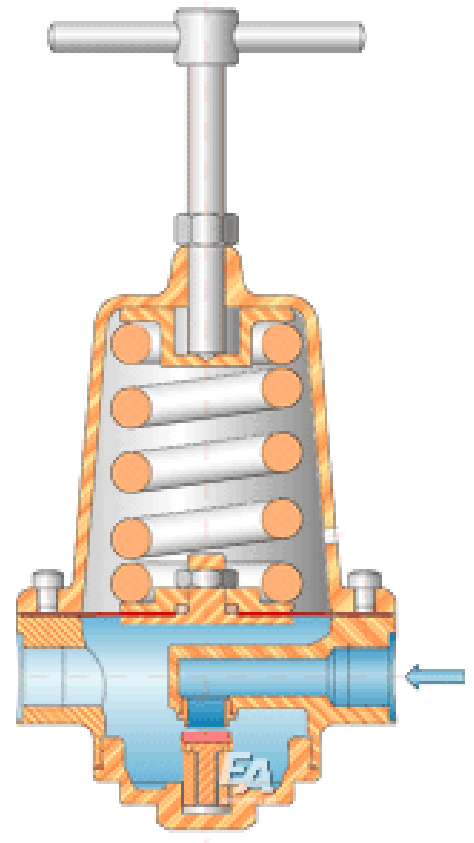


Anhang 1

Simulation

Vorstudie Juli 2004

Energienutzung in geschlossenen Wasserversorgungssystemen



ausgearbeitet durch
Bruno Schindelholz, Thomas Schaefroth

stiftung revita am Ökozentrum Langenbruck
www.revita.ch

Inhalt

1	Zusammenfassung	5
2	Einleitung	6
3	Ziel der Simulation	6
3.1	Allgemeines	6
3.2	Systemanforderungen	6
3.3	Simulation der einzelnen Komponenten.....	6
3.4	Simulation Gesamtsystem.....	6
4	Aufbau eines geschlossenen Systems für variablen Durchfluss	7
4.1	Übersicht	7
4.2	Funktionsweise.....	7
4.3	Risikoanalyse	8
4.3.1	Die Turbine blockiert.....	8
4.3.2	Die Turbine dreht hoch (Fall 1).....	9
4.3.3	Die Turbine dreht hoch (Fall 2).....	9
4.3.4	Der Druckabfall über die Turbine ist zu gross.....	9
4.3.5	Der Betreiber stellt einen falschen Druck ein.....	9
5	Simulation des Systems	10
5.1	Ziel der Simulation.....	10
5.2	Simulationsmodelle der Komponenten.....	10
5.2.1	Umrechnung piezometrische Höhe -> Druck.....	10
5.2.2	Druckleitung.....	10
5.2.3	Gesteuertes Ventil	12
5.2.4	Druckreduzierventil	14
5.2.5	Last	14
5.2.6	Modell Druckturbine "Theorie".....	15
5.2.7	Modell Rohrturbine "Tissot".....	18
5.2.8	Modell Kreiskolbenturbine "Theorie".....	20
5.3	Simulation.....	22
5.3.1	Druckleitung.....	22
5.3.2	Druckreduzierventil	24
5.3.3	MPT (Maximum Power Tracker)	26
5.3.4	Simulation Öffnen des Ventils Turbine.....	34
5.3.5	Simulation pos. Lastwechsel (Turbine "Tissot").....	37
5.3.6	Simulation neg. Lastwechsel (Turbine "Tissot").....	40
5.3.7	Simulation el. Netzausfall (Turbine "Tissot").....	43
6	Mögliche Turbinen	46
6.1	Rohrturbine "Tissot".....	46
6.2	Rohrturbine "ecopower"	46
6.3	Rohrturbine "Axent"	46

Projekt Nr. : 100482 Vertrags Nr. : 150590	Programm Kleinwasserkraftwerke Kleinwasserkraftwerke in geschlossenen Systemen <i>stiftung revita</i> , Juli 2004	Mit Unterstützung des Bundesamtes für Energie Seite 3
---	---	---

6.4	Kreiskolben-Turbine	46
7	Literaturangaben.....	47
8	Abkürzungen.....	47

Tabellen:

Tabelle 1 : Bedeutung der Gewichtungen.....	8
Tabelle 2 : Daten des Systems Druckleitung mit Ventil	22
Tabelle 3 : Daten des Systems Druckleitung mit Druckreduzierventil	24
Tabelle 4 : Funktionsweise MPT	26
Tabelle 5 : Daten Simulation Öffnen Ventil Turbine.....	34
Tabelle 6 : Daten Simulation pos. Lastwechsel	37
Tabelle 7 : Daten Simulation negativer Lastwechsel	40
Tabelle 8 : Daten Simulation el. Netzausfall	43

Formeln:

Formel 1 : Umrechnung piezometrische Höhe in Druck	10
Formel 2 : Gleichung Druckleitung.....	10
Formel 3 : Umgeschriebene Gleichung Druckleitung	11
Formel 4 : Druckabfall Ventil.....	12
Formel 5 : Schliessen Ventil	13
Formel 6 : Formel Druckreduzierventil.....	14
Formel 7 : Analytisches Modell Druckturbine.....	15

Abbildungen:

Abbildung 1 : Blockschema Druckreduzierung mit Energierückgewinnung	7
Abbildung 2 : Simulationsmodell Teilstück Δx Druckleitung	11
Abbildung 3 : Simulationsmodell Druckleitung	11
Abbildung 4 : Kennlinien A_v/A_{v0} und C_d/C_{d0}	12
Abbildung 5 : Gesteuertes Ventil	12
Abbildung 6 : Simulationsmodell gesteuertes Ventil	13
Abbildung 7 : Aufbau Druckreduzierventil (Firma End-Armaturen)	14
Abbildung 8 : Simulationsmodell Druckreduzierventil	14
Abbildung 9 : Kennfelder Druckturbine "Theorie" $M, P, dP, \eta = f(Q, n)$	15
Abbildung 10 : Modell $M = f(Q, n)$ Druckturbine "Theorie"	16
Abbildung 11 : Modell $H = f(Q, n)$ Druckturbine "Theorie"	16
Abbildung 12 : Simulationsmodell Turbine + Generator mit n-Regler und I-Regler	16
Abbildung 13 : Regelverhalten Drehzahlsprung Druckturbine "Theorie"	17
Abbildung 14 : Muscheldiagramm Rohrturbine "Tissot"	18
Abbildung 15 : Kennlinie $M, P, dP, \eta = f(Q, n)$	19
Abbildung 16 : Regelverhalten Drehzahlsprung Rohrturbine "Tissot"	19
Abbildung 17 : Kennlinie $M, P, dP, \eta = f(Q, n)$	20
Abbildung 18 : Regelverhalten Drehzahlsprung Kreiskolbenturbine	21
Abbildung 19 : System Druckleitung mit Ventil	22
Abbildung 20 : Simulationsmodell Druckleitung mit Ventil	22
Abbildung 21 : Simulation einer Druckleitung beim Schliessen des Ventils	23
Abbildung 22 : System Druckleitung mit Druckreduzierventil	24
Abbildung 23 : Simulationsmodell Druckleitung mit Druckreduzierventil	24
Abbildung 24 : Simulation einer Druckleitung mit Druckreduzierventil	25
Abbildung 25 : Simulationsmodell Maximum Power Tracker (MPT)	27
Abbildung 26 : Simulationsmodell MPT mit Druckturbine "Theorie"	28
Abbildung 27 : Verhalten MPT "Theoretische" Turbine, pos. Durchflussänderung	29
Abbildung 28 : Verhalten MPT "Theoretische Turbine", neg. Durchflussänderung	29
Abbildung 29 : Verhalten MPT "Tissot" Turbine, pos. Durchflussänderung	30
Abbildung 30 : Verhalten MPT "Tissot" Turbine, neg. Durchflussänderung	31
Abbildung 31 : Verhalten MPT Kreiskolben-Turbine, pos. Durchflussänderung	32
Abbildung 32 : Verhalten MPT Kreiskolben-Turbine, neg. Durchflussänderung	33
Abbildung 33 : Blockschema Druckreduzierung mit Energierückgewinnung	34
Abbildung 34 : Simulationsmodell Gesamtsystem Öffnen Ventil Turbine	35
Abbildung 35 : Öffnen des Ventils Turbine	36
Abbildung 36 : Blockschema Druckreduzierung mit Energierückgewinnung	37
Abbildung 37 : Simulationsmodell Gesamtsystem positiver Lastwechsel	38
Abbildung 38 : pos. Lastwechsel Turbine "Tissot"	39
Abbildung 39 : Blockschema Druckreduzierung mit Energierückgewinnung	40
Abbildung 40 : Simulationsmodell Gesamtsystem negativer Lastwechsel	41
Abbildung 41 : neg. Lastwechsel Turbine "Tissot"	42
Abbildung 42 : Blockschema Druckreduzierung mit Energierückgewinnung	43
Abbildung 43 : Simulationsmodell Gesamtsystem el. Netzausfall	44
Abbildung 44 : el. Netzausfall Turbine "Tissot"	45

