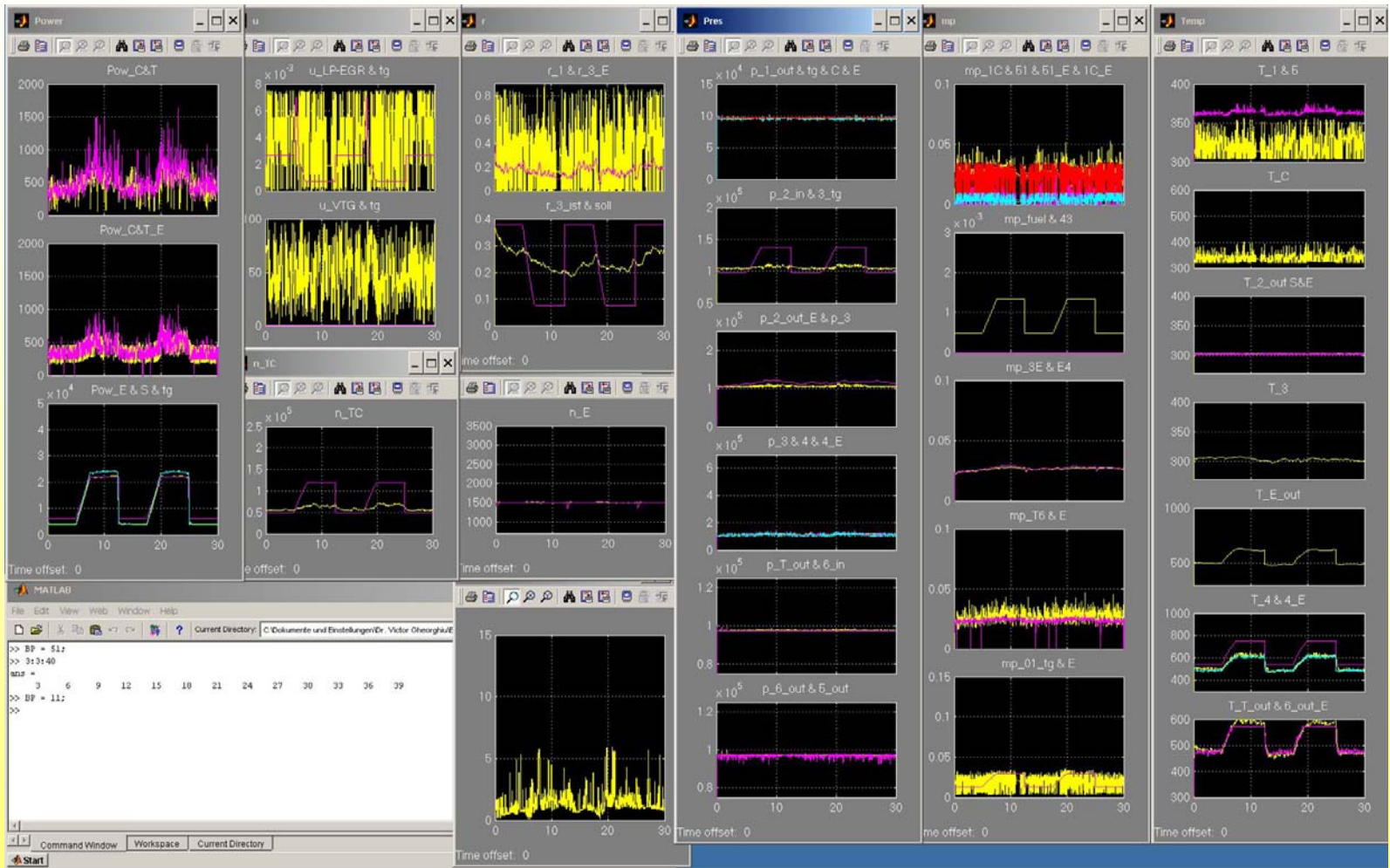
Return

Simulink – Implementierung der Software-in-the-Loop Umgebung

Return

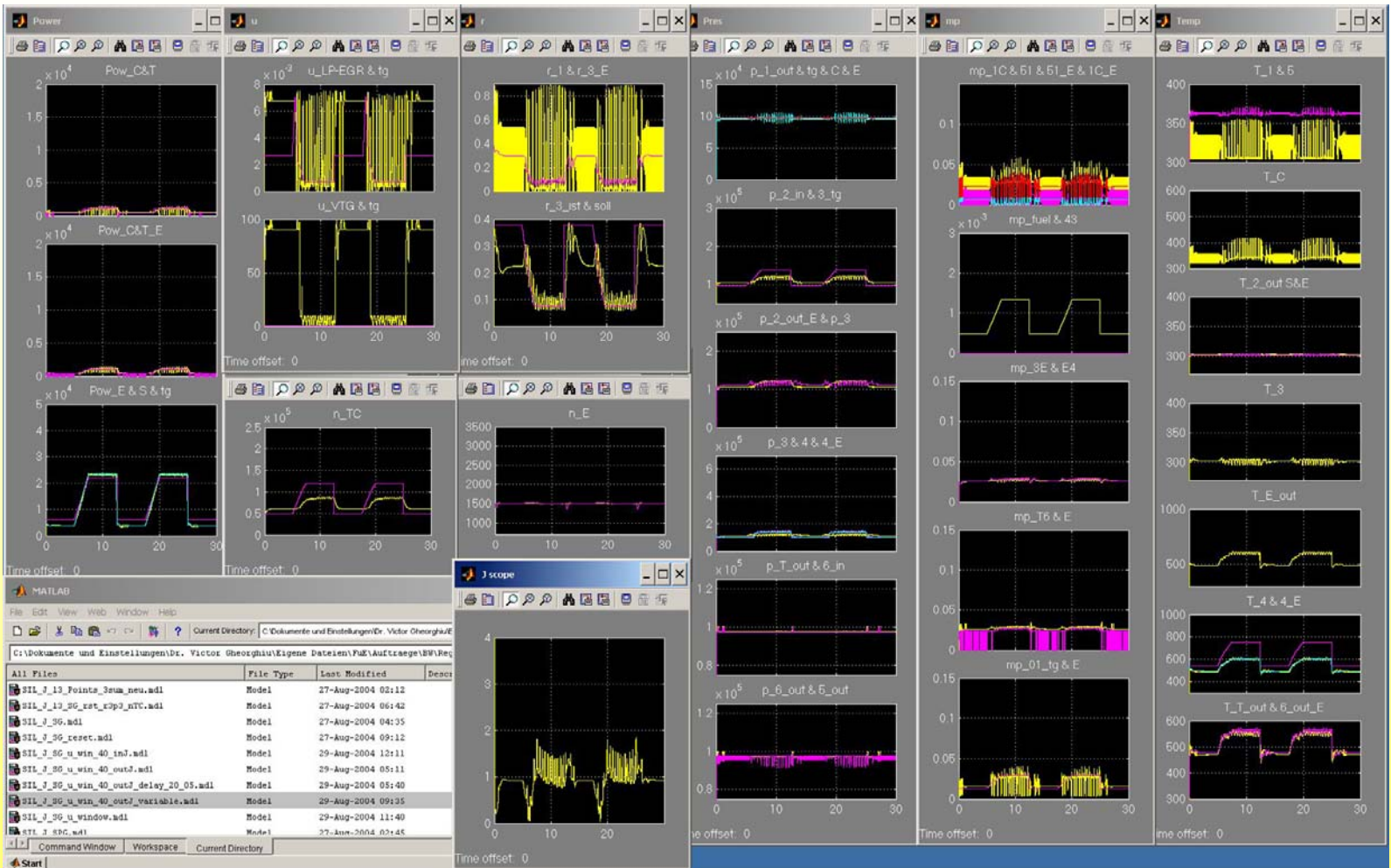


Einige Ergebnisse während der Entwicklung des prädiaktiven Reglers



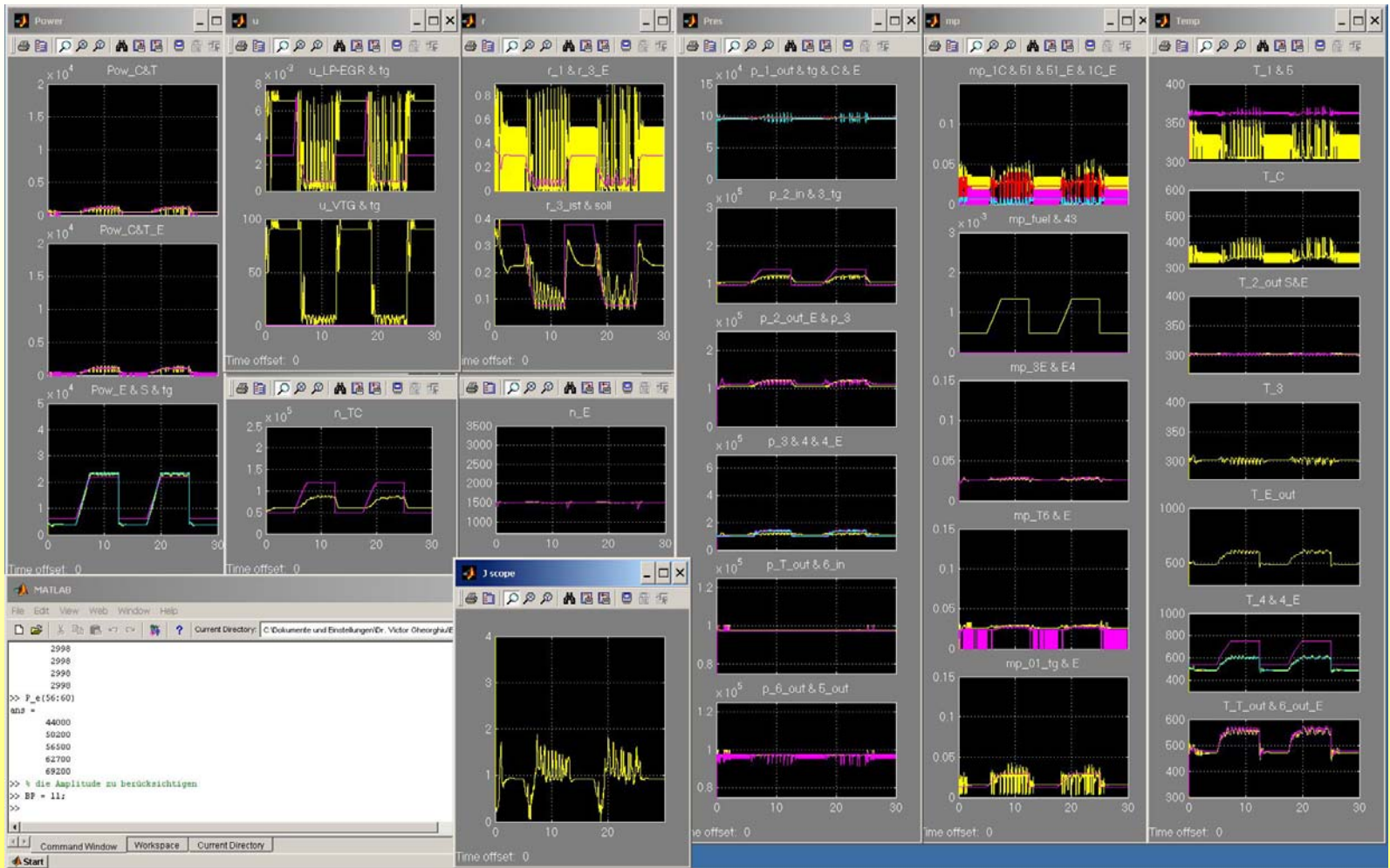
