

Leseprobe aus Kapitel 12 ‚Pneumatik/Hydraulik‘ des Buchs
‚Strukturbildung und Simulation technischer Systeme‘
Weitere Informationen zum Buch finden Sie unter

strukturbildung-simulation.de

Pneumatische Druck-Verstärker werden durch Düse-Prallplatte-Anordnungen realisiert. Dieses System kann keine nennenswerten Luftströme abgeben. Deshalb muss ein Druckfolger nachgeschaltet werden. Um dem gesamten System eine definierte Druck-Verstärkung zu geben, wird es durch einen passiven Druck-Teiler gegengekoppelt. Damit ähnelt das Verfahren dem vorher behandelten elektronischen Operations-Verstärker und dem mechanischen Kreisell.

12.8 Pneumatische Verstärker

Zur Realisierung von Technik werden meist Verstärker benötigt. Im der Hydraulik sind dies z.B. Bremskraft-Verstärker oder die Lenkhilfe beim Auto. Ziel dieses Abschnitts ist die Simulation pneumatischer Verstärker. Als Differenzdruck-Verstärker sind sie das Analogon zu elektronischen Operationsverstärkern. Durch Gegenkopplung kann ihnen die gewünschte Verstärkung und das Zeitverhalten gegeben werden.

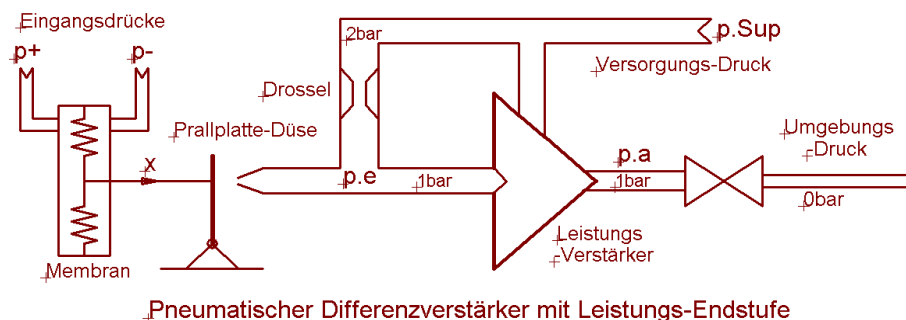


Abb. 12-82 Der Aufbau eines Pneumatischen Operations-Verstärkers: Eine Druckdifferenz steuert über eine Prallplatte die Öffnung einer Düse. Mittels Drossel entsteht so eine gesteuerte Druckteilung und Differenzdruck-Verstärkung. Da der Teiler aber kaum belastbar ist, muss eine Leistungs-Endstufe nachgeschaltet werden. Die Baugruppen des Systems werden nachfolgend erklärt und simuliert.

12.9.1 Pneumatischer Leistungs-Verstärker

Die bisher besprochenen Druckverstärker durften nicht durch einen Ausgangsstrom $\mathbf{m \cdot a/t = \rho \cdot V \cdot a/t}$ belastet werden, denn das hätte die Druckverstärkung verringert. Im Allgemeinen ist aber Belastbarkeit gefordert. Daher wird ein Leistungs-Verstärker benötigt. Eine weitere Druckverstärkung muss dieser nicht unbedingt haben.

Druckfolger mit Dreipunkt-Regler

Die hier beschriebene Konstruktion vergleicht ihren Ausgangsdruck $p.a$ mit dem Eingangsdruck $p.e$. Ist $p.a < p.e$, öffnet das Ventil zum Versorgungsdruck $p.Sup$, sodass $p.a$ steigt. Ist $p.a > p.e$, so öffnet ein Ventil zum Umgebungsdruck, sodass $p.a$ sinkt. Der Druckfolger mit Speicher bildet einen Regelkreis mit Dreipunkt-Regler.