Diese Arbeit ist mit Unterstützung des Bundesamtes für Energie entstanden. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Projekt Nr. : 100482 Vertrags Nr. : 150590	Programm Kleinwasserkraftwerke Kleinwasserkraftwerke in geschlossenen Systemen <i>stiftung revita</i> , Juli 2004	Mit Unterstützung des Bundesamtes für Energie Seite 5
---	---	---

1 Zusammenfassung

Der Anhang der Vorstudie befasst sich mit der Simulation des Systems. Die Simulationsmodelle der einzelnen Komponenten konnten erfolgreich modelliert werden.

Es war schwierig die Kennlinien von dem Komponenten wie Ventile und Druckreduzierventile zu erhalten. Dies hat dazu geführt, dass zum Teil die Regelparameter noch nicht den effektiven Werten in der Praxis entsprechen. Es wäre deshalb sinnvoll bei einer bestehenden Druckreduzierstation, den Druckverlauf und den Durchfluss im Ortsnetz zu messen. Die Regelparameter könnten dann anhand der Messresultate angepasst werden.

Das Simulationsmodell des Maximum Power Tracker muss ev. noch verbessert werden, da die Stabilität noch nicht optimal ist (Die Einstellung der Regelparameter ist noch zu aufwendig).

Bei der Modellierung der Turbine konnte einzig auf das Muscheldiagramm der "Tissot" Turbine zurückgegriffen werden. Handelsübliche Turbinen werden meistens mit konstanter Drehzahl betrieben. Deshalb sind keine drehzahlvariablen Daten vorhanden.

Es wäre sinnvoll die Turbinen auf dem Prüfstand auszumessen, um mehr Daten für die Modellierung zu erhalten.

Die Simulation des Gesamtsystems hat die erwarteten Resultate bestätigt. Ziel ist es die Regelparameter der Simulation beim Aufbau einer Pilotanlage zu übernehmen.

Beim Schlussbericht sollte noch erwähnt werden, dass die FH Sion (Herr Biner) uns technisch unterstützt hat.

Zudem hat die FH Biel (Herr Vezzini) uns freundlicherweise eine Schulungslizenz für Matlab/Simulink zur Verfügung gestellt.

Herr Tissot sollte über den Bericht informiert werden, da im Bericht Daten seiner Turbine verwendet werden.

2 Einleitung

Die FH Sion hat 1995 eine Pilotanlage aufgebaut [1].

Das System funktioniert.

Bei folgenden Punkten sind noch Verbesserungen möglich:

- Als Turbine wurde eine rückwärts laufende Pumpe eingesetzt. Der Wirkungsgrad dieser Pumpe ist nur in einem kleinen Bereich des Durchflusses gut. Die Drehzahl kann nur in einem kleinen Bereich verstellt werden.
- Das Trinkwassersystem wurde je nach Betriebszustand beeinflusst (Aufschwingen des Systems).
- Das Einstellen der Regelung ist für den Betreiber nicht zumutbar. Er ist sich gewohnt, nur an den Druckreduzierventilen den Druck des Ortsnetzes einzustellen.
- Da das Ortsnetz oft unübersichtlich ist und mehrere Einspeisepunkte hat, muss das Ortsnetz als unbekannt angenommen werden.
- Zum Teil ist der Druckabfall über die Druckleitung recht gross. Es kann nur ein kleiner Teil der möglichen Leistung zurück gewonnen werden. Beim Bau der Druckleitung spielte es keine Rolle, ob der Druckabfall in der Leitung oder im Druckreduzierventil erfolgte.

3 Ziel der Simulation

3.1 Allgemeines

Mit der Simulation einer Druckreduzieranlage im geschlossenen System mit variablem Durchfluss, wird versucht das Verhalten der einzelnen Komponenten und das Zusammenwirken dieser Komponente im Gesamtsystem berechenbar zu machen.

Anhand der Erfahrungen der FH Sion soll die Technologie für die Energierückgewinnung in geschlossenen Systemen verbessert werden.

3.2 Systemanforderungen

Das System soll für den Betreiber keine Änderungen zum bestehenden System haben. Der gewünschte Druck im Ortsnetz soll weiterhin über ein Druckreduzierventil eingestellt werden können.

Anhand einer groben Risikoanalyse soll abgeschätzt werden, ob die Schutzmassnahmen ausreichend sind.

3.3 Simulation der einzelnen Komponenten

Für die Simulation des Gesamtsystems ist es wichtig das Verhalten der einzelnen Komponenten zu kennen.

Die Simulationsmodelle der einzelnen Komponenten werden anhand theoretischen Überlegungen und vorhandenen Messdaten modelliert.

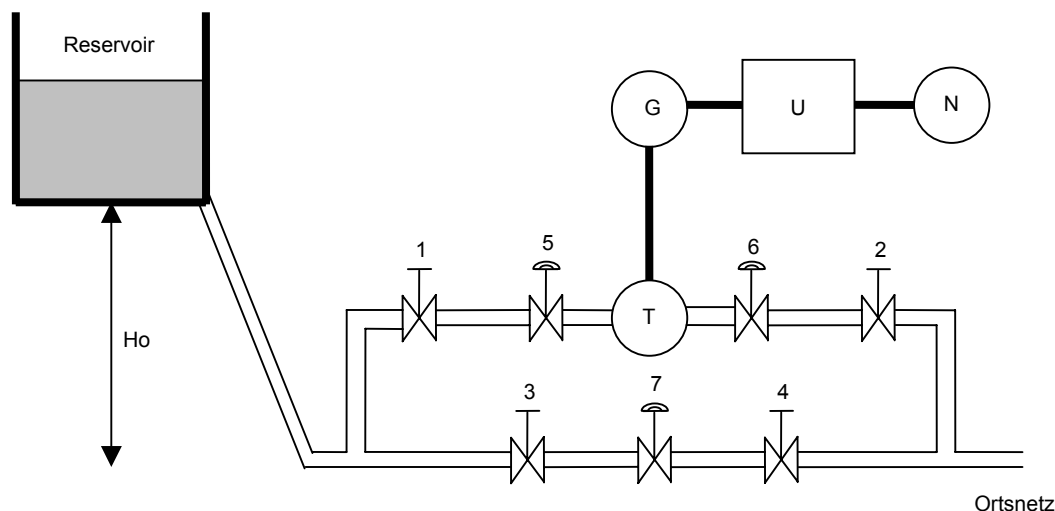
3.4 Simulation Gesamtsystem

Um das vorgeschlagene System zu überprüfen, soll das System simuliert werden. Die Simulation soll den theoretischen Nachweis liefern, dass das vorgeschlagene System funktioniert. Das Verhalten bei verschiedenen Betriebszuständen (Durchflussänderung im Ortsnetz, el. Netzausfall) soll simuliert werden.