Return

Einige Ergebnisse während der Entwicklung des prädiaktiven Reglers



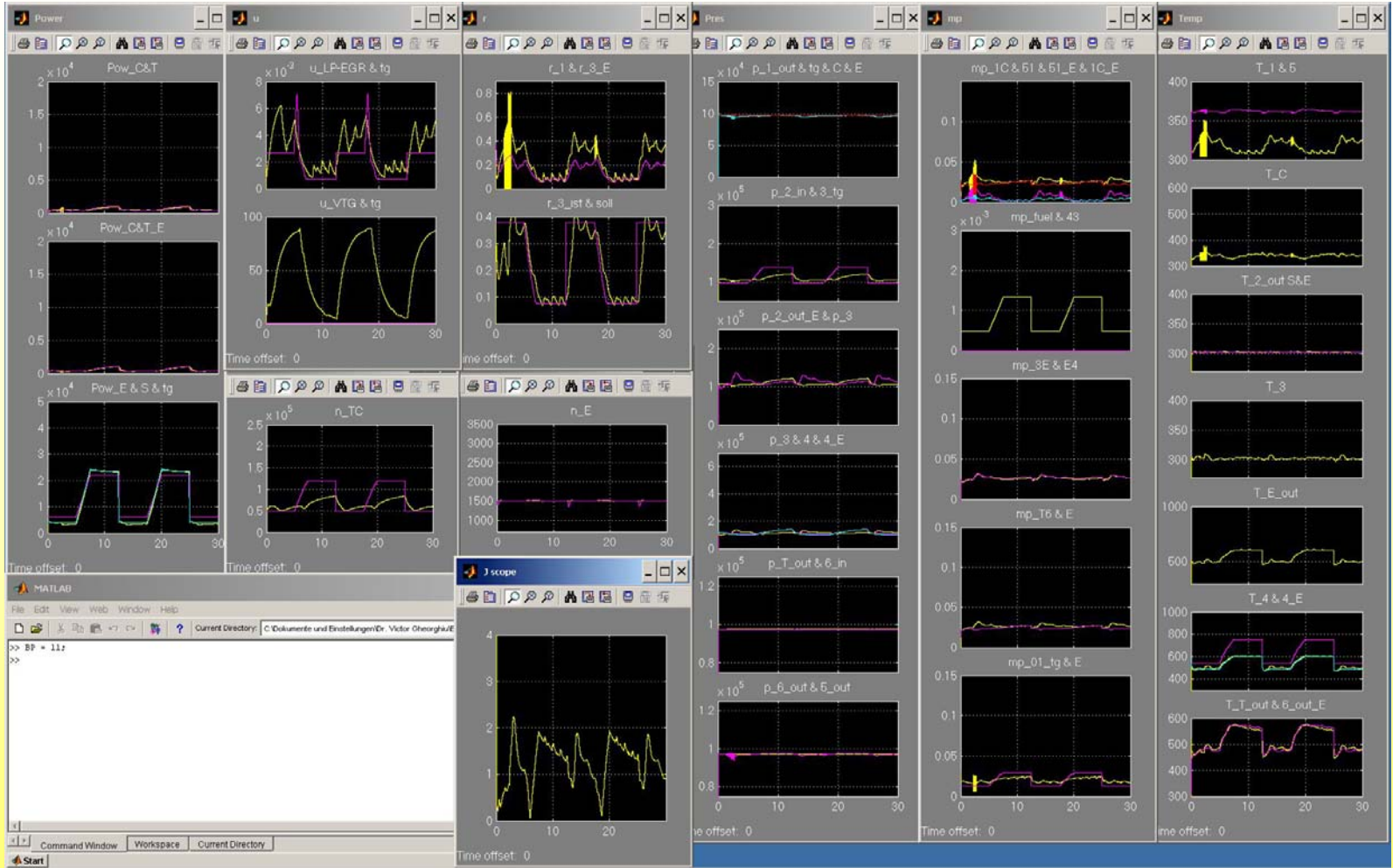
Return

Einige Ergebnisse während der Entwicklung des prädiktiven Reglers



Return

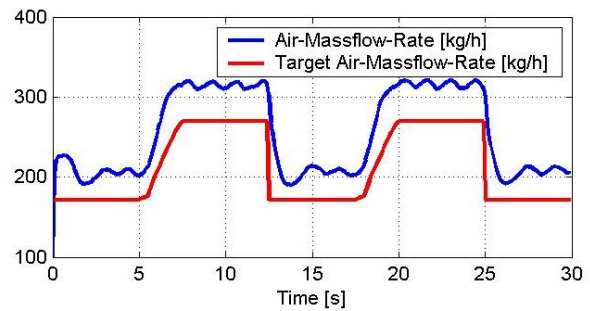
