

# Qualitative Modellbildung einer Einspritzanlage für Dieselmotoren

SUSANNE MANZ

Institut für Automatisierungs- und Softwaretechnik, Universität Stuttgart

## Kurzfassung

Für die Überwachung komplexer technischer Systeme werden vielfach regelbasierte, seltener modellbasierte Verfahren eingesetzt. Erstere haben den Nachteil einer schwer durchschaubaren Regelbasis, deren Wartung und insbesondere Validierung schwierig ist. Letztere scheitern meistens am Modellierungsaufwand und mangelnden exakten Daten über die Anlage. Ein Forschungsgebiet am IAS beschäftigt sich mit der Sicherheitsanalyse verfahrenstechnischer Systeme mit Hilfe eines qualitativen Modellierungsverfahrens. Solche Sicherheitsanalysen werden beispielsweise von Überwachungsbehörden (TÜV) als Teil des Abnahmeverfahrens durchgeführt. Ziel ist es, die für die Sicherheitsanalyse erstellten Modelle auch im Betrieb der Anlage zur Überwachung weiterzuverwenden. Im Rahmen dieses Beitrages soll das erstellte qualitative Modell für den hydraulischen Teil einer Dieseleinspritzanlage nach der SQMA-Methode vorgestellt werden. Die Dieseleinspritzanlage beruht auf dem Prinzip eines Speichereinspritzsystems und wird von der Firma BOSCH entwickelt.

## 1 Einführung in das qualitative Modellierungsverfahren SQMA

Die Situationsbasierte Qualitative Modellbildung und Analyse (SQMA) ist ein am Institut für Automatisierungs- und Softwaretechnik (IAS) der Universität Stuttgart entwickeltes Verfahren und befaßt sich mit einer qualitativen, komponentenorientierten Modellierung für verfahrenstechnische und andere flußorientierte technische Prozesse. SQMA setzt sich aus folgenden Grundelementen zusammen:

- ⇒ Intervallarithmetik
- ⇒ Komponentenmodelle
- ⇒ Systemkomponente
- ⇒ Situationsanalyse
- ⇒ Transitionsanalyse

### 1.1 Intervallarithmetik

SQMA verwendet aufgrund des qualitativen Ansatzes eine Intervalldarstellung der Größen. Für jede physikalische Größe einer Komponente ordnet der Experte verschiedene Wertebereiche (Intervalle) zu, die das Verhalten dieser Komponente qualitativ beschreiben. Abbildung 1 zeigt die Festlegung der Intervalle für den Druck am Beispiel eines Tanks.

Der Druck repräsentiert den Füllstand des Tanks und wird durch Festlegung von geeigneten Intervallen unterteilt in die möglichen Zustände *LEER* ( $p_{A0} = 0$  mbar), *HALB-VOLL* ( $0 \text{ mbar} < p_{A0} = 40$  mbar), *VOLL* ( $40 \text{ mbar} < p_{A0} = 80$  mbar) und *ÜBERLAUF* ( $p_{A0} > 80$  mbar). Durch die qualitative Beschreibung ist es auch möglich, fehlerhafte Prozeßzustände des Tanks (z.B.  $p_{A0} > 80 \rightarrow$  *ÜBERLAUF*) zu modellieren bzw. einer späteren Analyse bereitzustellen.

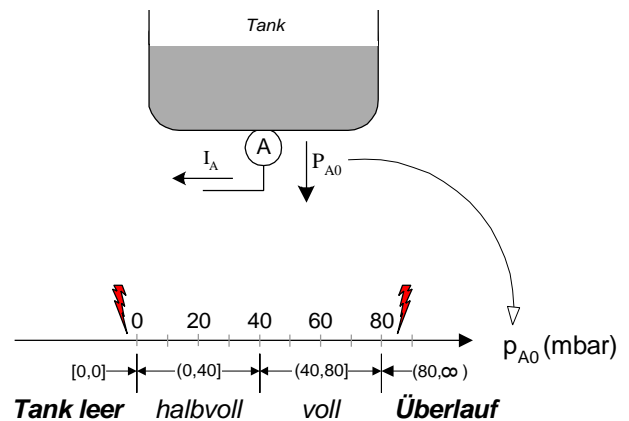


Abbildung 1: Darstellung der Intervalle des Tankdrucks am Zahlenstrahl

### 1.2 Komponentenmodelle

SQMA realisiert eine komponentenorientierte Modellierung. Zuerst werden die Einzelkomponenten unabhängig vom Gesamtsystem modelliert bevor das Systemmodell<sup>1</sup> aufgestellt werden kann. Eine Einzelkomponente eines flußorientierten Systems wird durch die Elemente in Abbildung 2 beschrieben. Die Verbindungen der Einzelkomponenten untereinander oder nach außen werden als *Schnittstellen* bzw. *Terminals* bezeichnet. Diese sind nach Art des anstehenden Mediums bzw. nach Art der Größen, die auf ein Terminal bezogen sind, klassifiziert. Somit kann bei Erstellung des Systemmodells aus Einzelkomponenten verhindert werden, daß z.B. ein elektrischer Anschluß mit einem Wasseranschluß verbunden wird. Die Überprüfung dieser Konsistenz erfolgt automatisch bei Erstellung der Netzliste. An jedem Terminal müssen zwei physikalische Größen definiert werden. Eine Größe ist

<sup>1</sup> Das Systemmodell enthält alle Komponenten einer Anlage, welche entsprechend miteinander vernetzt sind.

eine *Flußgröße*, wie z.B. der Volumenstrom des Wassers, die andere ist eine *Potentialgröße* wie z.B. der Wasserdruck in einem Tank. Eine Erweiterung dieser Definition stellen quellen- und senkenfreie Zweipole und logische Größen dar. Ein *quellen- und senkenfreier Zweipol* ist z.B. ein nicht leckendes Ventil. Hier ist es ausreichend, die Flußgröße vom Terminal am Eingang zum Terminal am Ausgang zu definieren. Mit dieser Maßnahme wird vereinfachend angenommen, daß der Knotenpunktsatz ( $I_A + I_B = 0$ ) im Innern des Ventils gelten muß. Die zweite Erweiterung bezieht sich auf die Definition einer *logischen Größe* an einem Terminal. Dies kann z.B. eine Schnittstelle sein, welche nach außen hin einen Schalter (z.B. Ein- und Aus-Schalter einer Pumpe) repräsentiert. Dieser Schalter kennt nur die Zustände *EIN* und *AUS* bzw. *0* und *1*. In diesem Falle ist es ausreichend, nur eine Potentialgröße mit den Intervallen  $[0,0]$  und  $[1,1]$  an diesem Terminal zu definieren.

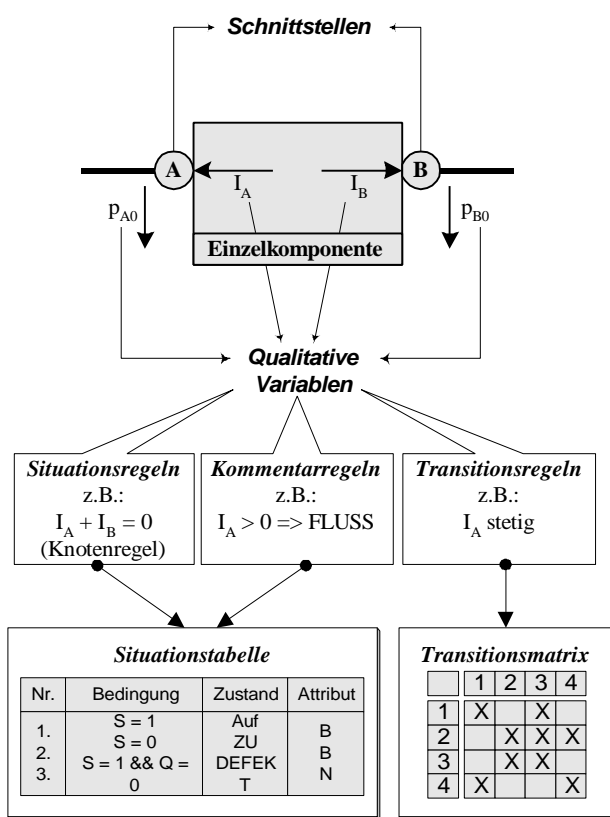


Abbildung 2: Allgemeine Darstellung einer Einzelkomponente

Für Fluß- und Potentialgrößen gelten die *Kirchhoffschen Gesetze*. Somit besteht die Möglichkeit, die Verbindung der physikalischen Größen aller Komponenten im System mit Hilfe von Knotenpunkt- und Maschenregeln zu beschreiben. In manchen Fällen übertragen reale Leitungen mehr als nur eine Art von Größen. Eine Wasserleitung kann beispielsweise Wasser befördern, elektrischen Strom leiten und Wärme bzw. Leistung übertragen. In einem solchen Fall muß *ein* realer Wasseranschluß durch *drei* Terminals modelliert werden.