4 Aufbau eines geschlossenen Systems für variablen Durchfluss

4.1 Übersicht

Der Aufbau der Pilotanlage der FH Sion soll verbessert werden. Folgendes System wird als sinnvoll erachtet.



- 1-4 Handventile
- 5 Steuerventil Turbine
- 6 Druckreduzierventil nach Turbine
- 7 Druckreduzierventil "by-pass"
- T Druckturbine
- G Generator
- U Umrichter
- N El. Netz 3x400V
- Ho Gefälle Reservoir -> Ortsnetz

Abbildung 1 : Blockschema Druckreduzierung mit Energierückgewinnung

4.2 Funktionsweise

Wenn die Turbine ausser Betrieb ist, wird der Druck des Ortsnetzes mit dem Druckreduzierventil 7 im "by-pass" geregelt.

Wenn die Turbine in Betrieb ist, wird das Ventil 5 durch ein Steuersignal der Elektronik geöffnet. Das Druckreduzierventil 6 wird auf einen höheren Druck als das Druckreduzierventil 7 im "by-pass" eingestellt (ca. 0.5 bar).

Nach dem Öffnen des Ventils 5 sinkt der Durchfluss durch den "by-pass" auf 0. Der ganze Durchfluss fliesst durch die Turbine -> Energierückgewinnung. Die Drehzahl der Turbine wird durch die Steuerung berechnet, so dass beim aktuellen Durchfluss die maximale Leistung zurückgespeist werden kann (MPT).

4.3 Risikoanalyse

Um die Betriebssicherheit zu garantieren, sollen die möglichen Fehler und die Massnahmen aufgezeigt werden.

Die möglichen Risiken werden aufgelistet, beschrieben und klassiert nach Wahrscheinlichkeit (W) und Tragweite (T), mit den Gewichtungen Minimal (1), Klein (2), Mittel (3), Gross (4) und Maximal (5).

Gewichtung	Bedeutung für Wahrscheinlichkeit	Bedeutung für Tragweite
1 Minimal	Kann "nicht" auftreten, d.h. ist abgesichert durch Schutzfunktion Bsp.: Versagen mehrerer Schutzfunktionen	Geräte: Keine Auswirkung, allenfalls automatisches Ausschalten und Neustart. Kunde: merkt "nichts"
2 Klein	Sehr seltenes Ereignis, absoluter Ausnahmefall, Verkettung mehrerer Umstände	Geräte: Sicherheitsfehler, Gerät(e) blockiert, muss "entriegelt" werden Wiederholtes Auftreten führt zu schnellerer Alterung der Geräte. Kunde: Kurzer Produktionsunterbruch, unangenehm, aber tragbar
3 Mittel	Seltenes Ereignis, kann vereinzelt auftreten	Geräte: Schäden an Komponente(n), Auswechseln / Reparatur von Komponenten, Schaden < 2 kCHF. Kunde: längerer Produktionsunterbruch und Reparaturkosten, äusserst selten tolerierbar
4 Hoch	Wiederholt auftretende Ereignisse, könnte verbreitet auftreten	Geräte: Ganze Geräte oder Installation defekt Schaden 10..20 kCHF. Kunde: langer Produktionsunterbruch, hohe Reparaturkosten, nicht tolerierbar
5 Maximal	Periodische Ereignisse bei (fast) allen Anlagen möglich	Personen- und/oder Sachschaden am Gebäude und Inventar (Brand, Explosion). Verboten!

Tabelle 1 : Bedeutung der Gewichtungen

Das Produkt (WxT) ergibt das Risiko (R), R grösser 4 müssen abgeklärt werden, R grösser 9 sind nicht tolerierbar.

4.3.1 Die Turbine blockiert

Beschreibung	:	Durch einen mechanischen Defekt blockiert die Turbine.
Mögliche Folgen	:	Je nach Turbinentyp zu hoher/tiefer Druck im Ortsnetz.
Massnahmen	:	Je nach Fall ist eines der beiden Druckreduzierventil aktiv. Um die Turbine zu schützen, wird das Steuerventil vor der Turbine geschlossen.
Wahrscheinlichkeit	:	2
Tragweite	:	4
Risiko	:	8
Bemerkungen	:	Die vorgeschlagenen Massnahmen genügen als Schutzfunktion.

4.3.2 Die Turbine dreht hoch (Fall 1)

Beschreibung	: Durch einen el. Netzausfall wird die Turbine nicht mehr belastet.
Mögliche Folgen	: Zerstörung Turbine, Generator und Elektronik.
Massnahmen	: Schliessen des Steuerventils. Lastwiderstände aufschalten.
Wahrscheinlichkeit	: 3
Tragweite	: 2
Risiko	: 6
Bemerkungen	: Die vorgeschlagenen Massnahmen genügen als Schutzfunktion.

4.3.3 Die Turbine dreht hoch (Fall 2)

Beschreibung	: Durch einen el. Netzausfall wird die Turbine nicht mehr belastet.
Mögliche Folgen	: Je nach Turbinentyp zu hoher/tiefer Druck im Ortsnetz.
Massnahmen	: Je nach Fall ist eines der beiden Druckreduzierventil aktiv.
Wahrscheinlichkeit	: 3
Tragweite	: 2
Risiko	: 6
Bemerkungen	: Die vorgeschlagenen Massnahmen genügen als Schutzfunktion.

4.3.4 Der Druckabfall über die Turbine ist zu gross

Beschreibung	: Der Druckabfall über die Turbine ist zu gross.
Mögliche Folgen	: Zu tiefer Druck im Ortsnetz.
Massnahmen	: Das Druckreduzierventil im "by-pass" regelt den Druck im Ortsnetz.
Wahrscheinlichkeit	: 4
Tragweite	: 2
Risiko	: 8
Bemerkungen	: Die vorgeschlagenen Massnahmen genügen als Schutzfunktion.

4.3.5 Der Betreiber stellt einen falschen Druck ein

Beschreibung	: Betreiber stellt falschen Druck am Druckreduzierventil ein.
Mögliche Folgen	: Zu tiefer/hoher Druck im Ortsnetz.
Massnahmen	: keine
Wahrscheinlichkeit	: 1
Tragweite	: 5
Risiko	: 5
Bemerkungen	: Dieses Problem verschärft sich nicht gegenüber der bestehender Lösung. Das Risiko wird durch den Betreiber getragen.

5 Simulation des Systems

5.1 Ziel der Simulation

Das Ziel der Simulation mit Matlab/Simulink ist es, das System in Abbildung 1 zu simulieren.

Folgendes Betriebsverhalten soll simuliert werden:

- Testen der Regelung (MPT Maximum Power Tracker)
- Verhalten des Systems bei Durchflussänderung im Ortsnetz
- Lastabwurf durch Ausfall el. Netz

Das Betriebsverhalten soll mit verschiedenen Turbinentypen simuliert werden.

5.2 Simulationsmodelle der Komponenten

5.2.1 Umrechnung piezometrische Höhe -> Druck

In der Literatur wird oft der Ausdruck piezometrische Höhe verwendet. Die Umrechnung von piezometrischer Höhe in Druck (Medium Wasser) erfolgt nach Formel 1:

$$p = \rho * g * H \approx \frac{H}{g} [\text{bar}]$$

Formel 1 : Umrechnung piezometrische Höhe in Druck

5.2.2 Druckleitung

Das Simulationsmodell wurde anhand der Formel 2 modelliert. Die Herleitung der Gleichung ist in [2] nachzulesen. Bei dieser partiellen Differenzialgleichung wird die Dichte des Mediums als Konstant angenommen.