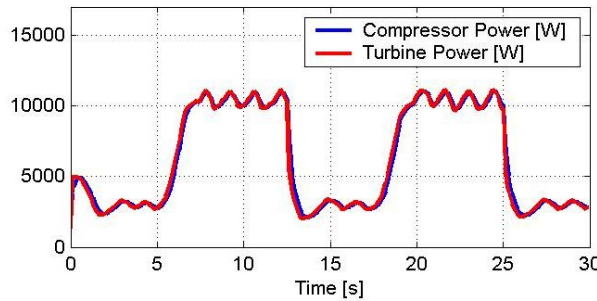
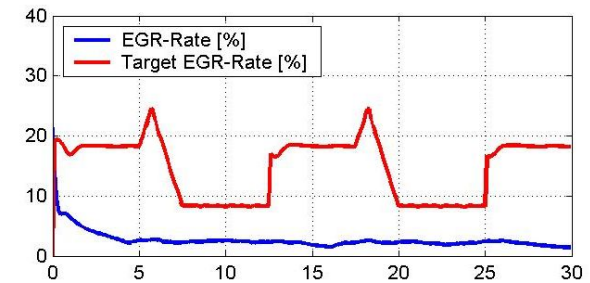
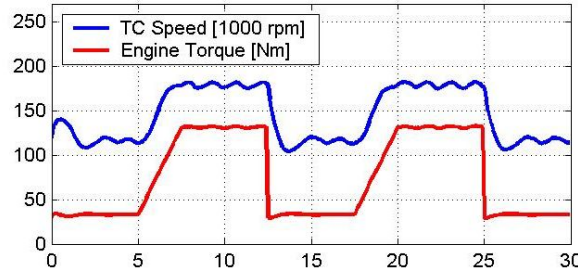
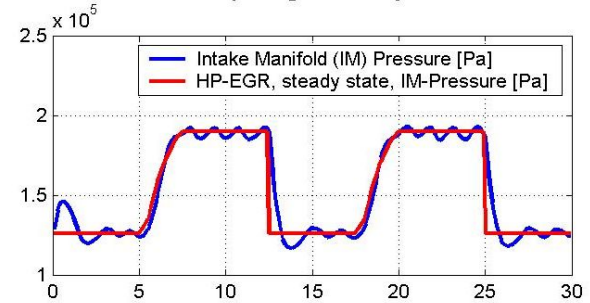
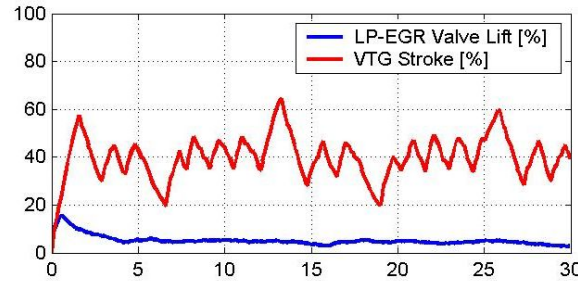
Einige Ergebnisse während der Entwicklung des prädiktiven Reglers