Wie im oberen Abschnitt schon erläutert, gibt es zwei Arten von *qualitativen Variablen*, die Potential- und die Flußgrößen. Bei der Definition von Potentialgrößen an

einem Terminal werden grundsätzlich zwei Bezugspunkte angegeben. Einer der Bezugspunkte kann dabei ein *systemweit* gültiges Bezugspotential sein (z.B. Nullpotential), der andere oder beide ein Terminal der Komponente. Für Flußgrößen wird ein Terminal angegeben sowie deren Orientierung (in die Komponente hinein oder aus der Komponente heraus). Zur Festlegung der Komponentengrößen gehört auch die Festlegung der qualitativen Intervalle, welche für jede Größe definiert werden müssen. Die Anzahl und Art der Intervalle ist dabei frei wählbar und richtet sich ausschließlich nach charakteristischen, für das Verhalten der Komponente entscheidenden Grenzwerten und Bereichen. Am Beispiel des Tanks in Abbildung 1 sind für die qualitative Größe  $p_{A0}$  vier Intervalle definiert. Diese genügen zur Beschreibung des erwünschten und nicht erwünschten Verhaltens des Tanks.

Eine *Situation* der Komponente ist eine bestimmte Kombination der Intervalle aller Größen. Da manche Kombinationen physikalisch nicht möglich sind, müssen diese mit Hilfe von *Situationsregeln* ausgeschlossen werden. Diese Regeln beschreiben das reale Verhalten der Komponenten. Die Situationsregeln können in Gleichungsform formuliert sein oder auch in Form logischer Aussagen, welche für alle Situationen erfüllt sein müssen. Zur Aufstellung der Situationsregeln stehen die allgemeingültigen intervallarithmetische und logische Operatoren zur Verfügung. Um z. B. das Verhalten des Volumenstromes bei leerem Tank zu untersuchen (s. Abbildung 1), genügt die Gleichung:

$$p_{A0} = 0 \rightarrow I_A \leq 0$$

Diese Beziehung besagt, daß bei leerem Tank ( $p_{A0} = 0$ ) keine Flüssigkeit aus dem Tank fließen kann (physikalisch unmöglich), jedoch ein Rückfluß in den Tank hinein ( $I_A < 0$ ) zulässig ist.

Für die Auswertung der durch die Analyse von Prozeßmodellen gewonnenen Ergebnisse ist die Unterscheidung nach Situationen oft zu fein. Mehrere Situationen können in einem Betriebszustand zusammengefaßt werden, welcher das Verhalten der Komponente nach außen beschreibt. Als Beispiel sei hier ein Magnetventil aufgeführt, welches durch ein elektrisches Signal geöffnet werden kann. Der Zustand *ZU* ist durch eine Kommentarregel so definiert, daß am Ausgang des Ventils kein Druck anliegt. Dies kann jedoch bei zwei verschiedenen Situationen der Fall sein. Erstens wenn das Ventil wirklich geschlossen ist und zweitens, wenn das Ventil zwar auf ist, aber kein Medium fließt. Mit Hilfe von *Kommentarregeln* wird jedem definierten Betriebszustand, welchen die Komponente einnehmen kann, eine Bezeichnung zugeordnet.

Vervollständigt wird diese Bezeichnung durch die Vergabe eines Attributes für jeden Zustand, mit dem eine Klassifizierung in Hinblick auf den Zweck der Analyse vorgenommen wird („B“ = bestimmungsgemäß, „N“ = nicht bestimmungsgemäß und „G“ = gefährlich). Zum Beispiel wäre der Zustand *ÜBERLAUF* beim Tank (s. Abbildung 1) mit dem Attribut *G* zu versehen, um somit den gefährlichen Zustand hervorheben zu können:

## $p_{A0} > 80 \Rightarrow \text{ÜBERLAUF}$ attribute G

Der vollständige Situationsraum einer Komponente ergibt sich aus allen möglichen Kombinationen der qualitativen Werte der einzelnen Komponentengrößen. Durch Anwendung der Situationsbedingungen wird der vollständige Situationsraum auf den realen Situationsraum reduziert, der sich in Form der *Situationstabelle* darstellen läßt. Die Situationstabelle enthält die Kombination der einzelnen Intervalle, die durch Kommentarregeln festgelegten Zustände und die zugewiesenen Attribute. Ein Auszug aus der Situationstabelle für den Tank aus Abbildung 1 könnte z.B. folgendermaßen aussehen (Tabelle 1):

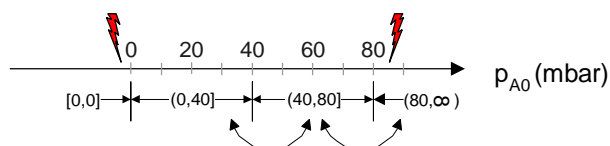
Nr.	$I_A$	$p_{A0}$	Zustand	Attribut
1	[0,0]	[0,0]	LEER	N
2	[0,?)	(0,40]	HALBVOLL / FLUSS	B/B
:	:	:	:	:

Tabelle 1: Auszug aus einer Situationstabelle

Aus den Transitionsregeln läßt sich ableiten, welche Übergänge (Transitionen) zwischen den Situationen der Situationstabelle möglich sind. Es gibt zwei Arten von Transitionsbedingungen:

### 1. Stetigkeit

Physikalische Größen, die kennzeichnend für die in Energiespeichern enthaltene Energie sind, können sich nur stetig ändern. Solche Größen werden bei der Modellierung als „stetig“ gekennzeichnet. Zwei aufeinanderfolgende Situationen dürfen für alle stetigen Größen nur jeweils benachbarte Werte annehmen.



**Bedingung:  $p_{A0}$  stetig !**  
d.h. falls  $p_{A0}$  im Bereich (40,80] ist, darf die **folgende** Situation nur im Bereich (0,40] oder (80, ∞) sein.

Abbildung 3: Darstellung eines "stetigen" Überganges am Zahlenstrahl

Daraus ergibt sich für die Festlegung des Größenraumes die Forderung, daß dieser für stetige Größen lückenlos sein muß. Dies bedeutet, daß zu jedem qualitativen Wert der nächstgrößere und der nächstkleinere jeweils benachbart ist (s. Abbildung 3).

### 2. Differentielle Bedingungen

Unter Verwendung des Differentialoperators  $\partial$  werden Bedingungen für die Änderung bestimmter Größen angegeben. Die Ableitung  $\partial x$  einer Variable  $x$  wird als *eigenständige* Größe explizit im Modell berücksich

tigt. Der Größenraum dieser Hilfsvariable  $\partial x$  ist allgemein mit  $\{(-\infty,0), [0,0], (0,\infty)\}$  festgelegt. Durch diese Hilfskonstruktion, die für den Algorithmus zur Auswertung der Transitionsanalyse gebraucht wird, können beliebige Bedingungen in der Art der Situationsregeln angegeben werden. Diese Bedingungen dürfen auch mehrere abgeleitete Größen enthalten.

Beim Tank aus Abbildung 1 und Abbildung 3 ist der Druck  $p_{A0}$  eine stetige Größe. Dieser Druck beschreibt den Füllstand des Tanks und darf somit nicht springen. Das heißt der Tank kann vom Zustand VOLL ( $p_{A0} > 80$ ) nur über den Zustand HALBVOLL ( $p_{A0} = (40,80]$ ) zum Zustand LEER ( $p_{A0} = 0$ ) gelangen. Auch ist der Druck bzw. Füllstand abhängig vom Zu- und Abfluß der Flußgröße. Diese Abhängigkeit wird durch die Gleichung  $\mathcal{I} p_{AB} = -I_A$  beschrieben.