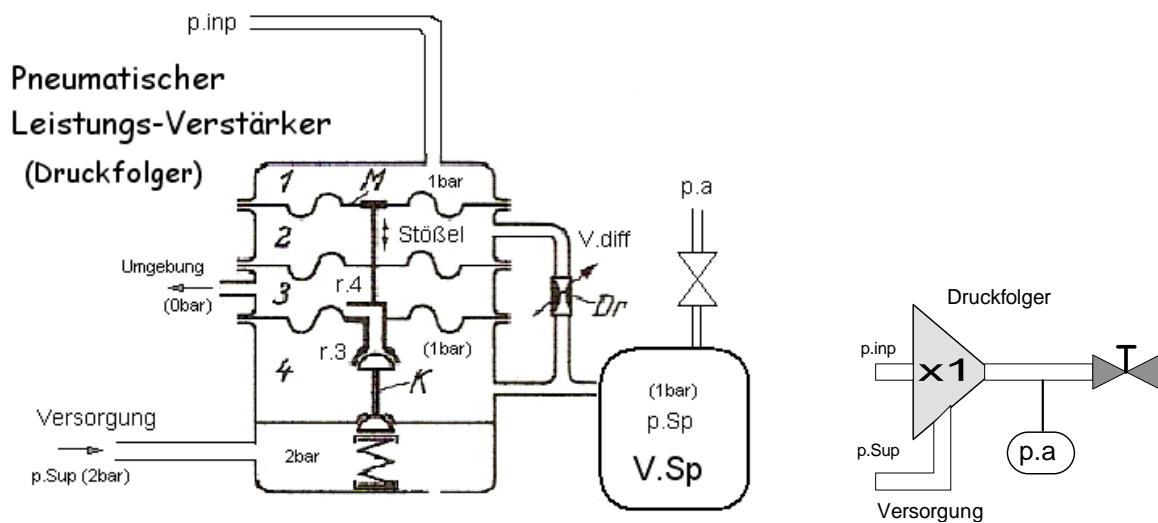
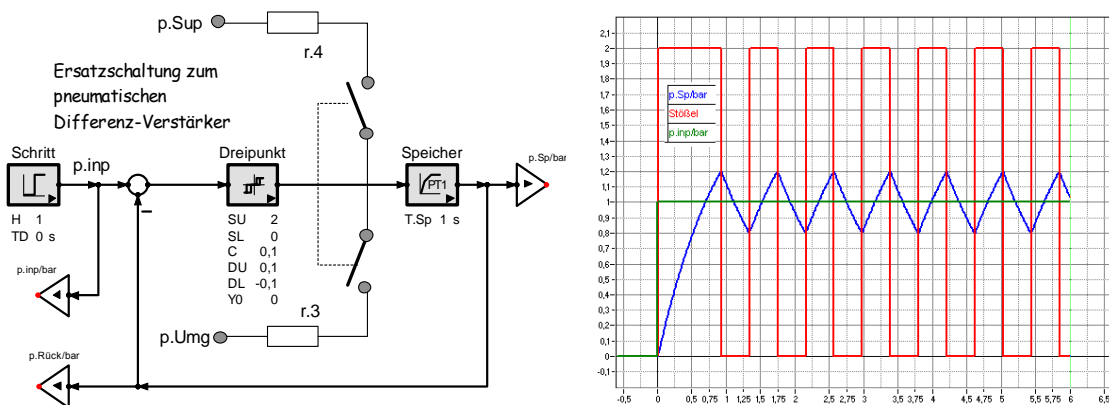


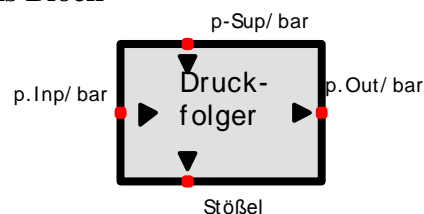
Abb. 12-83 Pneumatischer Leistungs-Verstärker mit 3 Membranen: nicht-blasend. Die Anordnung ist ein Dreipunktregler, der eine Pulsbreiten-Modulation erzeugt: Ist der Speicherdruck $p_{.Sp}$ kleiner als der Eingangsdruck $p_{.i}$, so wird der Speicher über das Ventil $r_{.3}$ mit der Versorgung verbunden. Der Druck steigt. Ist der Speicherdruck $p_{.Sp}$ größer als der Eingangsdruck $p_{.i}$, so wird der Speicher über das Ventil $r_{.4}$ mit der Umgebung verbunden. Der Druck sinkt. Stimmt der Speicherdruck mit dem Eingangsdruck $p_{.i}$ überein, so sind beide Ventile geschlossen.