Return

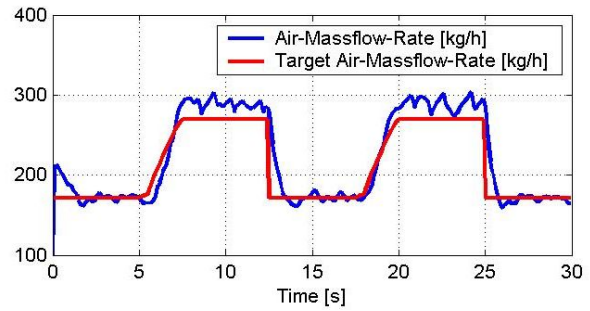
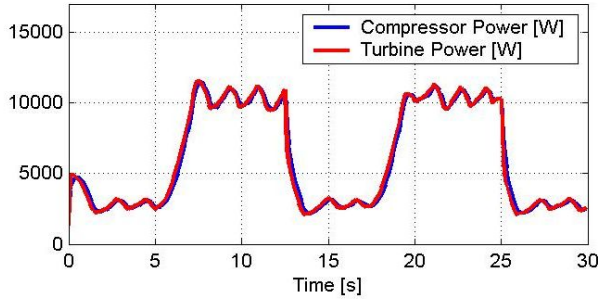
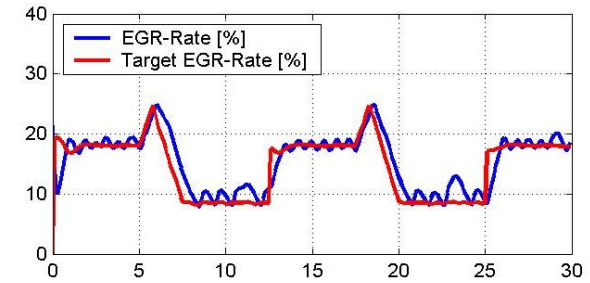
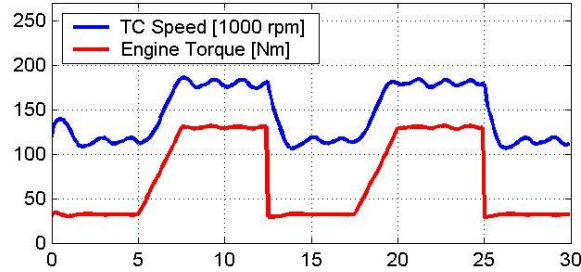
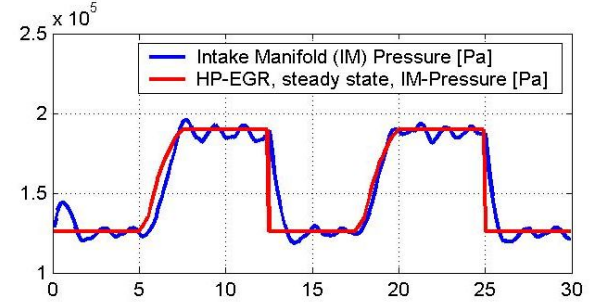
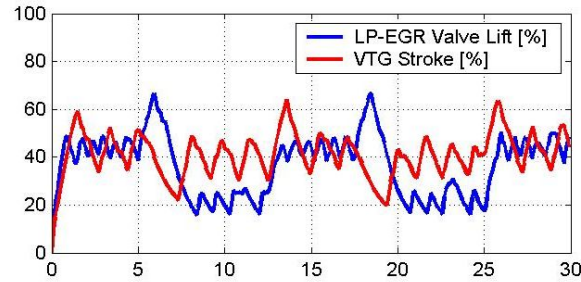
Einige Ergebnisse während der Entwicklung des prädiktiven Reglers

Targets: Air-Massflow-Rate and Intake Manifold Pressure (Engine Speed 3000 rpm)



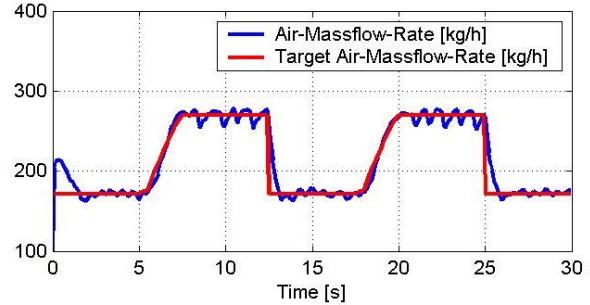
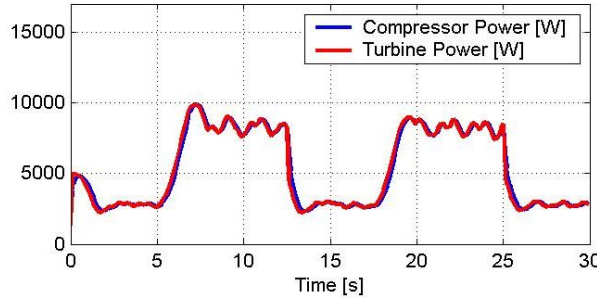
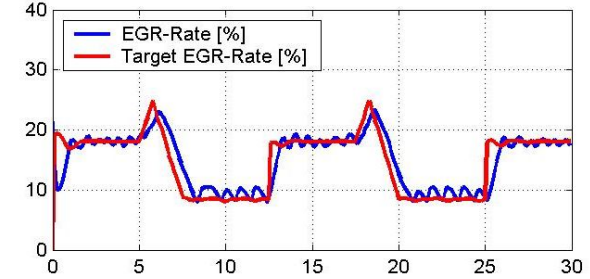
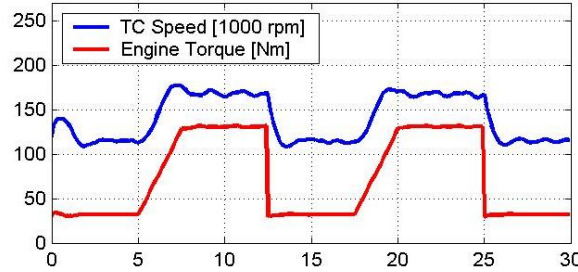
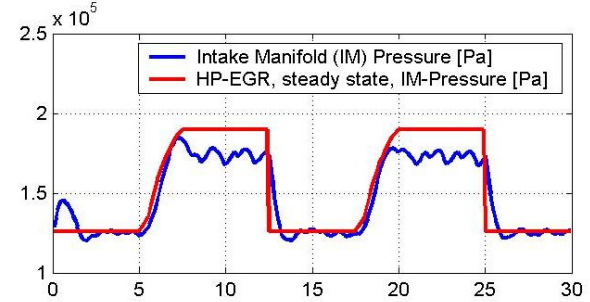
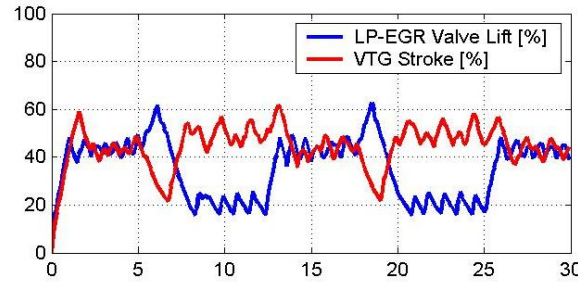
Einige Ergebnisse während der Entwicklung des prädiktiven Reglers