Die Transitionsmatrix verhält sich zu den Transitionsregeln wie die Situationstabelle zu den Situationsregeln: sie bildet die Bedingungen in eine standardisierte, für die automatische Weiterverarbeitung geeignete Form ab. Die Transitionsmatrix ist eine quadratische Matrix, in der horizontal und vertikal jeweils die Situationen eingetragen sind. Ein „X“ in der Matrix bedeutet, daß von der in dieser Zeile referenzierten Situation ein Übergang zu der in der entsprechenden Spalte referenzierten möglich ist. Fehlt der Eintrag in der Hauptdiagonalen, die den Übergang einer Situation auf sich selbst bestimmt, so ist diese Situation instabil.

### 1.3 Systemkomponente

Die Systemkomponente besteht aus Einzelkomponenten, Außenanschlüssen und Leitungen, welche die Komponenten untereinander und mit den Außenanschlüssen verbinden. Gewöhnlich beschreibt das Systemmodell die physikalische Struktur des technischen Systems. In manchen Fällen übertragen reale Leitungen aber mehrere Arten von Medien bzw. Größen. In diesen Fällen müssen diese Leitungen jeweils durch mehrere Leitungen im Modell dargestellt werden. Manche Wechselbeziehungen zwischen Komponenten finden im realen System nicht mittels Leitungen statt (z.B. Wärmeübertragung durch die Luft). Im Modell müssen an solchen Stellen deshalb zusätzliche Leitungen eingetragen werden. Die Leitungen können häufig als verlustfrei betrachtet werden. Nur falls die Übertragung des Mediums durch die Leitungen signifikanten Einfluß auf das Gesamtsystem hat (z.B. durch Druckabfall, Leckage oder Leerlaufen der Leitung), müssen die Leitungen als eigenständige Komponente mit in das System aufgenommen werden.

Abbildung 4 zeigt die allgemeine Darstellung einer Systemkomponente. Folgende Schritte sind für die Erstellung der Systemkomponente notwendig:

1. Festlegung der Terminals des Systems
2. Festlegung der Größen und deren Wertebereiche an den Systemterminals

3. *Erstellen einer Netzliste:* Die Netzliste ist eine Liste von Knoten. Jeder Knoten besteht aus zwei oder mehr Terminals von Komponenten, die durch (ideale) Leitungen miteinander verbunden sind.
4. *Generierung der Systemgleichungen:* Die Systemgleichungen werden mit Hilfe eines Werkzeuges automatisch aus der Netzliste erzeugt. Die Systemgleichungen spiegeln die Struktur des Systems wieder. Die physikalischen Größen werden anhand der Kirchhoffschen Regeln verknüpft. Das bedeutet, die Abhängigkeit der Flußgrößen im System wird mit Hilfe des Knotenpunktsatzes und die Abhängigkeit der Potentialgrößen mit Hilfe des Maschensatzes beschrieben.

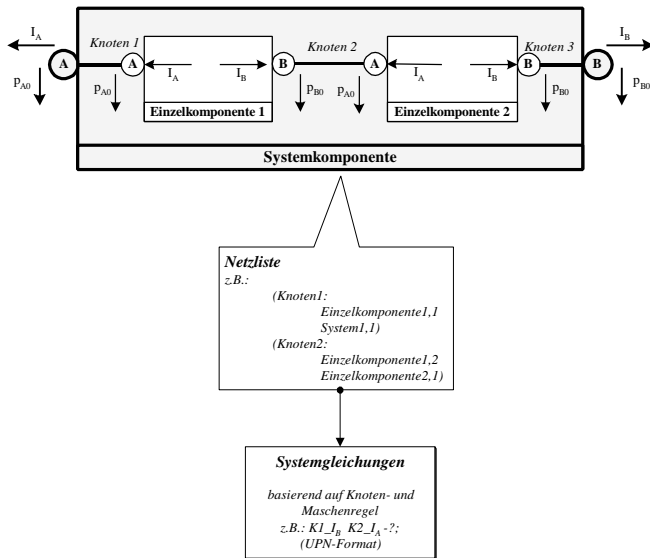


Abbildung 4: Allgemeine Darstellung einer Systemkomponente

### 1.4 Situations- und Transitionsanalyse

Die Situations- und Transitionsanalyse verknüpft die Informationen über die Komponenten mit der Systemstruktur, um daraus die möglichen *Systemsituationen* und *Systemtransitionen* abzuleiten. Eine System-situation ist ein Vektor, der für jede im System enthaltene Komponente eine bestimmte Situation aus deren Situationstabelle festlegt. Das Ergebnis der Situationsanalyse ist die *System-situationstabelle*, die alle physikalisch möglichen Kombinationen der Komponentensituationen enthält. Die Systemgleichungen dienen als Test, den jede System-situation komplett „bestehen“ muß, um in die System-situationstabelle aufgenommen zu werden.

Die Herleitung der Systemtransitionsmatrix geschieht nach folgender Regel:

*Zwischen zwei Systemtransitionen ist genau dann ein Übergang möglich, wenn zwischen den darin festgelegten Situationen jeder Einzelkomponente auch ein Übergang möglich ist.*

## 2 Die Dieseleinspritzanlage „Common Rail“

Das Speichereinspritzsystem „Common Rail“ (Abbildung A 1 im Anhang) entkoppelt Druckerzeugung und Einspritzung mit Hilfe eines Speichervolumens (Abbildung A 2) und macht somit möglich, daß der hohe Einspritzdruck an jedem Injektor gleich anliegt. Durch die Wahl des Einspritzdruckes unabhängig von der Motordrehzahl und der Einspritzmenge wird ein zusätzlicher Freiheitsgrad für die Motorentwicklung erzielt und somit ein besserer Verbrennungsablauf erreicht.

In dem abgebildeten Common-Rail Einspritzsystem wird mittels einer Radialkolbenpumpe der Dieselkraftstoff unter Hochdruck in die Verteilerleiste (Common Rail, Abbildung A 2) gepumpt und gespeichert. Der Kraftstoffdruck ist durch einen Regelkreis, bestehend aus Drucksensor, Steuergerät und Druckregler eingestellt. Durchflußbegrenzer schützen das System gegen die Folgen einer möglichen Leckage des Injektors. Ein Druckbegrenzungsventil am Ende der Rail verhindert Überdruck im System. Über die Einspritzdüse des magnetventilgesteuerten Injektors wird der Kraftstoff in den Brennraum eingespritzt. Der Injektor erhält seine Schaltsignale vom elektronischen Steuergerät. Die eingespritzte Kraftstoffmenge ist bestimmt durch den elektrisch geregelten Systemdruck, die Einschalt-dauer des Magnetventils und den Einspritzdüsen. Im Tank befindet sich die Elektro-Kraftstoff-Pumpe (EKP), welche den Diesel über Filter und Niederdruckleitungen zur Hochdruckpumpe fördert.

In Abbildung A 2 ist die Verteilerleiste dargestellt, welche als Druckreservoir für den Kraftstoff dient. Der Druckregler ist in diesem Falle nicht an der Hochdruckpumpe (Abbildung A2) angebracht, sondern an der Rail. Für die weitere Betrachtung der Anlage soll diese Variante modelliert werden.

### Das Speichereinspritzsystem bietet folgende Vorteile:

- durch die Entkopplung von Druckerzeugung und Einspritzung wird ein weiterer Freiheitsgrad für die Verbrennungsentwicklung gewonnen
  - Einspritzdruck kann unabhängig von der Motordrehzahl gewählt werden
  - mittlerer Druck bleibt während der Einspritzung konstant auf dem gewünschten Niveau
- mit der Steigerung des Kraftstoffdruckes auf bis zu 1350 bar wird der Kraftstoffverbrauch aufgrund der feineren Zerstäubung und kürzere Einspritzzeiten reduziert
  - Reduzierung der Schwarzrauchbildung
- Erhöhung des Drehmomentes im unteren Drehzahlbereich
- Voreinspritzungen bzw. Mehrfacheinspritzungen (durch mehrmaliges Ansteuern der Magnetventile) senken Abgasemissionen weiter ab und verringern das Verbrennungsgeräusch deutlich

### 3 Einzelkomponenten der Dieseleinspritzanlage

Abbildung 5 zeigt eine Übersicht über die Einzelkomponenten, welche in das Gesamtmodell der Dieseleinspritzanlage aufgenommen wurden.