Die Ersatzschaltung des Druckfolgers



Struktur 12-47 Verstärker\8 Druckfolger: Ersatzschaltung der pneumatischen Leistungsstufe: Die Druckverstärkung wird durch Pulsbreiten-Modulation auf 1 geregelt. Dadurch wird der mittlere Ausgangsdruck fast unabhängig von der Belastung. (Die Anordnung entspricht einem symmetrischen Emitterfolger mit Transistoren oder dem Operationsverstärker als Impedanzwandler.)

Der Druckfolger als Block

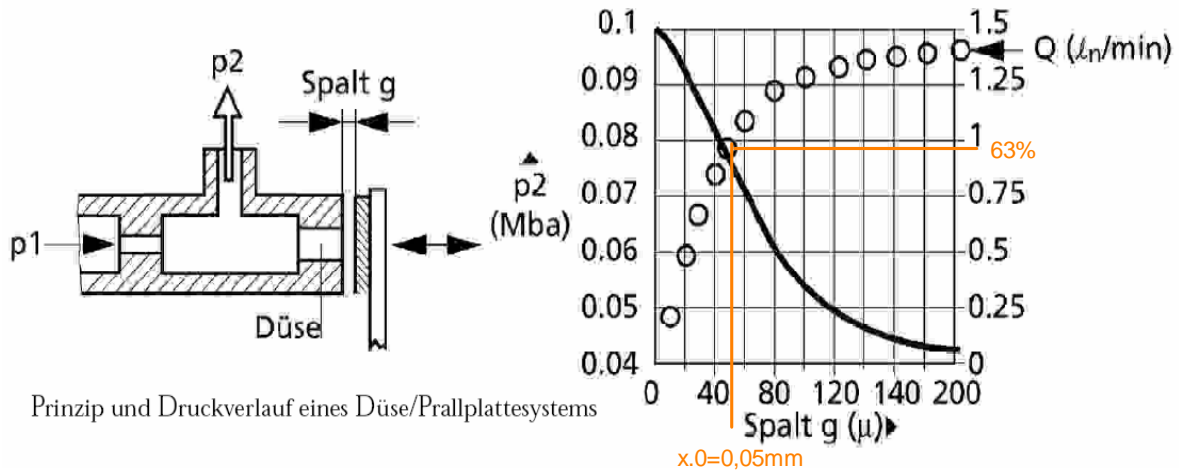


Struktur 12-48 Verstärker\Druckfolger ... als Block

12.9.2 Steuerbarer Druckteiler (Düse-Prallplatte)

Messung der Druckteilungs-Steuerung eines Düse-Prallplatten-Systems:

Variation der Druckteilung durch Steuerung der Düsenöffnung über den Prallplattenabstand x



Prinzip und Druckverlauf eines Düse/Prallplattensystems

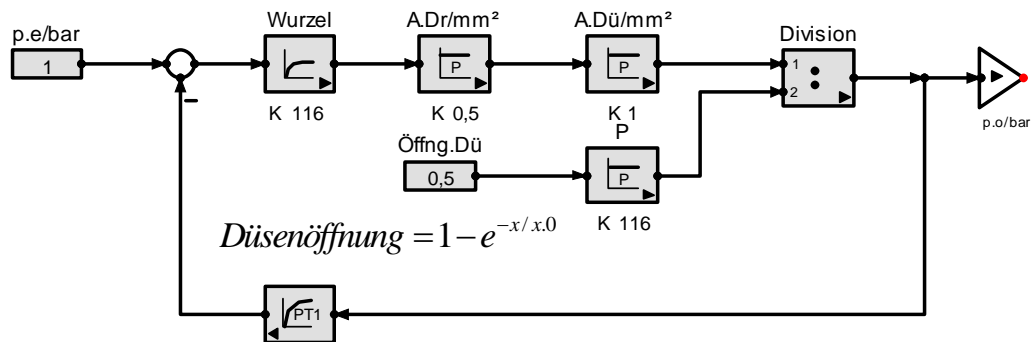
Abb. 12-84 Prallplatten-Kennlinie. rechts: Messwerte und die Bestimmung des Ruheabstands $x.0$