Targets: EGR-Rate and Intake Manifold Pressure (Engine Speed 3000 rpm)



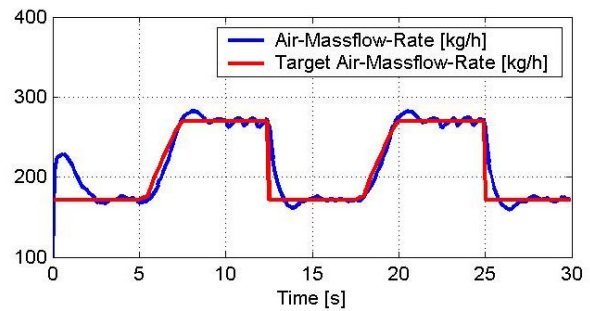
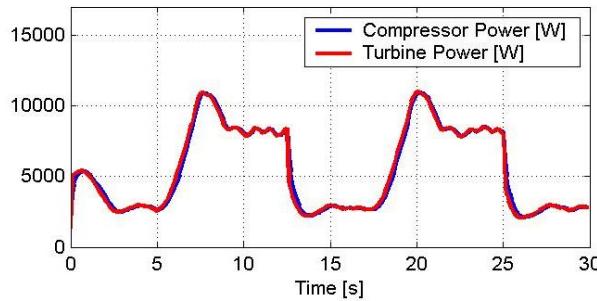
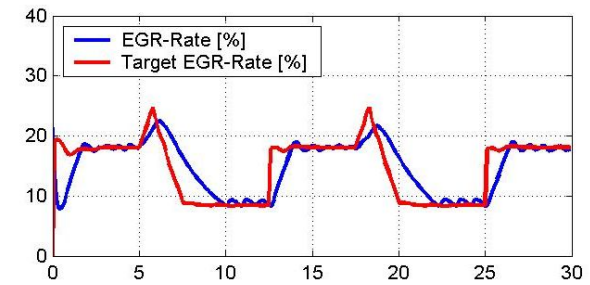
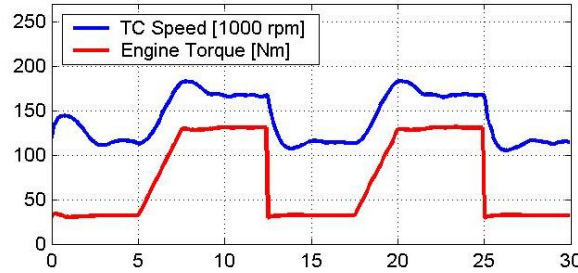
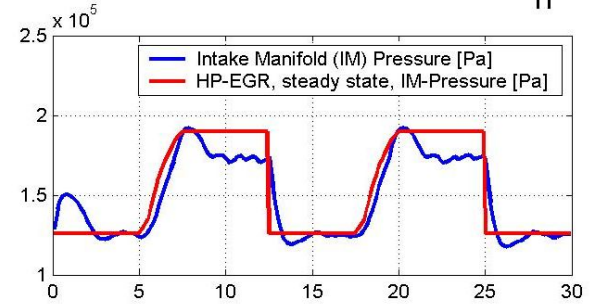
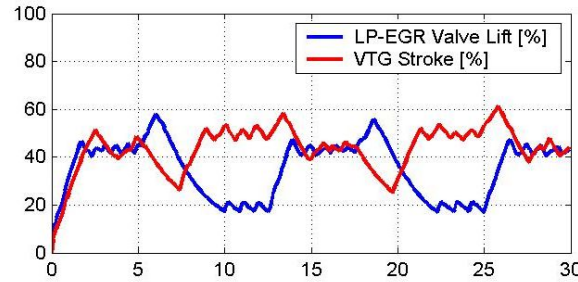
Einige Ergebnisse während der Entwicklung des prädiktiven Reglers

Targets: EGR-Rate and Air-Massflow-Rate (Engine Speed 3000 rpm)