Aufgrund der Komplexität der Anlage und des damit verbundenen erhöhten Rechenzeitbedarfs wurden nicht alle Komponenten der Anlage im qualitativen Modell berücksichtigt.

Zur Verdeutlichung der Modellierung der Einzelkomponenten wird die Vorgehensweise am Beispiel des Druckbegrenzungsventils erläutert.

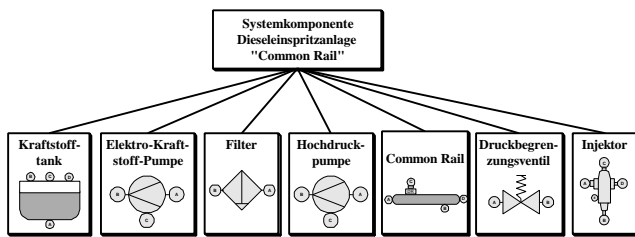


Abbildung 5: Übersicht der modellierten Einzelkomponenten der Dieseleinspritzanlage

Das Druckbegrenzungsventil (Abbildung 6) öffnet bei einem voreingestellten Öffnungsdruck und begrenzt damit den Systemdruck in der Rail auf ca. 1400 bar<sup>2</sup>. Das Ventil schließt bei einem geringeren Druck (Schließdruck < Öffnungsdruck), da infolge der Strömungskräfte und Hysterese der Kolben erst bei einem Druck schließt, der unter dem Öffnungsdruck liegt. Dies wird im Modell nicht berücksichtigt.

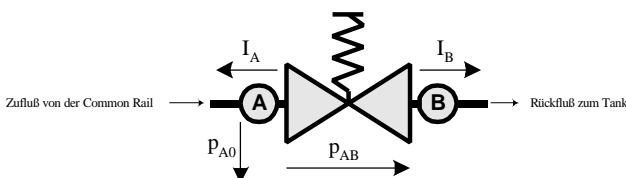


Abbildung 6: Komponentenmodell des Druckbegrenzungsventils

Folgende Defekte sind im Modell mit aufgenommen:

- Ventil leckt, wenn der Fluß am Ausgang kleiner ist als der Fluß am Eingang
- Ventil ist verstopft beim erhöhten Druckabfall

Um die Abhängigkeit vom Druckabfall zum Durchfluß beschreiben zu können, wird von der stark idealisierten Druckabfall-Durchfluß-Kennlinie aus Abbildung 7 ausgegangen:

<sup>2</sup> Das Druckbegrenzungsventil öffnet nur, falls der Druckregler defekt ist oder überlastet. D.h. das Ventil dient zur weiteren Sicherheit vor zu hohem Druck in der Rail.

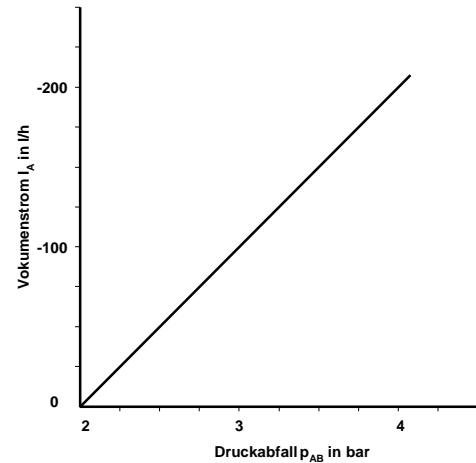


Abbildung 7: Idealisierte Druckabfall-Durchflußkennlinie des Druckbegrenzungsventils

An den Terminals des Druckbegrenzungsventils liegen vier physikalische Größen an (Tabelle 2), welche für die Modellierung von Bedeutung sind. Dies ist pro Schnittstelle jeweils eine Flußgröße ( $I_A$  und  $I_B$ , Typ Current) und eine Potentialgröße ( $p_{A0}$  und  $p_{B0}$ , Typ Potential). In der Tabelle sind diese Größen zuzüglich deren Intervalle aufgezeichnet. Die Größen  $I_A$  und  $I_B$  bezeichnen den Volumenstrom durch das Ventil am Eingang bzw. am Ausgang. Diese Größen werden getrennt betrachtet, um eine mögliche Leckage in die Modellierung mit aufnehmen zu können (d.h. das Ventil ist nicht quellen- und senkenfrei).

TERMINAL	TYP	GRÖßE	INTERVALLE
A → B	Potential	$p_{AB}$	[0,0] [2,3] [3,4] [4,?)
A	Current	$I_A$	[-200,-100] [-100,0] [0,0]
A	Potential	$p_{A0}$	[0,0] (0,1400] (1400,1500]
B	Current	$I_B$	[0,0] (0,100] (100,200]

Tabelle 2: Terminals und deren physikalische Größen des Druckbegrenzungsventils

Der Druck  $p_{A0}$  am Terminal A ist wichtig, um das Verhalten des Ventils zu beschreiben. Ist der Eingangdruck größer als 1400 bar, so öffnet das Ventil, ansonsten bleibt es geschlossen. Die Größe  $p_{AB}$  repräsentiert den Druckabfall am Ventil. Je größer der Volumenstrom ist, desto höher ist auch der Druckabfall (Idealisierte Druckabfall-Durchfluß-Kennlinie aus Abbildung 7).

Der nächste Schritt umfaßt das Aufstellen der Situationsregeln. Zweck dieser Regeln ist das Streichen aller physikalisch unmöglichen Situationen aus der vollständigen Situationstabelle, welche die Kombinationen *aller* Wertebereiche der Größen enthält. Dem Benutzer obliegt es nun, diese Regeln aufzustellen, welche das Verhalten des Ventils nach außen beschreiben. Dabei ist es auch wichtig, fehlerhaftes Verhalten zu modellieren. Alle physikalisch unmöglichen Situationen des Druckbegrenzungsventils können durch folgende Situationsregeln ausgeschlossen werden (Tabelle 3):

SITUATIONS-BEDINGUNGEN	ERKLÄRUNG
$p_{A0} = 0 \rightarrow$ $I_A = 0 \wedge I_B = 0 \wedge p_{AB} = 0$	kein Druck am Eingang, deswegen auch kein Fluß und Druckabfall
$p_{A0} = (0,1400] \rightarrow$ $I_A = 0 \wedge I_B = 0 \wedge p_{AB} > 0$	Eingangsdruck zu niedrig, deswegen Ventil zu
$I_B = -I_A$	Fluß am Ausgang muß gleich oder kleiner ( $\rightarrow$ leckt) Fluß am Eingang sein
$I_A < 0 \rightarrow$ $I_B > 0 \wedge p_{AB} = 2$	Durchfluß, deswegen auch Druckabfall
$I_A < -100 \rightarrow$ $p_{AB} = 3$	bei Fluß kleiner -100 muß Druckabfall größer 3 sein (Abbildung 7)

Tabelle 3: Situationsregeln für das Druckbegrenzungsventil

Das statische Verhalten des Ventils ist mit der gewonnenen Situationstabelle ausreichend beschrieben. Zum Schluß muß das dynamische Verhalten betrachtet werden, d.h. welcher Zustand kann in einen anderen übergehen. Nicht mögliche Übergänge kann man durch Aufstellen von Transitionsregeln ausschließen. Im Falle des Sicherheitsventils ist es ausreichend, die Stetigkeit für die Flußgrößen anzunehmen (Tabelle 4). Diese sind die energietragenden Größen in dem System und können nicht springen.