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{g * A} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$
$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{g * A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\lambda * |Q|}{g * D * A^2} * Q = 0$$

Formel 2 : Gleichung Druckleitung

Die Formel kann in folgende Form umgeschrieben werden:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = - \frac{a^2}{g * A * \Delta x} * \Delta Q$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{g * A}{\Delta x} \left(-\Delta H - \frac{\lambda * \Delta x * |Q|}{g * D * A^2} * Q \right)$$

Formel 3 : Umgeschriebene Gleichung Druckleitung

$$\Delta H = H_1 - H_2$$

$$\Delta Q = Q_1 - Q_2$$

Die Druckleitung wird in n Teilstücke mit der Länge Δx aufgeteilt. Anhand der Formel 3 kann ein Simulationsmodell (Abbildung 2) für das Teilstück Δx erstellt werden.

Abbildung 3 zeigt das Simulationsmodell der Druckleitung mit 10 Teilstücken.

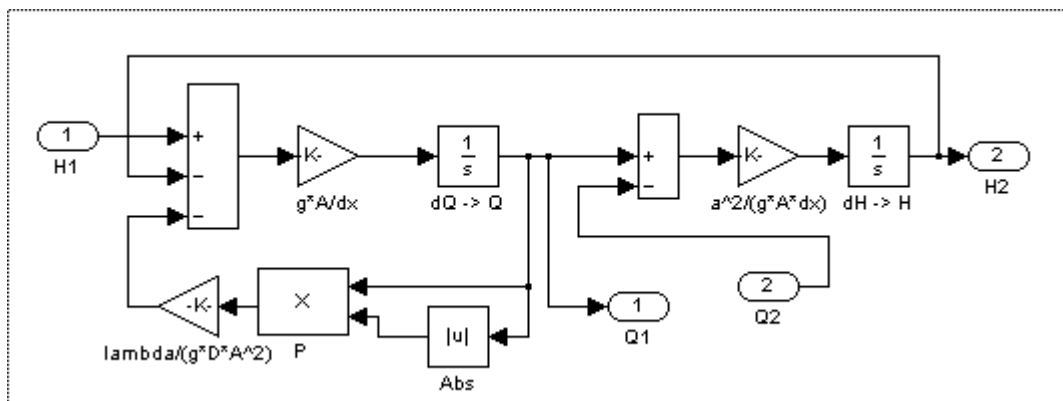


Abbildung 2 : Simulationsmodell Teilstück Δx Druckleitung

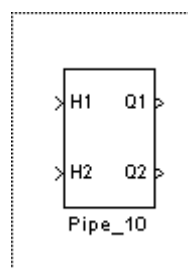


Abbildung 3 : Simulationsmodell Druckleitung

5.2.3 Gesteuertes Ventil

Ein Ventil ist ein hydraulischer Widerstand. Je nach Öffnungsgrad ist der Druckabfall grösser oder kleiner. Der Zusammenhang zwischen Durchfluss, Öffnungsgrad und Druckabfall ist in der Formel 4 zu sehen.

$$\Delta H_V = \frac{|Q_V|}{2 * g * (C_d(s) * A_V(s))^2} * Q_V$$

Formel 4 : Druckabfall Ventil

Der Verlauf von C_d und A_V ist nicht linear und wird in [2] beschrieben. Abbildung 4 zeigt die Kennlinien.

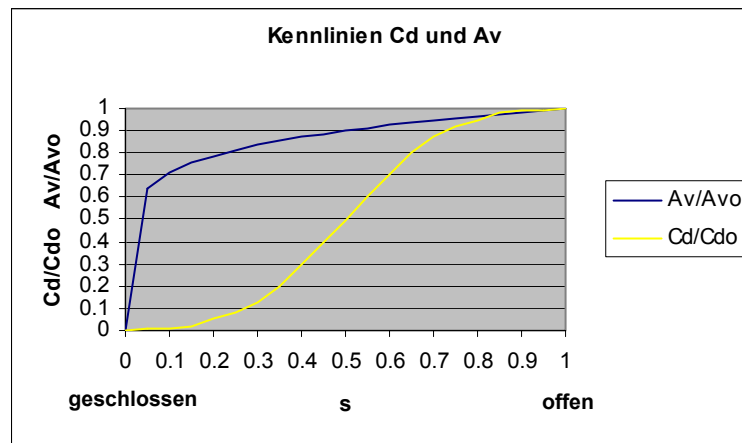


Abbildung 4 : Kennlinien A_V/A_{V0} und C_d/C_{d0}

- A_V : Querschnitt bei Position s
- A_{V0} : Querschnitt bei maximaler Öffnung
- C_d : Nichtlinearität bei Öffnen/Schliessen
- C_{d0} : Referenzierung für C_d

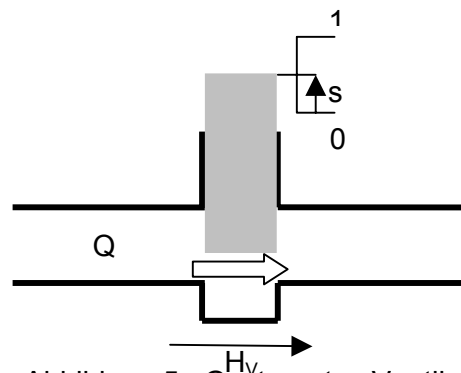


Abbildung 5 : Gesteuertes Ventil

Nach [2] können die Kennlinien vereinfacht werden. Formel 5 ist eine Vereinfachung.

$$(C_d * A_v)_{(t)} = C_{d0} * A_{v0} \left(1 - \left(\frac{t}{\tau} \right)^{0.75} \right)$$

Formel 5 : Schliessen Ventil

Anhand Formel 4 und Formel 5 kann das Simulationsmodell (Abbildung 6) erstellt werden.

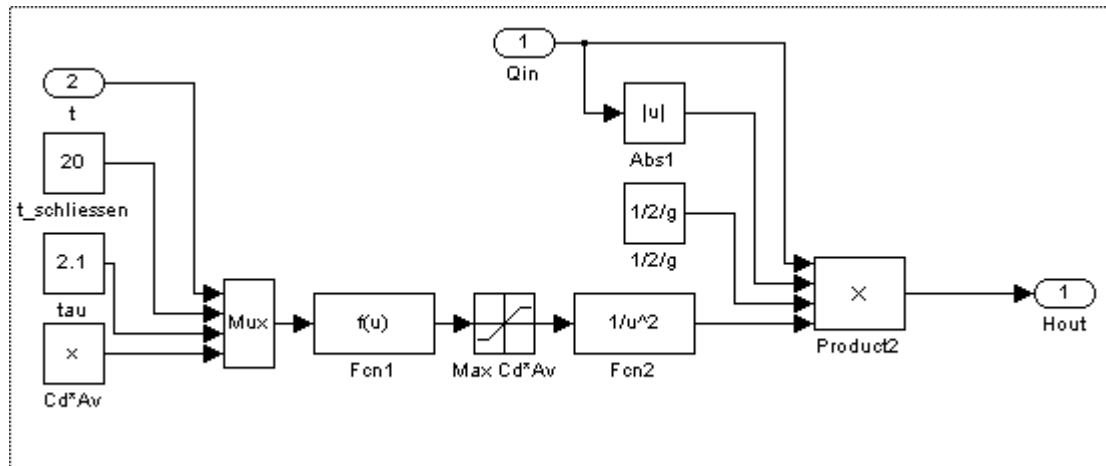


Abbildung 6 : Simulationsmodell gesteuertes Ventil

5.2.4 Druckreduzierventil

Das Druckreduzierventil regelt auf einen konstanten Ausgangsdruck. Der Ausgangsdruck wird z.B. mit einer Membran erfasst. Diese Membran wird je nach gewünschtem Ausgangsdruck mehr oder weniger mit einer Feder vorgespannt. Falls der Ausgangsdruck höher ist als der eingestellte Druck, wird das Ventil geschlossen (siehe Abbildung 7).