Einige Ergebnisse während der Entwicklung des prädiktiven Reglers

Targets: EGR-Rate and Air-Massflow-Rate (Engine Speed 3000 rpm) $c_n^* 0.5$



Turbine mit variabler Geometrie

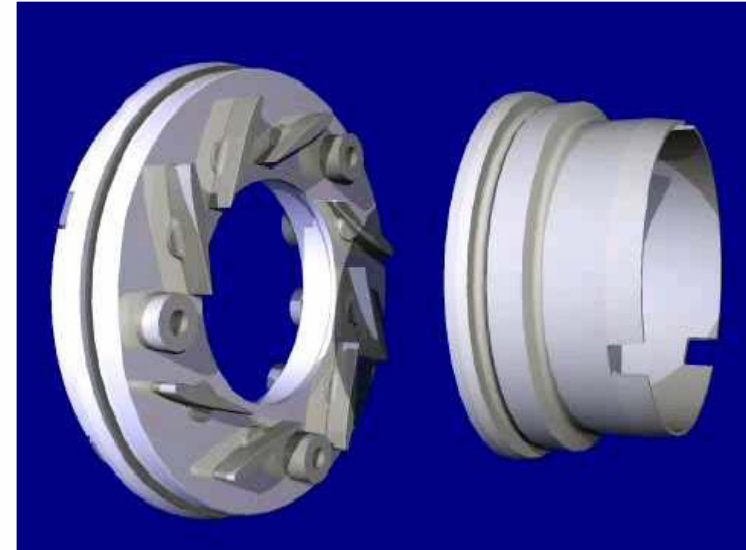