TRANSITIONS-BEDINGUNGEN	ERKLÄRUNG
$\$ I_A$	Fluß am Eingang des Ventils darf nicht springen (da energietragende Größe)
$\$ I_B$	Fluß am Ausgang des Ventils darf nicht springen (da energietragende Größe)

Tabelle 4: Transitionsregeln für das Druckbegrenzungsventil

Im nächsten Schritt wird nun jedem Zustand des Ventils ein Kommentar zugewiesen. Dies erfolgt mit Hilfe von Kommentarregeln und dient zur einfacheren Auswertung des Ergebnisses. Jeder Kommentar wird noch mit einem Attribut versehen, welches die Art des Zustandes beschreibt. Die Wahl des Attributes ist willkürlich, hier werden folgende drei Attribute unterschieden:

- „B“ = bestimmungsgemäß, d.h. normaler, erwarteter Zustand
- „N“ = nicht bestimmungsgemäß, d.h. nicht erwünschter Zustand

- „G“ = gefährlich, d.h. ein Zustand welcher einen irreparablen Defekt einer Komponente der Anlage nach sich ziehen kann.<sup>3</sup>

Diese Klassifizierung der Situationen mit Attributen veranschaulicht das Ergebnis der Situationstabelle und dient zur einfacheren Auswertung des späteren Modells. Das Ventil kann sowohl erwünschte Zustände (Attribut B) wie auch unerwünschte Zustände (Attribut N) einnehmen. Tabelle 5 zeigt die Betriebszustände des Ventils:

ZUSTANDS-BEDINGUNGEN	ZUSTAND	ATTRIBUTE
$p_{A0} = 0$	KEIN DRUCK	B
$p_{A0} = (0,1400]$	ZU	B
$I_A < 0$	AUF	B
$I_A = [-100,0) \wedge$ $p_{AB} = 3$	VERSTOPFT	N
$I_A = [-200,-100) \wedge$ $p_{AB} = 4$	VERSTOPFT	N
$I_A = [-200,-100) \wedge$ $I_B = (0,100]$	LECKT	N

Tabelle 5: Kommentarregeln für das Druckbegrenzungsventil

Das Ergebnis der Modellierung der Einzelkomponente Sicherheitsventil repräsentiert sich in einer Situationstabelle (Tabelle 6), in der alle möglichen Situationen inklusive den gewählten Attributen aufgetragen sind.

NR.	$I_A$	$P_{A0}$	$I_B$	$P_A$ $P_B$	ZUSTAND	ATTRIB
31	1	3	2	3	AUF / LECKT	B / N
32	1	3	2	4	AUF / VERSTOPFT / LECKT	B / N / N
35	1	3	3	3	AUF	B
36	1	3	3	4	AUF / VERSTOPFT	B / N
66	2	3	2	2	AUF	B
67	2	3	2	3	AUF / VERSTOPFT	B / N
68	2	3	2	4	AUF / VERSTOPFT	B / N
73	3	1	1	1	KEIN_ DRUCK	B
86	3	2	1	2	ZU	B
87	3	2	1	3	ZU	B
88	3	2	1	4	ZU	B

<sup>3</sup> Bei sicherheitskritischen Analysen müßte dem gefährlichen Zustand eine andere Bedeutung beigemessen werden, z.B. „G“ = gefährlich für Mensch und Umwelt, nicht nur für die Anlage und deren Komponenten.

Tabelle 6: Situationstabelle des Sicherheitsventils

Die Transitionsmatrix in Tabelle 7 ist ebenso Teil des Ergebnisses und beschreibt das dynamische Verhalten des Ventils. Ein „X“ in der Matrix bezeichnet einen möglichen Übergang von Situation A nach Situation B. Fehlt ein Eintrag in der Matrix, so ist kein Übergang möglich.

	31	32	35	36	66	67	68	73	86	87	88
31		X	X	X	X	X	X				
32		X	X	X	X	X	X				
35		X	X	X	X	X	X				
36		X	X	X	X	X	X				
66		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
67		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
68		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
73					X	X	X	X	X	X	X
86					X	X	X	X	X	X	X
87					X	X	X	X	X	X	X
88					X	X	X	X	X	X	X

Tabelle 7: Transitionsmatrix des Sicherheitsventils

#### 4 Betrachtung des Gesamtsystems

Abbildung A3 zeigt die Systemkomponente, nach welcher ein qualitatives Modell erstellt wurde. Die Systemkomponente setzt sich aus den zuletzt beschriebenen Einzelkomponenten zusammen und besitzt folgende Terminals:

- an Terminal A und B liegen elektrische Signale an, welche das Magnetventil im Injektor ansteuern und die Elektro-Kraftstoff-Pumpe ein- und ausschalten. Diese Ansteuerung erfolgt über das Steuergerät der Einspritzanlage (ECU).
- Terminal C stellt die Verbindung zum Zylinder dar, in den vom Injektor aus eingespritzt wird.

In Abbildung A3 ist eine Verbindung vom Injektor zur Hochdruckpumpe eingezeichnet, welche in der realen Anlage auf diese Art nicht vorhanden ist. Diese Verbindung beschreibt die direkte mechanische Kopplung der Kurbelwelle des Motors mit der Hochdruckpumpe. Diese Kopplung bedeutet, daß die Hochdruckpumpe nur pumpen kann, wenn auch eine Einspritzung erfolgt ist und der Motor läuft.

Das vereinfachte Modell für die Modellbildung und Analyse besteht aus sieben Komponenten. Die übrigen Komponenten wurden aus zwei Gründen nicht berücksichtigt:

- passive Komponenten (z.B. Drucksensor) haben keinen Einfluß auf das Verhalten der Anlage und können vernachlässigt werden.
- jede Komponente zusätzlich erhöht die Komplexität der Anlage und bringt einen stark erhöhten Bedarf an Rechenzeit mit. Um diesen zu vermindern wurde das Modell durch Reduzierung der Anzahl der Komponenten vereinfacht.

#### 5 Ergebnisse der Modellbildung der Dieseleinspritzanlage

Das Ergebnis der Modellierung der Dieseleinspritzanlage präsentiert sich in einer Situationstabelle und einer Transitionsmatrix. In der Situationstabelle sind alle möglichen Kombinationen der einzelnen Intervalle jeder Komponentengröße aufgelistet. Diese Liste umfaßt am konkreten Beispiel der Dieseleinspritzanlage über 3000 verschiedene Systemsituationen. Der Übersichtlichkeit wegen werden einzelne Systemsituationen zusammengefaßt in Betriebszustände, in denen sich die einzelnen Komponenten jeweils befinden. Der Umfang der Zustandstabelle ist somit geringerer und enthält ca. 1000 Einträge. Die Transitionsmatrix enthält alle möglichen Situationsübergänge.

Der Einsatz des Verfahrens für die Online-Untersuchung zur Überwachung und Diagnose laufender Systeme ist prinzipiell denkbar. In diesem Zusammenhang sind aber einige Anpassungen des Modells an das System und die Optimierung einiger SQMA-Werkzeuge nötig.

Zur Darstellung der Ergebnisse wird ein bestimmtes Szenario herausgegriffen und vorgestellt. Im Rahmen dieses Szenarios wird untersucht, in welchem Zustand sich die Anlage bei einem defekten Druckregler befindet. Der Druckregler ist noch im Anfangszustand, obwohl die Hochdruckpumpe die Common Rail mit Kraftstoff füllt. Durch den Rückfluß des Kraftstoffes über den Druckregler zum Tank kann die Hochdruckpumpe keinen erhöhten Druck in der Rail aufbauen.

In der statischen Analyse werden bestimmte Zustände aus der Tabelle gefiltert und dargestellt. Die gefilterten Zustände sind in einer Tabelle abgelegt. Tabelle A1 (im Anhang) zeigt das Ergebnis dieser Betrachtung. Alle Zustände, in denen der Tank voll ist, können ebenfalls für einen halbvollen Tank eingesetzt werden. Aus der Tabelle ist abzulesen, daß auch bei nicht arbeitender Hochdruckpumpe Kraftstoff aus der Rail in den Tank zurückfließen kann. Dieser Zustand ist auf die Speichereigenschaften der Common Rail zurückzuführen. Der Druck in der Rail ist ausreichend für einen Rückfluß des Kraftstoffes über den Druckregler zum Tank. Die statische Analyse liefert also Antwort auf die Frage: „In welchem Zustand befindet sich die Anlage bei einem Defekt oder Ausfall einer Komponente ?“. Weitere Fragen können mit Hilfe der dynamischen Analyse geklärt werden.