Berechnung der Druckteilungs-Steuerung

Bei der Ventilberechnung wurde gezeigt, wie sich der Medienstrom durch die Düsenöffnung steuern lässt. Für das Medium Luft gilt:

$$v = \text{Öffnung} \cdot 116 \text{ m/s} \cdot \sqrt{\Delta p} \quad \text{und umgekehrt} \quad \sqrt{\Delta p} = v / (116 \text{ m/s} \cdot \text{Öffnung}) \rightarrow \Delta p$$

Diese Funktionen verwenden wir nun zur Berechnung des Zusammenhangs zwischen Düsenöffnung und Druckteilung beim Düse-Prallplatte-System:



Düsenöffnung und Druckteilung

Struktur 12-49 Düsen-Öffnung: Berechnung der gemessenen Druckteilung. Übereinstimmung wird erzielt mit $A,Dr = A,Dü/2$ und einer Düsenöffnung, die mit dem Prallplattenabstand nach einer e-Funktion zusammen hängt.

Dimensionierung der Vordrossel

Wie oben abgebildet, sinkt der Düsendruck bei völlig geöffneter Düse auf ca. 40% des Eingangsdrucks ab. Die Simulation liefert den gleichen Wert, wenn der **Drosselquerschnitt A.Dr** die Hälfte des **Düsenquerschnitts A.Dü** hat. Wir möchten den Minimaldruck noch weiter absenken. Dazu muss der Vordrossel-Querschnitt kleiner als $A,Dü/2$ sein. Wir wählen

$$A,Dr = A,Dü/3$$

Gemäß Simulation sinkt der Düsendruck damit bei **völlig geöffneter Düse bis auf 28%** des Eingangsdrucks ab. In unserem Beispiel ist

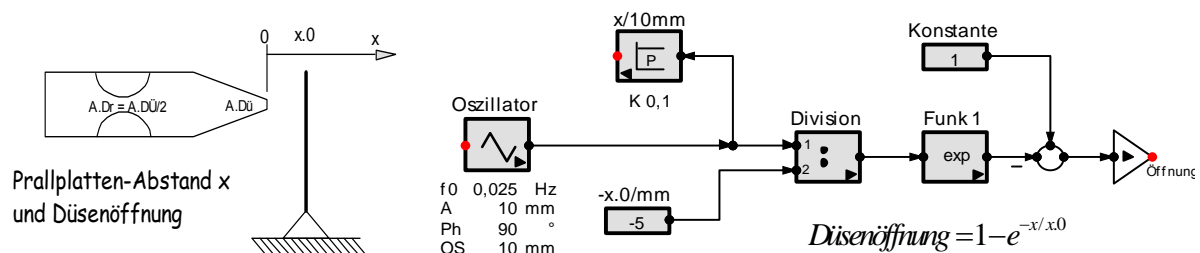
$$A.Dü = 3mm^2 \rightarrow A.Dr = 1mm^2.$$

Davon wird im Folgenden immer ausgegangen.

Berechnung der Düsenöffnung

Um die Düse als öffnungs-gesteuertes Ventil berechnen zu können, müssen wir den Zusammenhang zwischen **Düsenöffnung** und **Prallplatten-Abstand x** kennen. Dazu variieren wir x in der Simulation. Übereinstimmung zwischen der gemessenen Druckteilung und der Simulation erhalten wir, wenn die Düsenöffnung DüÖf nach einer degressiv aufklingenden Exponentialfunktion von x abhängt:

$$DüÖf = \frac{V/t.Dü}{V/t.max} = 1 - e^{-x/x.0}$$



Struktur 12-50 Öffnungs-Funktion einer Drossel:

Düsendruck und Prallplatten-Abstand

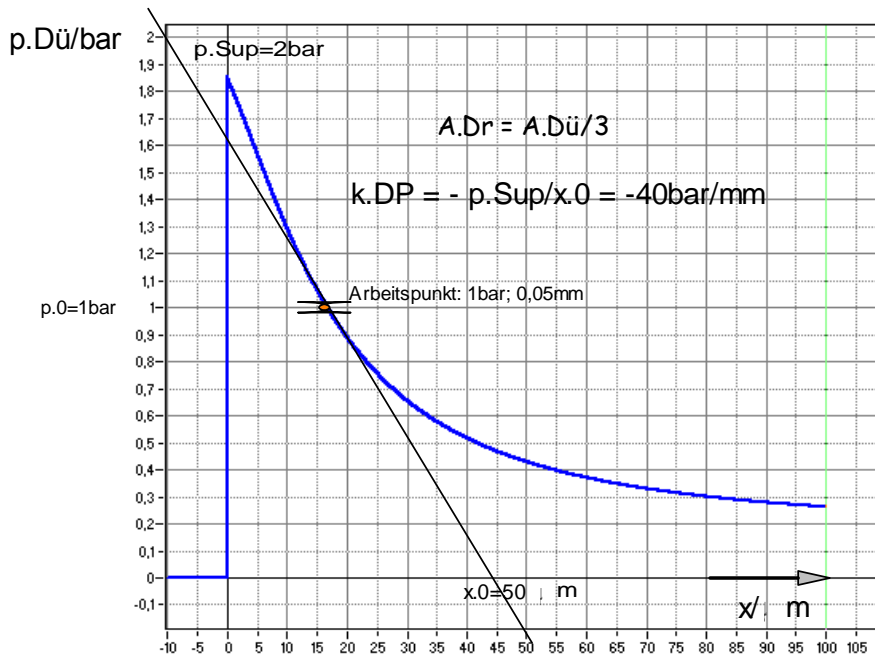
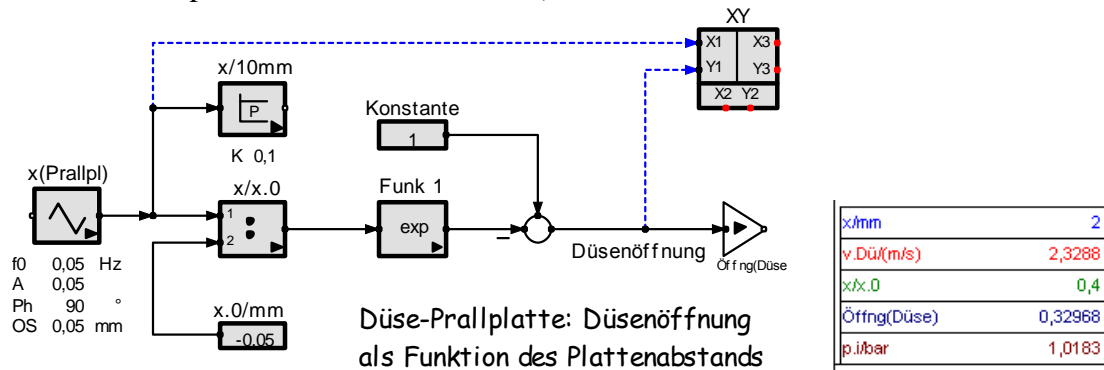


Abb. 12-85 Simulierter Düsendruck als Funktion des Prallplatten-Abstands. Der Arbeitspunkt liegt beim halben Versorgungsdruck, hier 1bar und beim halben Ruheabstand, hier 0,025mm. Die Steigung der Kennlinie im Arbeitspunkt nennen wir Düsenkonstante $k.Dü$ – hier -40bar/mm. Sie ist die Grundlage zur linearisierten Berechnung von Druckverstärkern

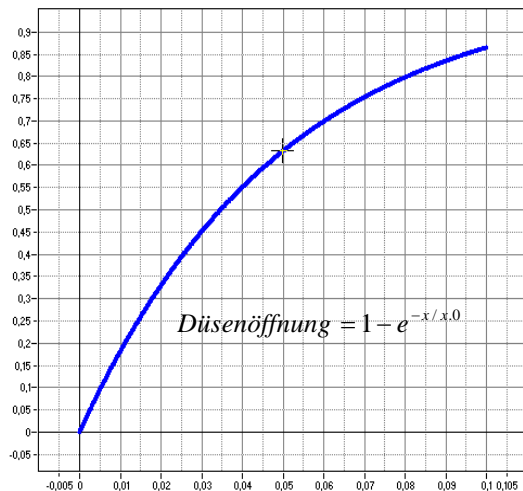
Justierung des Prallplatten-Abstands $x.0$