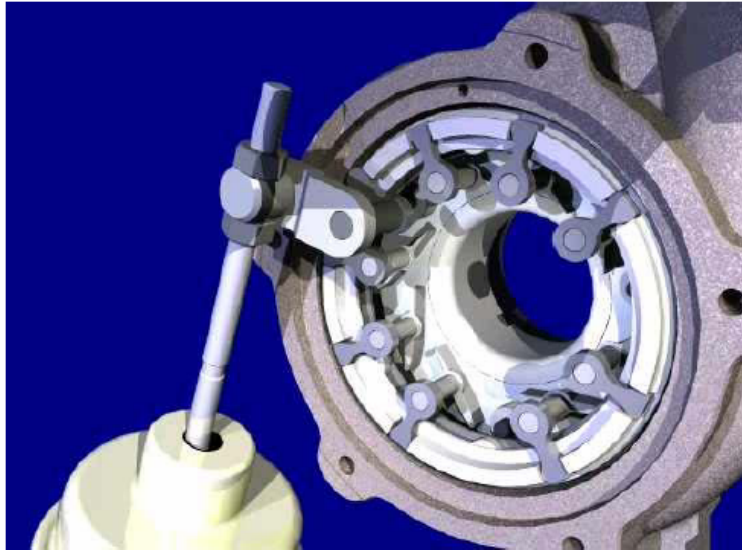
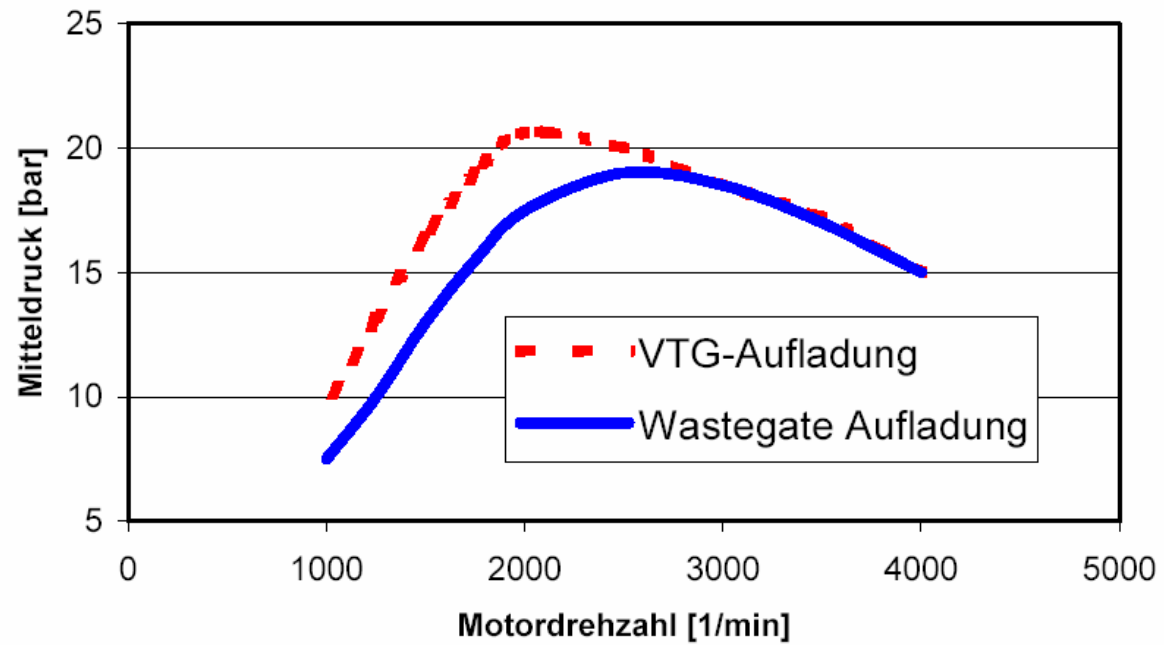
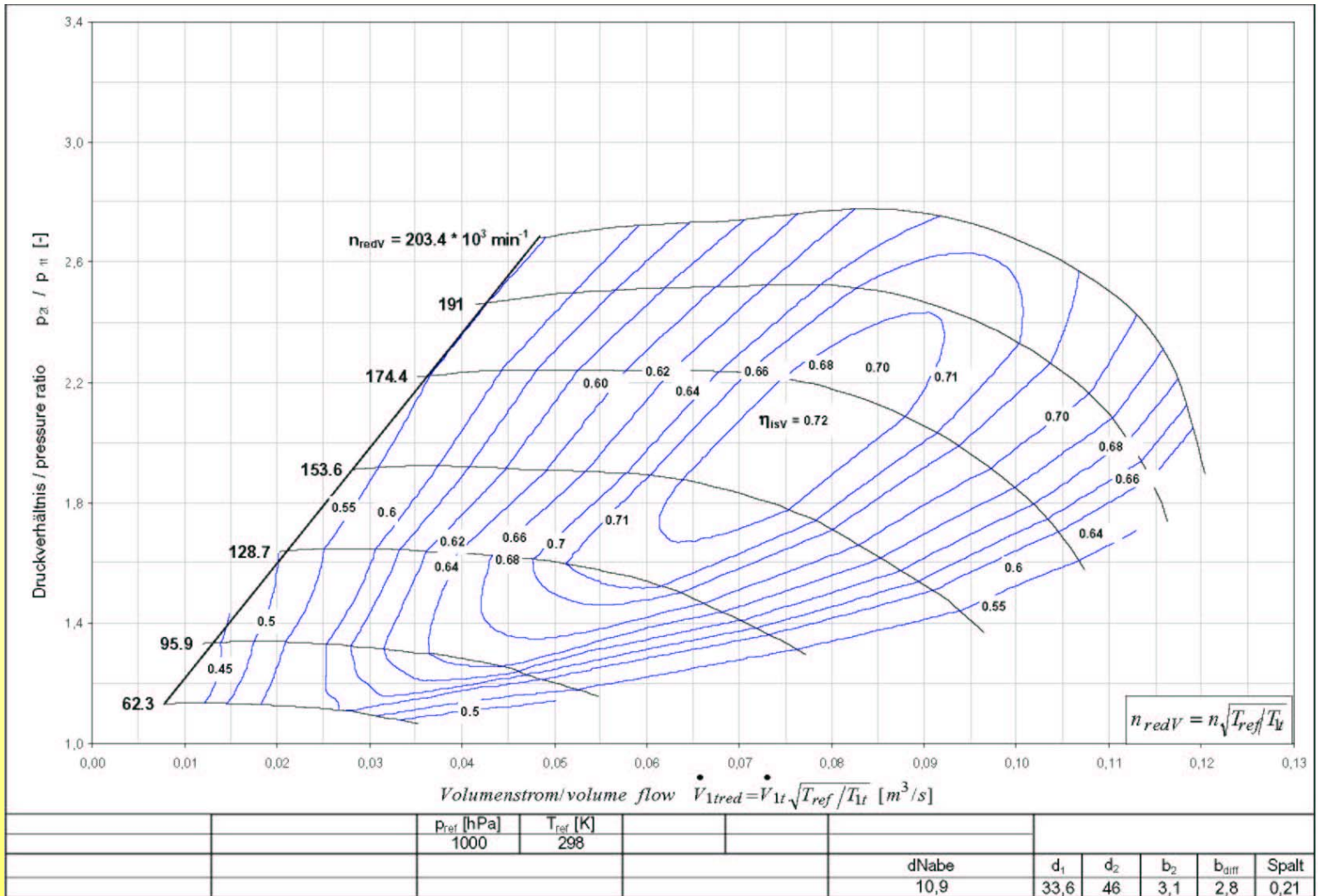
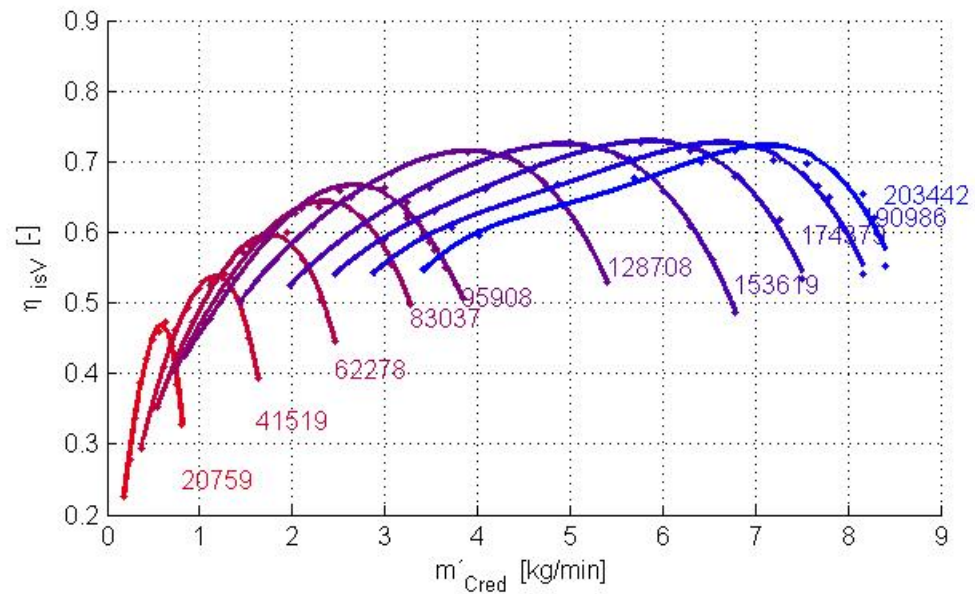
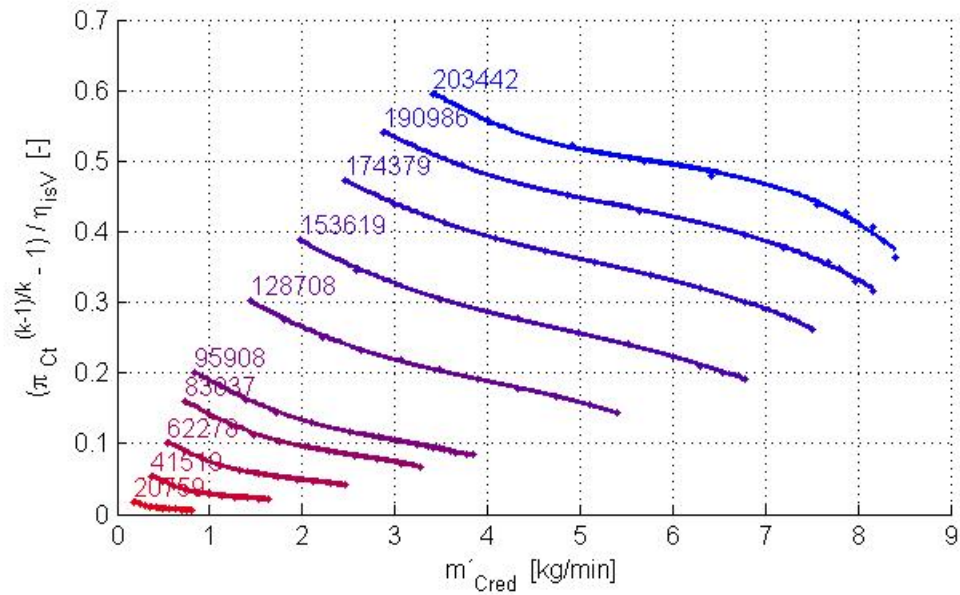