Die dynamische Analyse liefert Antwort auf die Fragen: „Wie verhält sich die Anlage bei einem Defekt oder Ausfall einer Komponente, was sind die Folgezustände ?“ oder „Gibt es Zustände, die nur verlassen werden können (Startzustände) und gibt es Zustände, die nur betreten werden können (Endzustände) ?“. Mit Hilfe der Transitionen können die dynamischen Zusammenhänge der Anlage analysiert werden. Das Szenario wird mit Hilfe eines gezeichneten Graphen beschrieben, welcher mögliche Folgezustände darstellt. Der gezeichnete Graph (z.B. der Weg von Zustand A nach Zustand B) beschreibt allerdings nur ein Teilgraph des eigentlichen. Aufgrund der hohen Dichte des Graphen kann es sehr viele Wege von A

nach B geben und ist somit visuell nicht mehr darstellbar. Bei der Bearbeitung des Betriebszustandsgraphen stellte deren Umfang ( $\approx 1000$  Zustände) ein Problem dar. Aus diesem Grunde wurden gleichartige Betriebszustände ( $=B$ ) in Wolken ( $=C$ ) zusammengefaßt.

	TANK	EKP	FILTER	HD-PUMPE	COMMON RAIL	DR-VENT	INJEKTOR
827	HALBV / FLUSS_EKP / REC_INJ / REC_DR	AN / PUMPT	NORMAL	AN / PUMPT_NIED	DR_DEFEKT / DRUCK_BIS_400 / FLUSS_INJ / FLUSS_DR	ZU	EINSPRITZ_ / NIED

Tabelle 8: Alle im Teilgraphen "Druckregler noch im Anfangszustand" enthaltenen Zustände

Aus Tabelle 8 kann der Betriebszustand abgelesen werden, in welchem sich die Komponenten der Anlage bei defektem Druckregler befinden. Dieser defekte Druckregler ist noch im offenen Anfangszustand. Dies hat zur Folge, daß kein hoher Druck in der Rail aufgebaut werden kann.

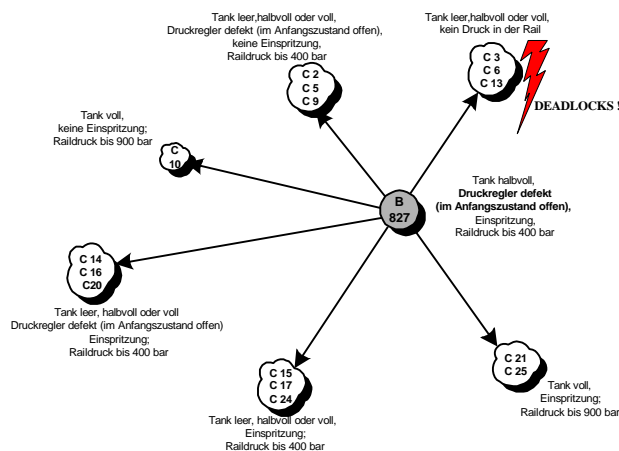


Abbildung 8: Teilgraph "Druckregler noch im Anfangszustand"

Abbildung 8 zeigt den Teilgraphen für den Fall des defekten Druckreglers. Dieser Graph besteht nur aus dem defekten Betriebszustand B827 (Tabelle 8) und aus sehr vielen Wolken. Dies bedeutet, daß das System sehr schnell einen stabilen Endzustand in einer Wolke anstrebt. Ein möglicher Endzustand sind z.B. die Wolken C3, C6 und C13. Diese Wolken unterscheiden sich nur durch den Füllstand des Tanks, welcher entweder leer, halbvoll oder voll sein kann. Diese Wolken sind Deadlocks, sie können nur betreten werden. Da in der Common Rail kein Kraftstoff gespeichert wird, besteht auch keine Möglichkeit zur Einspritzung und die Hochdruckpumpe kann aufgrund der direkten Abhängigkeit zur Einspritzung nicht arbeiten. Aus diesem Grunde können diese Wolken nicht mehr verlassen werden und bilden einen statischen Endzustand.

## 6 Zusammenfassung

Die Anwendung der SQMA-Methode auf die Dieseleinspritzanlage zeigt, daß dieses Modellierungsverfahren *prinzipiell* geeignet ist, um eine rechnergestützte Unterstützung bei der Durchführung von Gefahrenanalysen zu geben. Die SQMA bietet gegenüber anderen Sicherheitsanalysen folgende Vorteile:

- mit dem erstellten Modell wird das *Gesamtsystem* betrachtet und es erfüllt den Anspruch der Vollständigkeit. Bei beliebigen Randbedingungen ist die Auswertung *aller* Verhaltensmöglichkeiten durchführbar.
- die erstellten Komponenten können wiederverwendet werden. Dies spart die Zeit der Modellierung der Einzelkomponenten.
- SQMA-Modellierung ist wirtschaftlicher, da das zur Gefahrenanalyse erstellte Modell auch für die Systemdiagnose eingesetzt werden kann.

Durch die *Unschärfe* der qualitativen Modellierung besitzen auch die Ergebnisse eine gewisse Unsicherheit. Dabei wird aber nie das Prinzip der Vollständigkeit verletzt. Konkret heißt das, es können Systemsituationen errechnet werden, die aus der *worst-case* Ausnutzung der durch die Intervalle vorgegebenen Spielräume möglich sind, die aber in der Praxis nicht auftreten können. Die tatsächlich möglichen Situationen werden aber *alle* errechnet.

Mit der Transitionsanalyse besitzt die SQMA eine leistungsfähige Methode für die Sicherheitsanalyse und Diagnose. Das angepaßte Modell an die reale Anlage der Dieseleinspritzanlage kann unter bestimmten Voraussetzungen für die Prozeßüberwachung eingesetzt werden. Darunter versteht man das Beobachten einer in Betrieb befindlichen Anlage und dem Abschätzen der momentan gültigen Situation bzw. des gültigen Betriebszustandes. Daraus können Schlüsse auf das zukünftige Verhalten gezogen werden, wodurch drohende Gefahren erkannt werden. Außerdem lassen sich im Fehlerfall Rückschlüsse auf die Ursachen ziehen. Das Abschätzen der momentan gültigen Situation erfolgt mit Hilfe der gegebenen Situationen und Transitionen. Die Transitionsanalyse gibt an, wie die Situationen aufeinander abfolgen können. Somit ergibt sich aus der Situationsanalyse und der Transitionsanalyse eine Beschreibung des Verhaltens des technischen Prozesses. Diese Beschreibung ist allerdings mit der Einschränkung verbunden, daß im Modell keine zeitlichen Informationen enthalten sind. Mit Hilfe der Transitionen kann zwar die mögliche Abfolge der Situationen geschätzt werden, aber nicht die Zeit, in welchen diese Situationen aufeinanderfolgen. Als Grundlage für die Überwachung dienen die Systemsituations- und Systemtransitionstabellen der Dieseleinspritzanlage. Das Verhalten des realen Prozesses wird aufgrund der vorhandenen Informationen über Meßwerte und Steuerinformationen mit der System-situations-tabelle verglichen. Eine Abweichung vom Normalbetrieb wird festgestellt wenn

1. sich der Prozeß in Situationen befindet, die explizit mit Attributen als unerwünscht gekennzeichnet sind oder wenn
2. das Verhalten des technischen Prozesses nicht konsistent mit dem vorausgerechneten Modell ist. In diesem Fall liegt ein Defekt vor, der das Verhalten ändert.

Um im letzteren Fall Fehler zu lokalisieren, werden weitere, vorausgerechnete Systemsituations- und transitionstabellen benötigt, in denen bestimmte Ausfälle und Fehler modelliert werden. Läßt sich das gestörte Verhalten des Prozesses durch eines dieser Modelle konsistent beschrei-

ben, so ist eine mögliche Ursache für den Fehler lokalisiert. Der Nachteil dieser Art der Prozeßüberwachung liegt in der Einschränkung von Fehlermodellen. Da jede Fehlermöglichkeit in Form von Systemsituations- und Transitionstabellen abgelegt werden muß, wächst der Speicherbedarf bei vielen Fehlermöglichkeiten sehr stark an.