In den folgenden Simulationen soll die Düsenöffnung nach der genannten e-Funktion berechnet werden. Dazu wird der **Nennabstand $x.0$** der Prallplatte benötigt. Bei $x = x.0$ beträgt die **Düsenöffnung 63%**. Kennzeichen ist, dass der **Ausgangsdruck $p.Dü$ bei diesem Abstand auf 63% des Eingangsdrucks** gesunken ist. Daraus schließen wir auf die genannte e-Funktion.

Aus obiger Abbildung entnehmen wir $x.0 = 0,05\text{mm}$. Bei so kleinen Abständen wird die Empfindlichkeit des Systems extrem hoch. Wir wählen daher für unser Beispiel den zehnfachen Prallplatten-Abstand: **$x.0 = 0,5\text{mm}$** .



Struktur 12-51 Öffnungs-Funktion: Berechnung der Düsenöffnung nach einer degressiv aufklingenden e-Funktion.



Düse-Prallplatte: Düsenöffnung als Funktion des Plattenabstands

Abb. 12-86 Der für die Berechnung der Düse als steuerbares Ventil benötigte Zusammenhang zwischen Prallplatten-Abstand und Düsenöffnung

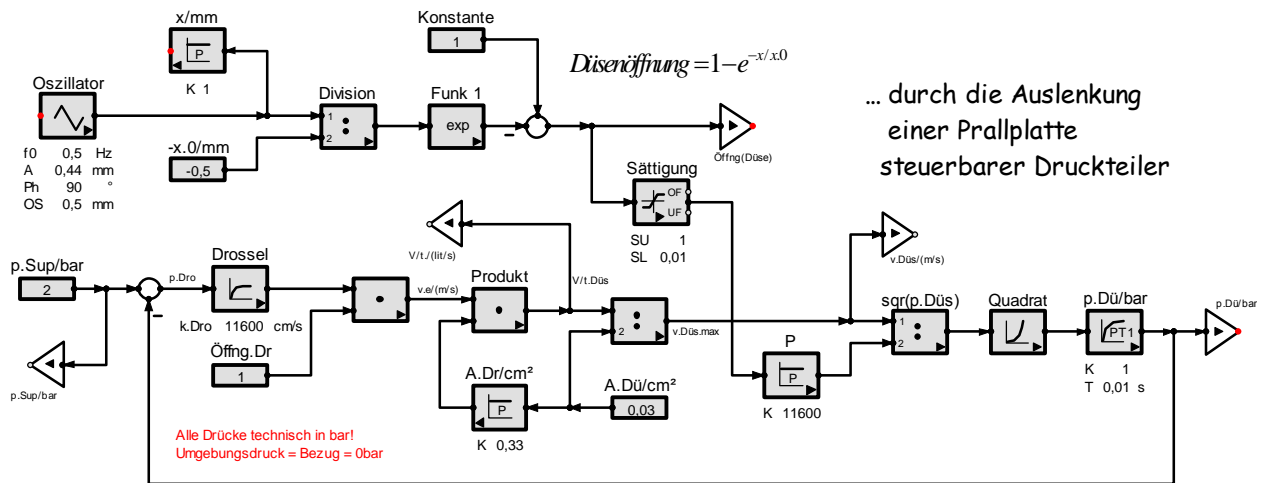
Arbeitspunkt-Einstellung

Zur Berechnung eines nichtlinearen Systems, das in zwei Richtungen angesteuert werden soll, muss ein Arbeitspunkt eingestellt werden. Wenn gleichmäßige Aussteuerung in beide Richtungen gefordert ist, legt man ihn durch Positionierung des Plattenabstand x in Mitte zwischen die Aussteuer-Grenzen - hier nach oben der Versorgungsdruck **$p.Sup = 2\text{bar}$** und nach unten der Umgebungsdruck **$p.Umg = 0\text{bar}$** .