Das Modell mit dem PI-Regler ist in Abbildung 8 zu sehen.

Je nach eingebautem Druckreduzierventil müssen die Regelparameter noch eingestellt werden.

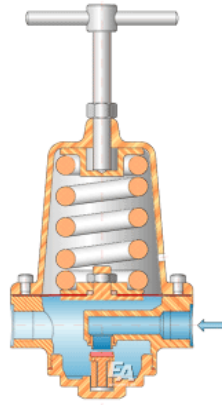


Abbildung 7 : Aufbau Druckreduzierventil (Firma End-Armaturen)

$$\Delta H_V = \frac{|Q_V|}{2 * g * A_V^2} * Q_V$$

Formel 6 : Formel Druckreduzierventil

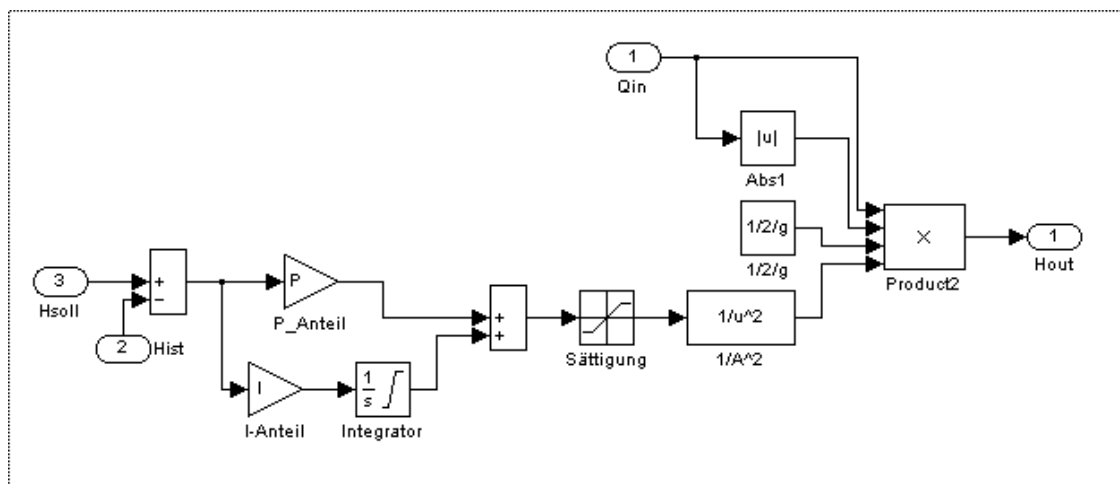


Abbildung 8 : Simulationsmodell Druckreduzierventil

5.2.5 Last

Die Last im Ortsnetz wird mit einem Ventil simuliert. Je nach Öffnungsgrad kann der gewünschte Durchfluss eingestellt werden. Das Simulationsmodell ist in 5.2.3 beschrieben.

5.2.6 Modell Druckturbine "Theorie"

Ein analytisches Modell für eine Druckturbine wird von T.K. Nielsen [3],[4] vorgeschlagen. Die erste Gleichung in Formel 7 beschreibt $M = f(Q, n)$. Die zweite Gleichung in Formel 7 beschreibt $H = f(Q, n)$. Das Modell wurde für eine Turbine mit verstellbaren Schaufeln und konstanter Drehzahl entwickelt.

$$M_t = \rho * Q * \eta_q \left[R_1 * C_1 * \cos(\alpha_1) + R_1 * C_1 * \cot(\beta_1) * \frac{A_1}{A_T} - R_1^2 * \omega \right] * \eta_m$$

$$\frac{J_h}{\rho * g} * \frac{dQ}{dt} = H \left(1 + \frac{s * \omega_R^2}{2 * g * H_R} \right) - \frac{s * \omega^2}{2 * g} - \frac{H_R * |Q|}{(Q_R * \kappa)^2} * Q$$

Formel 7 : Analytisches Modell Druckturbine

Oft kann das Modell einer Turbine nicht analytisch nachgebildet werden.

Die Modelle werden dann anhand der Kennfelder (z.B. Muscheldiagramme) bestimmt.

Solche Kennfelder sind in Abbildung 9 zu sehen. Die mechanischen Verluste der Turbine sind in diesen Kennfeldern nicht berücksichtigt. Die mechanischen Verluste werden im Simulationsmodell berücksichtigt.

Da zu Beginn der Arbeit noch keine Daten einer geeigneten Turbine vorlagen wurde ein Modell einer "theoretischen" Druckturbine erstellt.

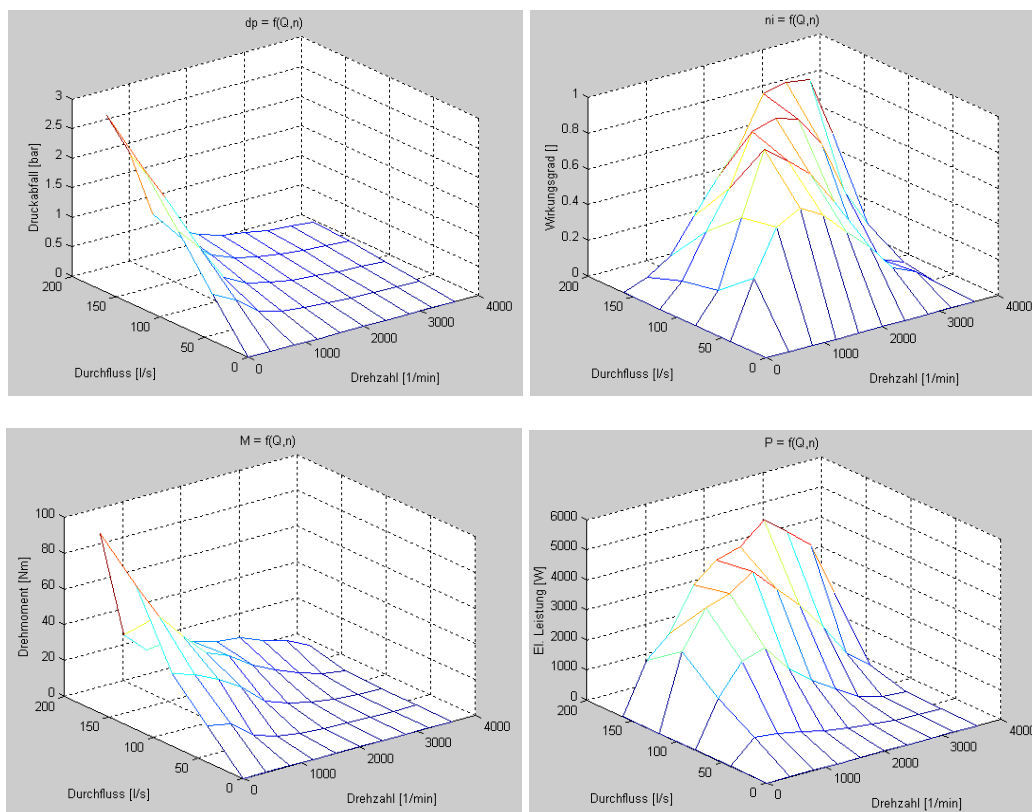


Abbildung 9 : Kennfelder Druckturbine "Theorie" $M, P, dP, \eta = f(Q, n)$

Anhand der Kennfelder $M = f(Q, n)$ und $H = f(Q, n)$ können die Simulationsmodelle in Abbildung 10 und Abbildung 11 modelliert werden.