## 7 Literatur

- [1] Manz Susanne: „Qualitative Modellbildung einer Einspritzanlage für Dieselmotoren“, Diplomarbeit, Institut für Automatisierungs- und Softwaretechnik, 1996
- [2] Fröhlich Peter: „Überwachung verfahrenstechnischer Prozesse unter Verwendung eines qualitativen Modellierungsverfahrens“, Dissertation, Institut für Automatisierungs- und Softwaretechnik 1996.
- [3] Fröhlich Peter: „Situationsbasierte Qualitative Modellbildung am Beispiel einer Anlage zur Reklassifikation von Transformatoren“, Diplomarbeit, Institut für Automatisierungs- und Softwaretechnik 1993.
- [4] Laufenberg Xaver: „Untersuchung von bestehenden Methoden zur Durchführung von Gefahrenanalysen und Prüfung neuer Ansätze aus dem künstlichen Intelligenzbereich des Qualitative Reasoning“, Diplomarbeit, Institut für Automatisierungs- und Softwaretechnik 1992.
- [5] Laufenberg Xaver: „Ein modellbasiertes qualitatives Verfahren für die Gefahrenanalyse“ Dissertation, Institut für Automatisierungs- und Softwaretechnik 1997.
- [6] Biegert Uwe: „Konzeption, Entwurf und Implementierung einer qualitativen Überwachungskomponente für eine Wäschereimaschine“, Diplomarbeit, Institut für Automatisierungs- und Softwaretechnik 1996.
- [7] Bosch: „Kraftfahrtechnisches Taschenbuch“, VDI-Verlag 1995.
- [8] Bosch: „Diesel-Einspritztechnik“, VDI-Verlag 1993.
- [9] „Ein Beitrag zur Entwicklung von Hochdruck-Einspritzsystemen für direkteinspritzende PKW-Dieselmotoren“, Fortschrittberichte VDI, Reihe 12: Verkehrstechnik / Fahrzeugtechnik, Nr. 117., Springer Verlag, 1957

## 8 Abbildungen

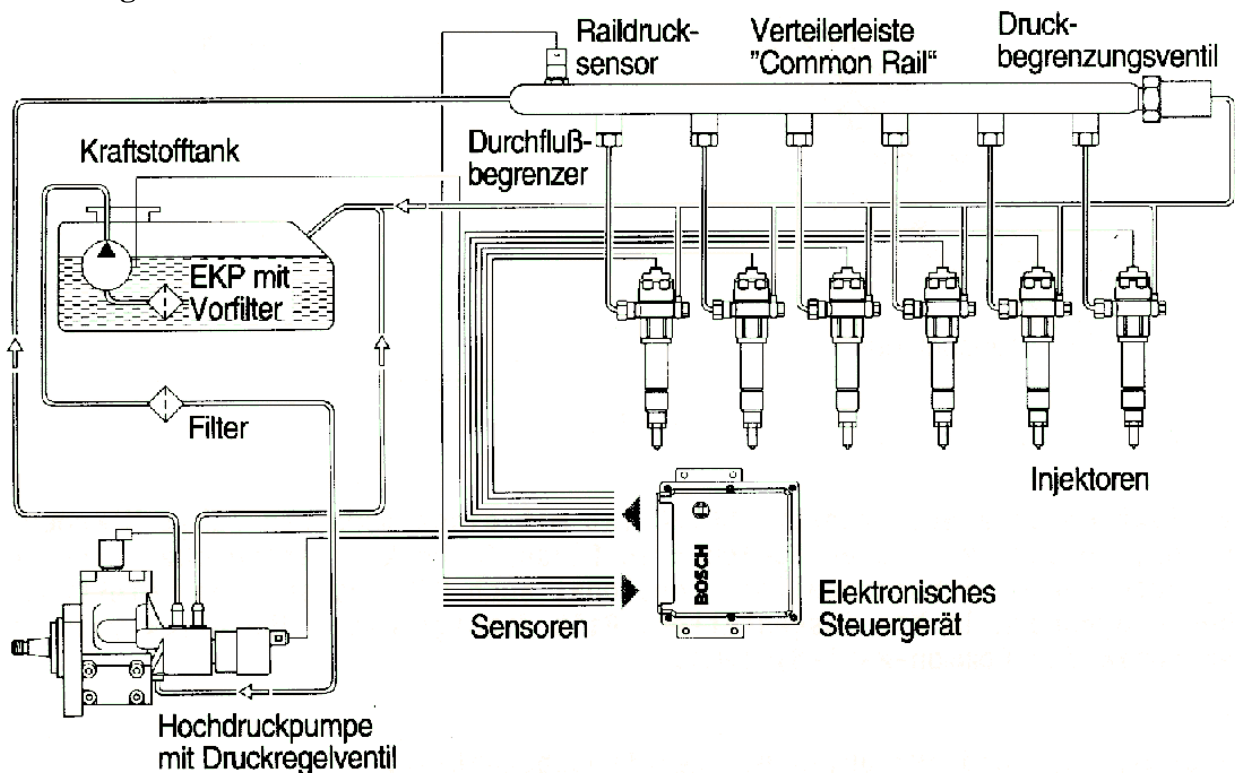


Abbildung A 1: Speichereinspritzsystem "Common Rail"