Abb. 2: Darstellung eines Abgasturboladers mit variabler Leitschaufelgeometrie: Turbine mit Steuerdose (links) und Leitapparat mit Leitschaufeln (rechts)

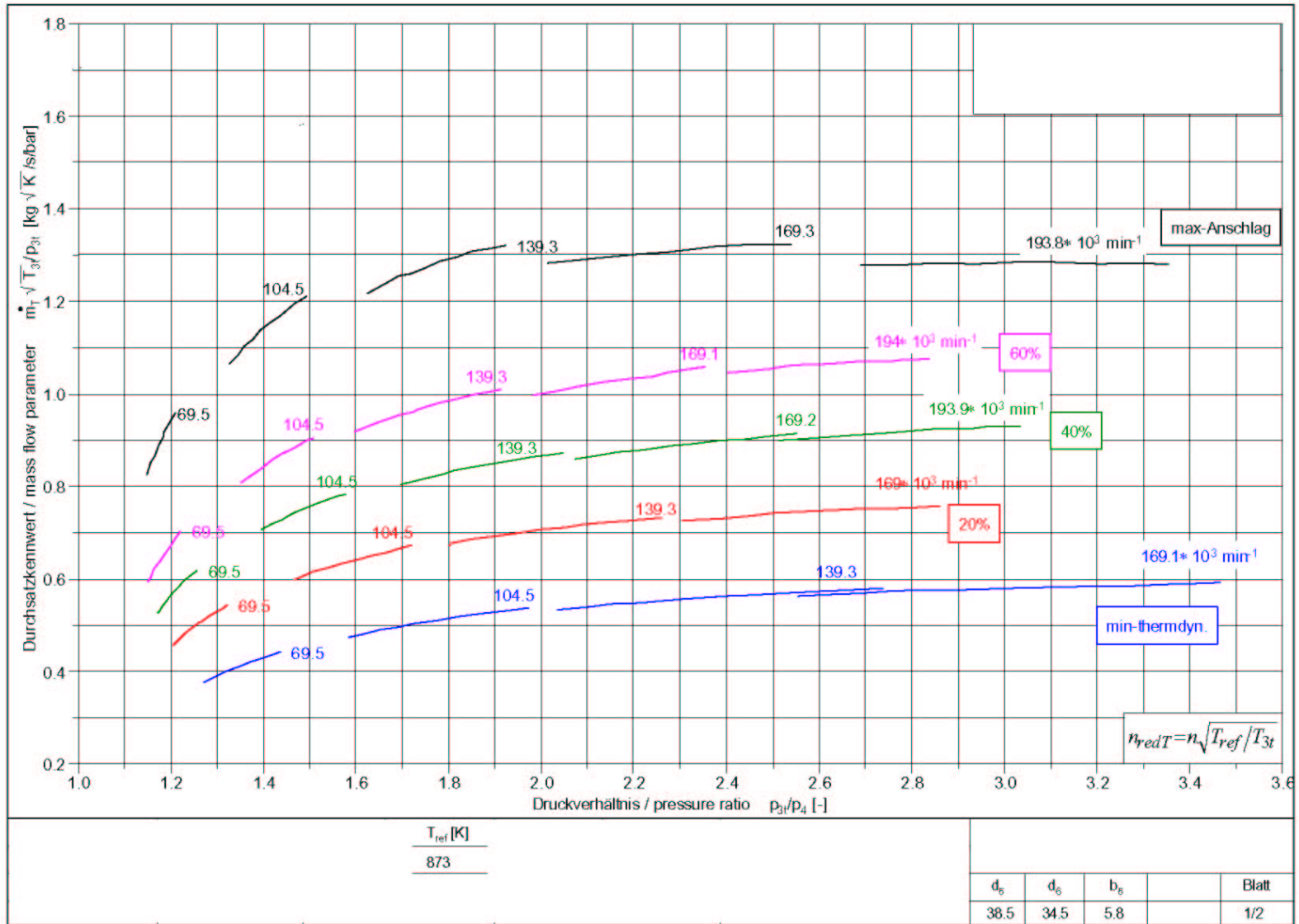
Verdichter-Kennfeld



Bearbeitetes Verdichter-Kennfeld



Turbine-Kennfeld (1)

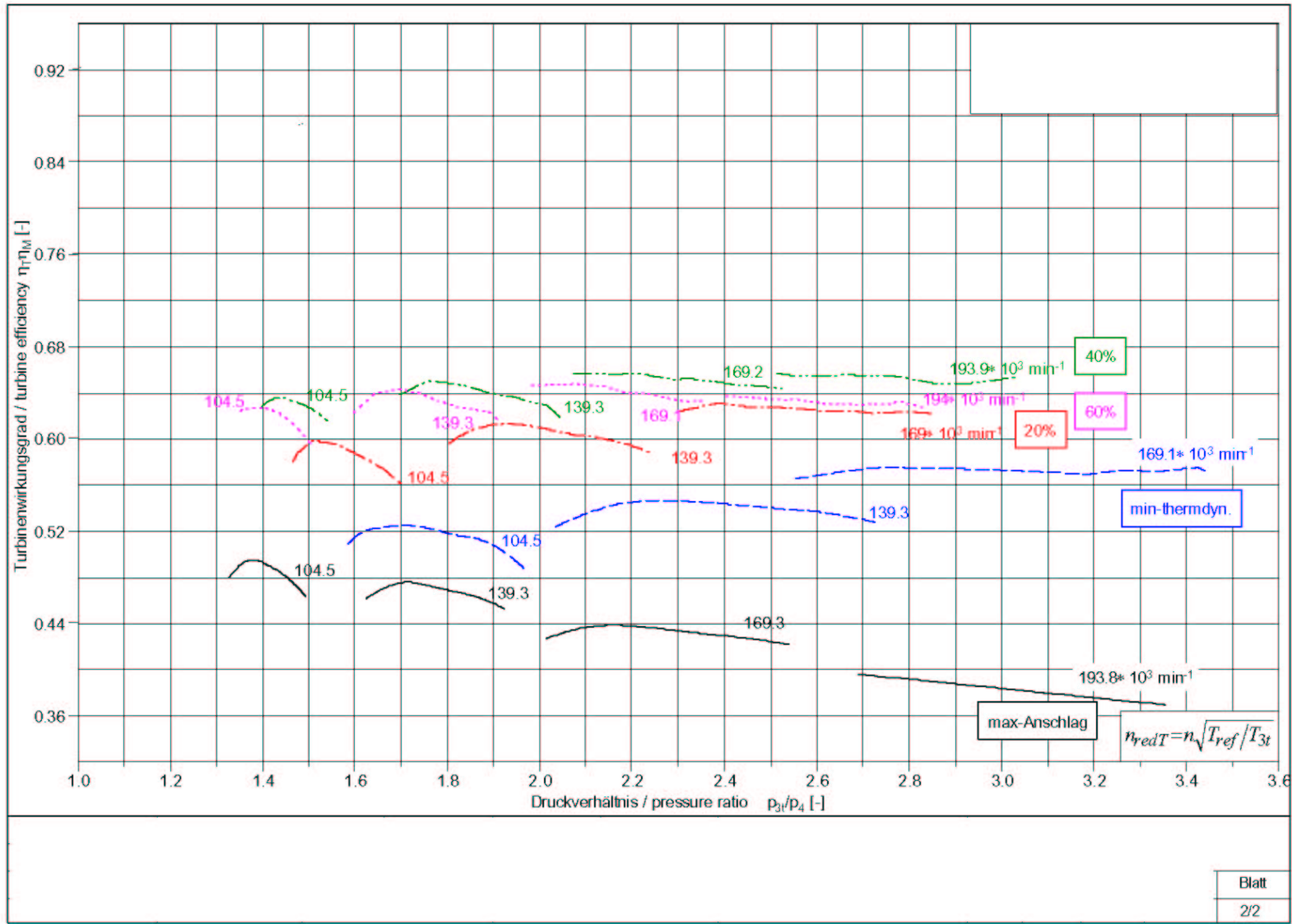


T_{ref} [K]
873

d_e	d_o	b_e		Blatt
38.5	34.5	5.8		1/2

Return

Turbine-Kennfeld (2)



Bearbeitetes Turbinen-Kennfeld

[Return](#)