Wir wählen **$p.0 = p.Sup/2$ – hier 1bar** (alles technische Drücke)

$p.0 = p.Sup/2$ wird in allen folgenden Beispielen eingestellt. Aus der Simulation ergibt sich, dass der **Prallplattenabstand dann 70% des Nennabstandes $x.0$ ist, hier also 0,035mm**.

Struktur des Prallplatten-gesteuerten Druckteilers



Struktur 12-52 Düsenöffnung und Druckteilung: Die oben abgebildete, in etwa symmetrische Druckvariation ergibt sich, wenn die Vordrossel 1/3 des Düsen-Querschnitts hat.

Simulations-Ergebnisse

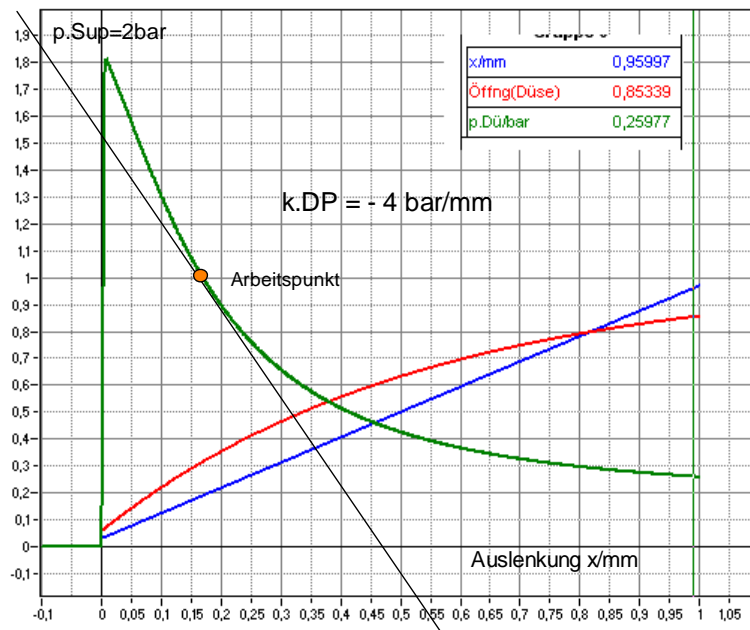


Abb. 12-87 Simulation des Düsendrucks p.Dü bei Variation des Prallplatten-Abstands x. Die Steigung der Tangente im Arbeitspunkt ($p.Dü = p.Sup/2$) beschreibt die mittlere Empfindlichkeit k.DP des Düse-Prallplatte-Systems. Hier: $k.DP = - 4 \text{ bar/mm}$.

Bestimmung der Düse-Prallplatten-Konstanten k_{DP}

k_{DP} beschreibt die Empfindlichkeit k_{DP} des Düse-Prallplatte Systems:

Name der Konstanten k_{DP}

-> Definition = Messvorschrift $k_{DP} = \Delta p_{Dü} / \Delta x$

-> Berechnung aus den Parametern des Systems oder Messung.

Die Düsenkonstante errechnet sich hier aus dem Versorgungsdruck p_{Sup} und dem Nennabstand x_0 der Prallplatte:

$$k_{DP} = \Delta p_{Dü} / \Delta x \approx -p_{Sup} / x_0$$

Das Minuszeichen beschreibt den sinkenden Druck mit steigendem Plattenabstand.

Zahlenwert: $p_{Sup} = 2\text{bar}$; $x_0 = 0,5\text{mm}$ -> $k_{DP} \approx -4\text{bar/mm}$

Für diesen Arbeitspunkt ist der Plattenabstand von der Düse, wie vorher gezeigt, $37\% \cdot x_0$, hier etwa $0,18\text{mm}$.