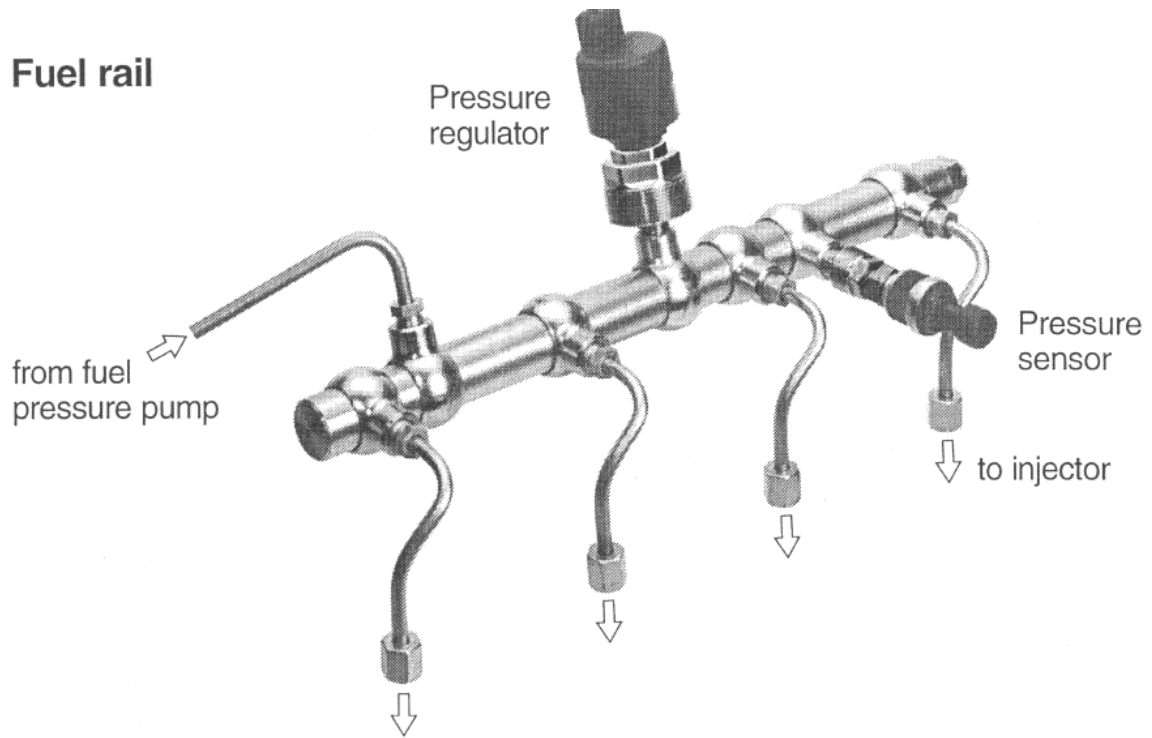


Abbildung A 2: Die Verteilerleit (Common Rail) und deren Anschlüsse

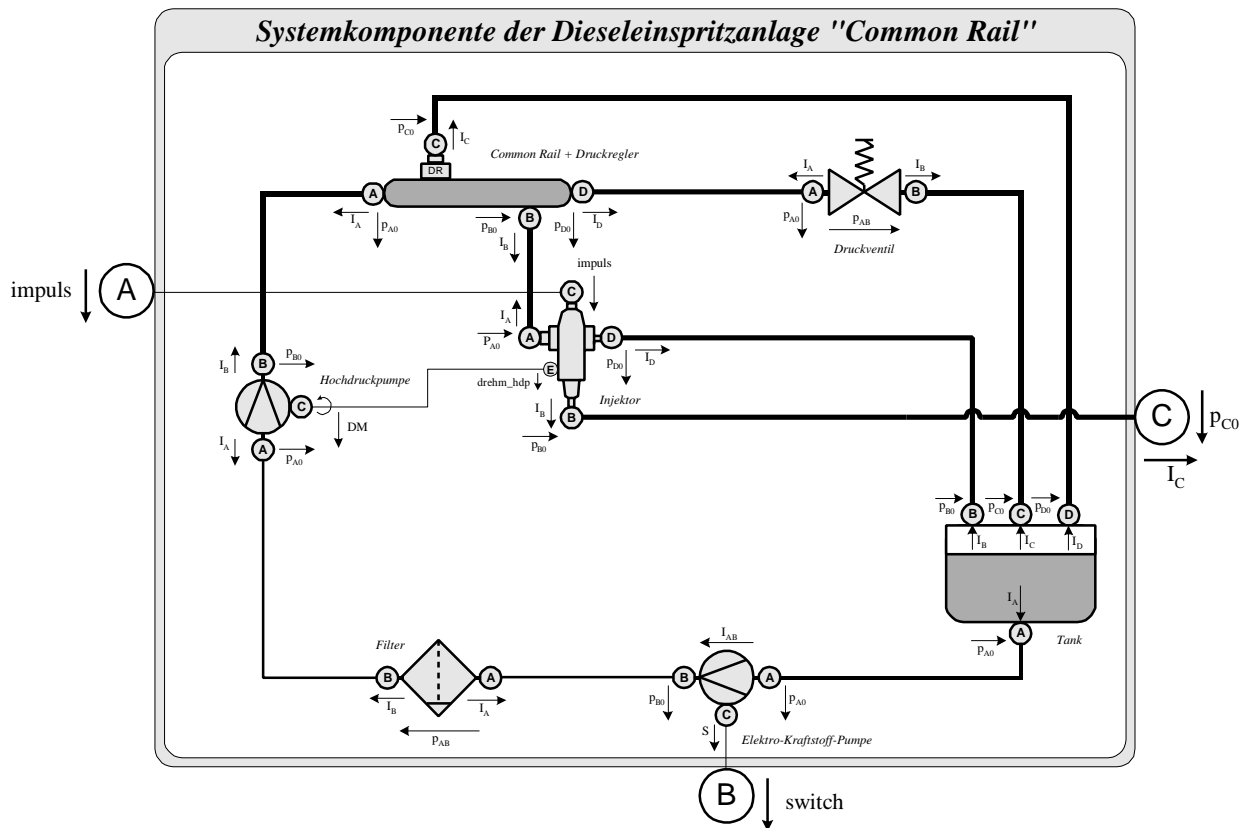


Abbildung A 3: Systemkomponente der Dieseleinspritzanlage

## 9 Tabellen

TANK	EKP	FILTER	HDP	RAIL	DV	INJEKTOR
LEER / REC_DR	AUS / LEER	KEIN_FLUSS	AUS / LEER	DR_DEFEKT / DRUCK_BIS_400 / FLUSS_DR	ZU	KEINE_EINSPRITZ
LEER / REC_DR	AUS / LEER	KEIN_FLUSS	AUS / VENTIL_ZU	DR_DEFEKT / DRUCK_BIS_400 / FLUSS_DR	ZU	KEINE_EINSPRITZ
VOLL / REC_DR	AUS	KEIN_FLUSS	AUS	DR_DEFEKT / DRUCK_BIS_400 / FLUSS_DR	ZU	KEINE_EINSPRITZ
VOLL / REC_DR	AUS	KEIN_FLUSS	AUS / LEER	DR_DEFEKT / DRUCK_BIS_400 / FLUSS_DR	ZU	KEINE_EINSPRITZ
VOLL / REC_DR	AN / DEFEKT	KEIN_FLUSS	AUS / VENTIL_ZU	DR_DEFEKT / DRUCK_BIS_400 / FLUSS_DR	ZU	KEINE_EINSPRITZ
VOLL / REC_DR	AN / DEFEKT	KEIN_FLUSS	AUS	DR_DEFEKT / DRUCK_BIS_400 / FLUSS_DR	ZU	KEINE_EINSPRITZ
LEER / REC_DR	AUS / LEER	KEIN_FLUSS	AUS / LEER	DR_DEFEKT / DRUCK_BIS_400 / FLUSS_DR	ZU	EINSPRITZ_NIED / DEFEKT
LEER / REC_DR	AUS / LEER	KEIN_FLUSS	AUS / VENTIL_ZU	DR_DEFEKT / DRUCK_BIS_400 / FLUSS_DR	ZU	EINSPRITZ_NIED / DEFEKT
VOLL / REC_DR	AUS	KEIN_FLUSS	AUS	DR_DEFEKT / DRUCK_BIS_400 / FLUSS_DR	ZU	EINSPRITZ_NIED / DEFEKT
VOLL / REC_DR / REC_INJ	AUS	KEIN_FLUSS	AN / LEER	DR_DEFEKT / FLUSS_DR DRUCK_BIS_400 / FLUSS_INJ	ZU	EINSPRITZ_NIED
VOLL / REC_DR / REC_INJ	AUS	KEIN_FLUSS	AN / VENTIL_ZU	DR_DEFEKT / FLUSS_DR DRUCK_BIS_400 / FLUSS_INJ	ZU	EINSPRITZ_NIED
LEER / REC_DR	AN / LEER	KEIN_FLUSS	AUS / LEER	DR_DEFEKT / DRUCK_BIS_400 / FLUSS_DR	ZU	EINSPRITZ_NIED / DEFEKT
LEER / REC_DR	AN / LEER	KEIN_FLUSS	AUS / VENTIL_ZU	DR_DEFEKT / DRUCK_BIS_400 / FLUSS_DR	ZU	EINSPRITZ_NIED / DEFEKT
VOLL / REC_DR	AN / DEFEKT	KEIN_FLUSS	AUS	DR_DEFEKT / DRUCK_BIS_400 / FLUSS_DR	ZU	EINSPRITZ_NIED / DEFEKT
VOLL / REC_DR	AN / DEFEKT	KEIN_FLUSS	AN / LEER	DR_DEFEKT / FLUSS_DR DRUCK_BIS_400 / FLUSS_INJ	ZU	EINSPRITZ_NIED
VOLL / REC_INJ / REC_DR	AN / DEFEKT	KEIN_FLUSS	AN / VENTIL_ZU	DR_DEFEKT / FLUSS_DR DRUCK_BIS_400 / FLUSS_INJ	ZU	EINSPRITZ_NIED
VOLL / FLUSS_EKP / REC_INJ / REC_DR	AN / PUMPT	LECKT	AN / PUMPT_NIED	DR_DEFEKT / FLUSS_DR DRUCK_BIS_400 / FLUSS_INJ	ZU	EINSPRITZ_NIED
VOLL / FLUSS_EKP / REC_INJ / REC_DR	AN / PUMPT	VERSTOPFT / LECKT	AN / PUMPT_NIED	DR_DEFEKT / FLUSS_DR DRUCK_BIS_400 / FLUSS_INJ	ZU	EINSPRITZ_NIED
VOLL / FLUSS_EKP / REC_INJ / REC_DR	AN / PUMPT	NORMAL	AN / PUMPT_NIED	DR_DEFEKT / FLUSS_DR DRUCK_BIS_400 / FLUSS_INJ	ZU	EINSPRITZ_NIED
VOLL / FLUSS_EKP / REC_INJ / REC_DR	AN / PUMPT	VERSTOPFT	AN / PUMPT_NIED	DR_DEFEKT / FLUSS_DR DRUCK_BIS_400 / FLUSS_INJ	ZU	EINSPRITZ_NIED

Tabelle A 1: Zustandstabelle, wenn Druckregler noch im Anfangszustand