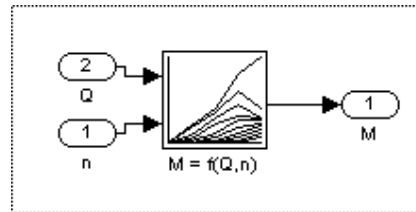


Abbildung 10 : Modell $M = f(Q, n)$ Druckturbine "Theorie"

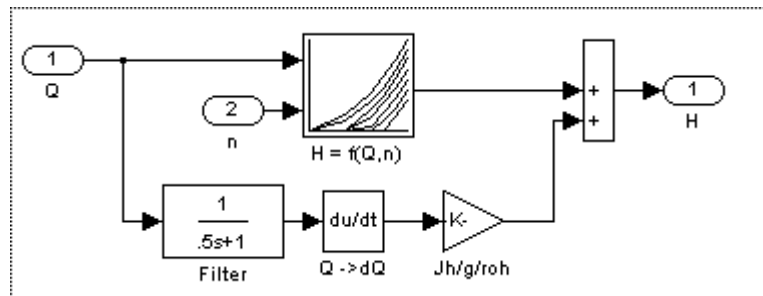


Abbildung 11 : Modell $H = f(Q, n)$ Druckturbine "Theorie"

In Modell in Abbildung 11 wird zudem noch das hydraulische Trägheitsmoment J_h berücksichtigt.

Das komplette Simulationsmodell für den mechanischen Teil der Turbine ist in Abbildung 12 zu sehen. Neben der Turbine ist auch der Generator (PM-Generator) und PID-Drehzahlregler und der PI-Stromregler modelliert. Der Generator und die el. Last wurde vereinfacht, für die vorgesehenen Simulationen ist dies ausreichend.

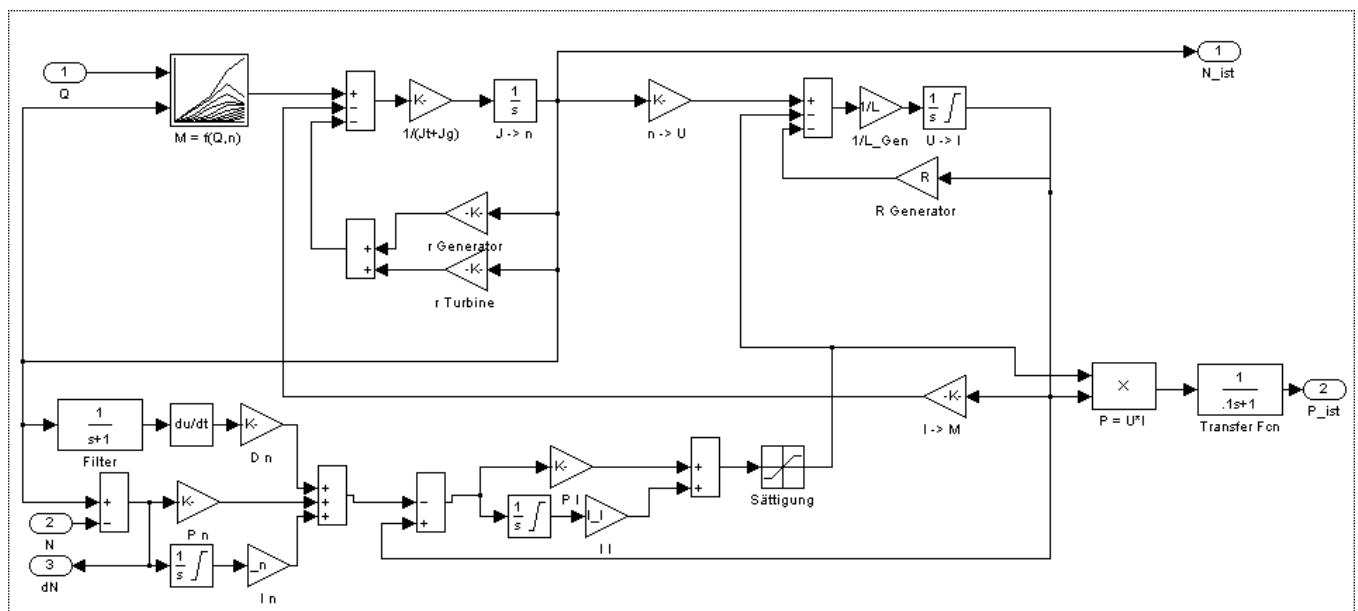


Abbildung 12 : Simulationsmodell Turbine + Generator mit n-Regler und I-Regler

Folgende Daten der Turbine, Generator müssen bekannt sein:

- Kennfelder $M = f(Q, n)$ und $H = f(Q, n)$
- Hydraulisches Trägheitsmoment Turbine
- Mechanisches Trägheitsmoment Turbine + Generator
- Reibungsverluste Turbine + Generator
- Ohmscher Widerstand Generator
- Induktivität Generator
- Konstante $c \cdot \Phi$ Generator

Abbildung 13 zeigt das Regelverhalten bei einem Drehzahlsprung von 500 U/min auf 1000 U/min bei konstantem Durchfluss (160 l/s). Folgende Reglereinstellungen für den Drehzahlregler und Stromregler wurden gewählt:

$P_n = 0.1$	P-Anteil n-Regler
$I_n = 2$	I-Anteil n-Regler
$D_n = 0.5$	D-Anteil n-Regler
$P_I = 0.5$	P-Anteil I-Regler
$I_I = 2$	I-Anteil I-Regler

Folgende Daten wurden für die Druckturbine "Theorie" gewählt:

$J_t = 0.005$	Trägheitsmoment Turbine [kg*m ²]
$J_g = 0.005$	Trägheitsmoment Generator [kg*m ²]
$r_{Gen} = 0.00005$	Reibung Generator []
$r_{Turb} = 0.00005$	Reibung Turbine []
$c_{\phi} = 0.8$	$c \cdot \phi$ Generator [V*s]
$L = 0.006$	Induktivität Generator [H]
$R = 0.8$	Widerstand Generator [Ω]

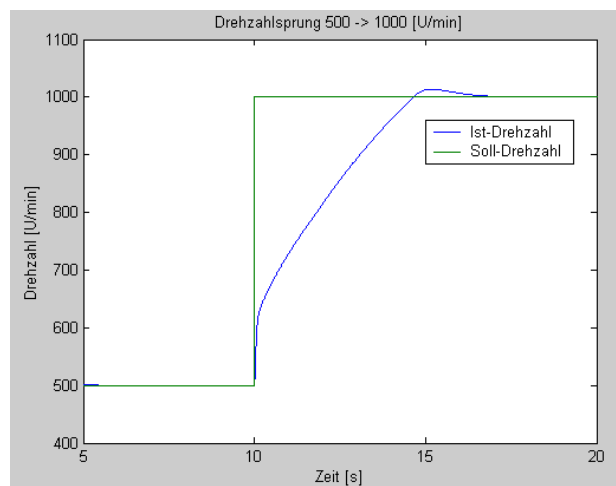


Abbildung 13 : Regelverhalten Drehzahlsprung Druckturbine "Theorie"