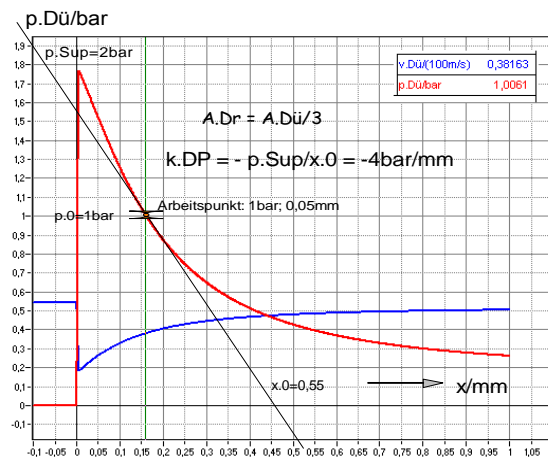
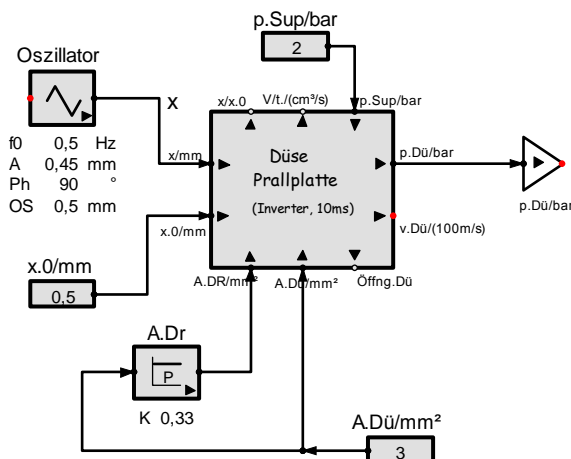
Zur Kontrolle der analytischen Berechnung der **Düse-Prallplatten-Konstante k_{DP}** wurde an die simulierte Funktion $p_{Dü}(x)$ eine Tangente an den Druckverlauf im Arbeitspunkt gelegt. Das Ergebnis ist wie berechnet:

$$k_{DP} \approx -4\text{bar/mm}$$

Hinweis zur Auswahl der Düsengröße

Die Größe von Vordrossel und der Düse bestimmen den Luftverbrauch des Druckteilers und damit auch seine Belastbarkeit. Die Düse soll einerseits möglichst klein sein, um den Luftverbrauch klein zu halten, andererseits aber so groß, dass die Austrittsgeschwindigkeit der Luft immer kleiner als die Schallgeschwindigkeit (343m/s) bleibt. Daher ist die **Strömungsgeschwindigkeit** an der Düse $v_{Dü}$ eine Kontrollgröße bei unseren Simulationen.

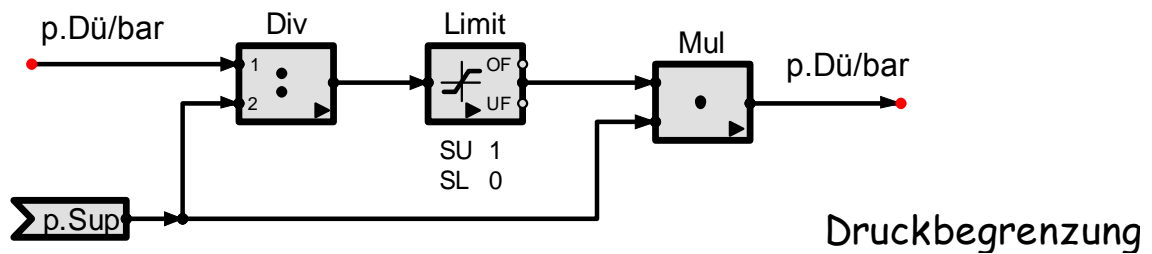
Düse-Prallplatte als Anwender-Block



Struktur 12-53 Düse-Prallplatte mit Block: Der Block des Systems Düse-Prallplatte wird für nachfolgende Simulationen benötigt. Eingangsgröße ist der Prallplattenabstand x , Ausgangsgröße ist der Düsendruck $p_{Dü}$. Die übrigen Eingangsgrößen sind System-Parameter. Die übrigen Ausgangsgrößen sind Kontroll-Parameter zur Information über den Zustand von Düse und Prallplatte.

Druckbegrenzung

Die bisher benutzte Simulation der Düse-Prallplatte hatte noch keine Begrenzung des Düsendrucks, der nur zwischen 0 und dem **Versorgungsdruck p.Sup** variieren kann. Das wird jetzt nachgeholt:



Struktur 12-54 Pneumatik\Pneumatische Verstärker\1 Druckbegrenzung: mittels Limit-Funktion

Diese Druckbegrenzung ist in dem Block des Düse-Prallplatten-Systems enthalten.