5.2.7 Modell Rohrturbine "Tissot"

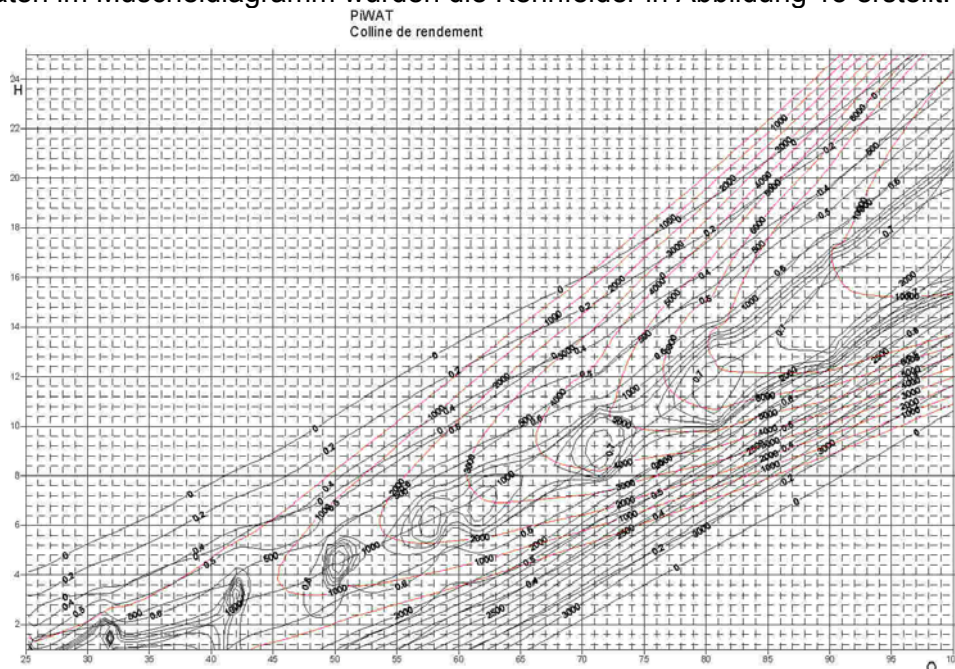
Diese Rohrturbine wurde von N. Tissot entwickelt. Die Turbine hat keine verstellbaren Schaufeln, der optimale Arbeitspunkt wird durch Verändern der Drehzahl erreicht.

Folgende Technische Daten:

Durchmesser	200 mm
Länge	500 mm
Fallhöhe	1.5 - 12 m
Durchfluss	25 - 80 l/s
Drehzahl	500 -2800 U/min
$P_n = 0.1$	P-Anteil n-Regler
$I_n = 2$	I-Anteil n-Regler
$D_n = 0.5$	D-Anteil n-Regler
$P_I = 0.5$	P-Anteil I-Regler
$I_I = 2$	I-Anteil I-Regler
$J_h = 10$	Hydraulisches Trägheitsmoment Turbine [kg/m^4] (Annahme)
$J_t = 0.005$	Trägheitsmoment Turbine [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$] (Annahme)
$J_g = 0.005$	Trägheitsmoment Generator [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$] (Annahme)
$r_{\text{Gen}} = 0$	Reibung Generator [] (im Kennfeld berücksichtigt)
$r_{\text{Turb}} = 0$	Reibung Turbine [] (im Kennfeld berücksichtigt)
$c_{\phi} = 0.8$	$c \cdot \phi$ Generator [$\text{V} \cdot \text{s}$] (Annahme)
$L = 0.006$	Induktivität Generator [H] (Annahme)
$R = 0.1$	Widerstand Generator [Ω] (Annahme)

Ein Prototyp wurde von N. Tissot ausgemessen. Aus den Messdaten wurde von N. Tissot ein Muscheldiagramm (Abbildung 14) erstellt. Der Generator ist in den Messdaten berücksichtigt.

Anhand der Daten im Muscheldiagramm wurden die Kennfelder in Abbildung 15 erstellt.



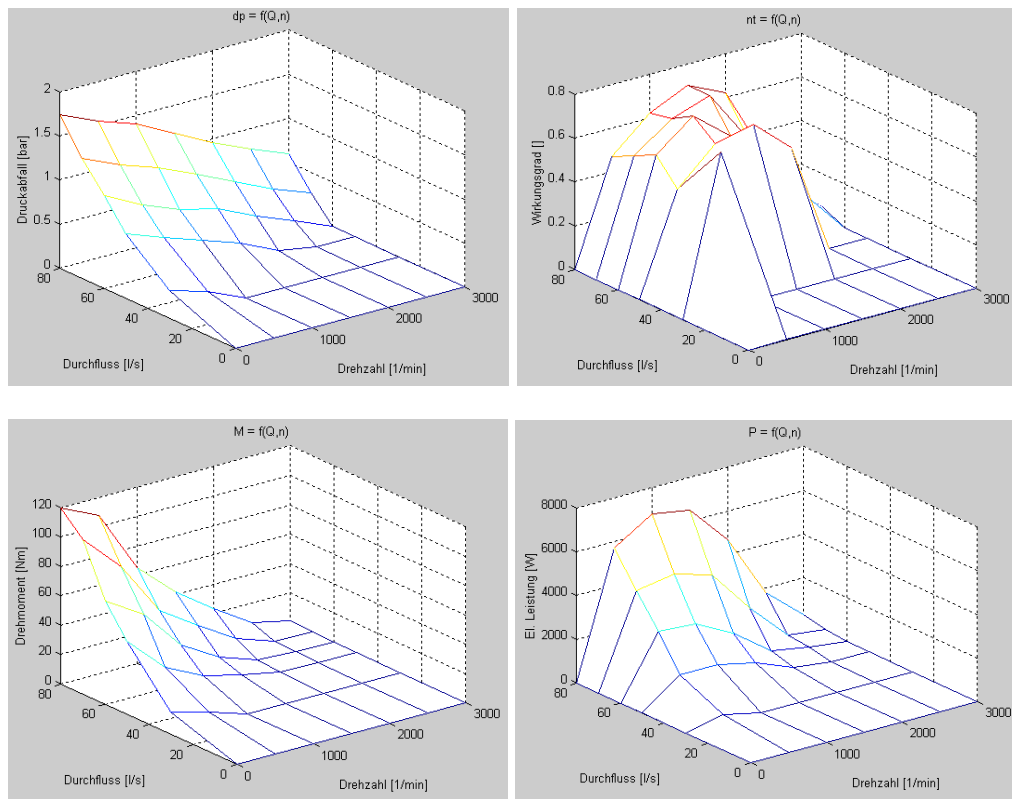


Abbildung 15 : Kennlinie $M, P, dp, \eta = f(Q, n)$

Abbildung 16 zeigt das Regelverhalten bei einem Drehzahlssprung von 500 U/min auf 1000 U/min bei konstantem Durchfluss (80 l/s). Es wurde das gleiche Simulationsmodell und die gleichen Regelparameter wie bei der Druckturbine "Theorie" verwendet.

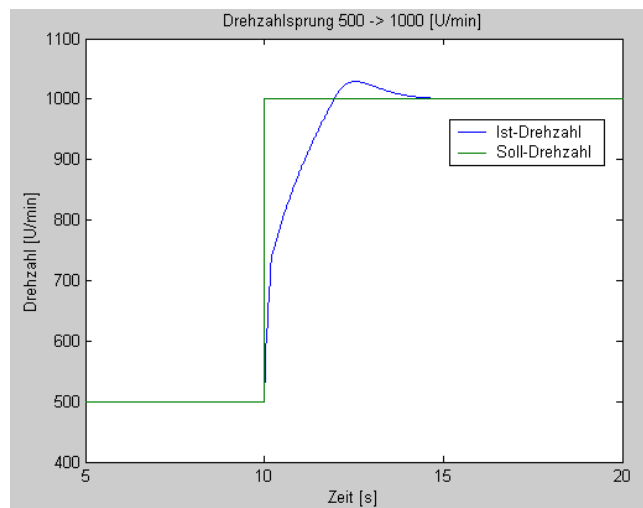


Abbildung 16 : Regelverhalten Drehzahlssprung Rohrturbine "Tissot"

5.2.8 Modell Kreiskolbenturbine "Theorie"

Eine weitere Möglichkeit wäre es eine Kreiskolbenturbine einzusetzen. Als Pumpe wird diese Technologie oft eingesetzt. Ob sich diese Technologie auch für Turbinen bewährt, muss noch getestet werden. Ein zentraler Punkt ist die Lagerung.

Es konnten keine Daten für den drehzahlvariablen Betrieb einer Kreiskolbenturbine gefunden werden, deshalb wurde ein theoretisches Modell mit folgenden Angaben gerechnet:

Das Moment ist proportional zum Durchfluss.

Das Moment nimmt durch die Reibungsverluste bei steigender Drehzahl ab.

Der Druckabfall ist proportional zum Moment.

Anhand dieser Annahmen wurden die Kennfelder in Abbildung 17 erstellt. Um genauere Kennfelder für diese Turbinenart zu erhalten, muss ein Prototyp ausgemessen werden.

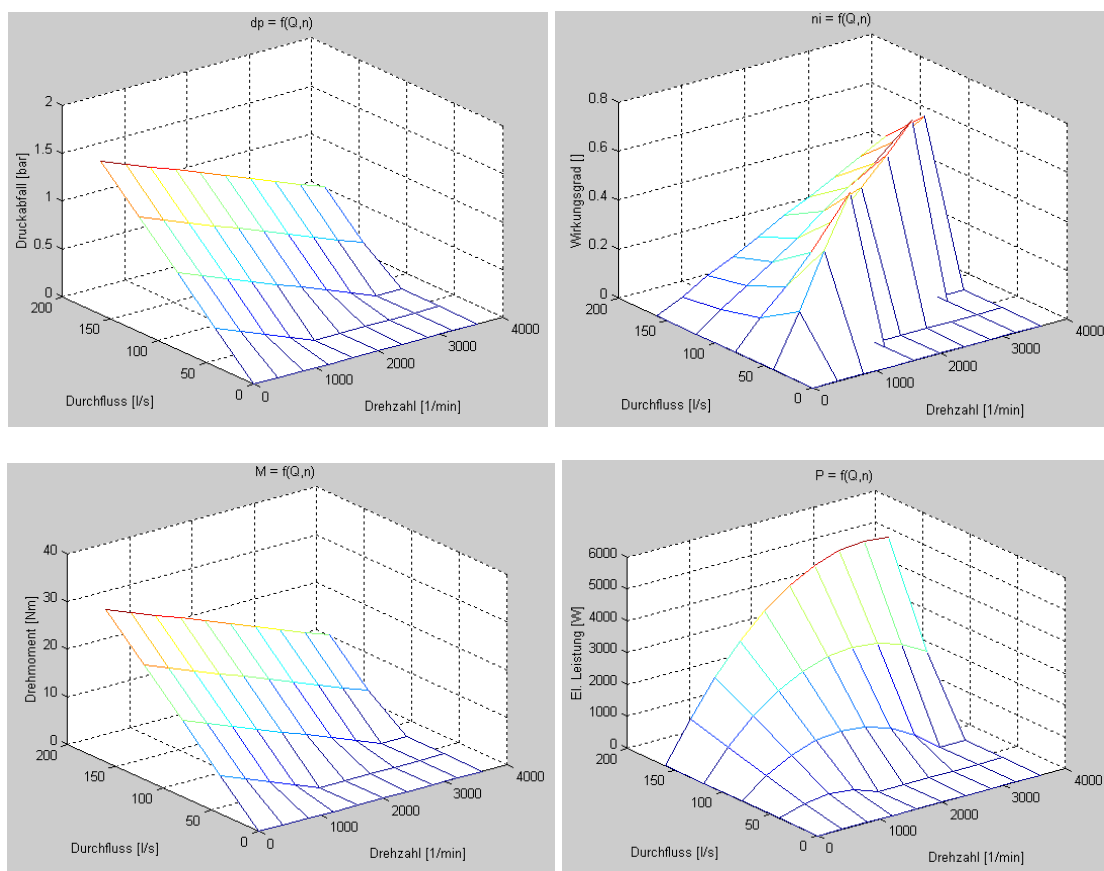


Abbildung 17 : Kennlinie $M, P, dp, \eta = f(Q, n)$

Abbildung 18 zeigt das Regelverhalten bei einem Drehzahlsprung von 500 U/min auf 1000 U/min bei konstantem Durchfluss (160 l/s).

Folgende Reglereinstellungen für den Drehzahlregler und Stromregler wurden gewählt:

$P_n = 1$	P-Anteil n-Regler
$I_n = 2$	I-Anteil n-Regler
$D_n = 0.5$	D-Anteil n-Regler
$P_I = 0.5$	P-Anteil I-Regler
$I_I = 2$	I-Anteil I-Regler
$J_t = 0.005$	Trägheitsmoment Turbine [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$] (Annahme)
$J_g = 0.005$	Trägheitsmoment Generator [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$] (Annahme)
$r_{\text{Gen}} = 0.00005$	Reibung Generator [] (Annahme)
$r_{\text{Turb}} = 0$	Reibung Turbine [] (im Kennfeld berücksichtigt)
$c_{\phi} = 0.8$	c_{ϕ} Generator [$\text{V}\cdot\text{s}$] (Annahme)
$L = 0.006$	Induktivität Generator [H] (Annahme)
$R = 0.1$	Widerstand Generator [Ω] (Annahme)

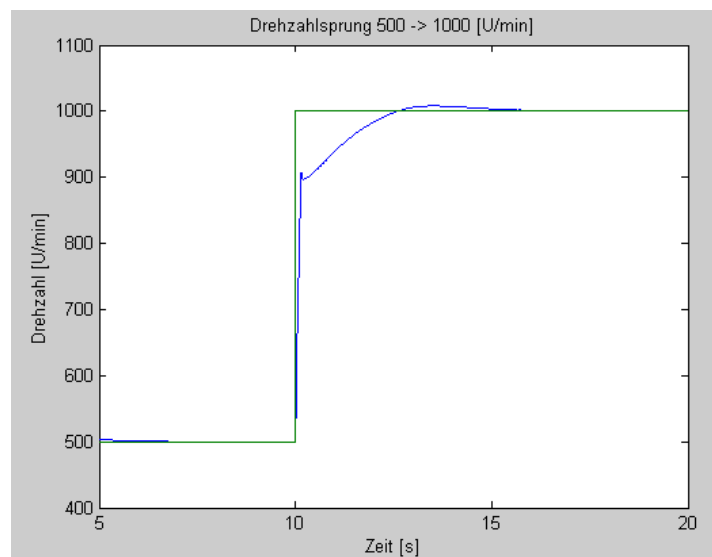


Abbildung 18 : Regelverhalten Drehzahlsprung Kreiskolbenturbine

5.3 Simulation

5.3.1 Druckleitung

Um das Simulationsmodell der Druckleitung zu überprüfen wird eine Druckleitung mit Ventil simuliert. Das Verhalten beim Schliessen des Ventils soll untersucht werden. In [2] wurde dieser Fall mit einem anderen Verfahren simuliert. Es soll untersucht werden, ob mit den gleichen Parametern die gleichen Resultate erzeugt werden.

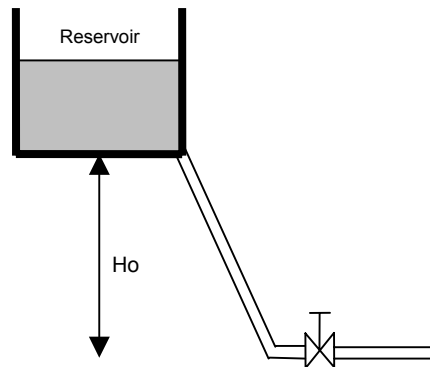


Abbildung 19 : System Druckleitung mit Ventil

Reservoir	Druckleitung	Ventil	Simulationsparameter
$H_o = 150 \text{ m}$	$L = 600 \text{ m}$ $D = 0.5 \text{ m}$ $a = 1200 \text{ m/s}$ $\lambda = 0.0018$	$(C_d A_v)_o = 0.009 \text{ m}^2$ Kennlinie (schliessen): $\tau(t) = 1 - (t/2.1)^{0.75}$	$n = 10$ (Anzahl Teilstücke)

Tabelle 2 : Daten des Systems Druckleitung mit Ventil

Zum Zeitpunkt $t = 20$ wird das Ventil anhand der angegebenen Kennlinie geschlossen.

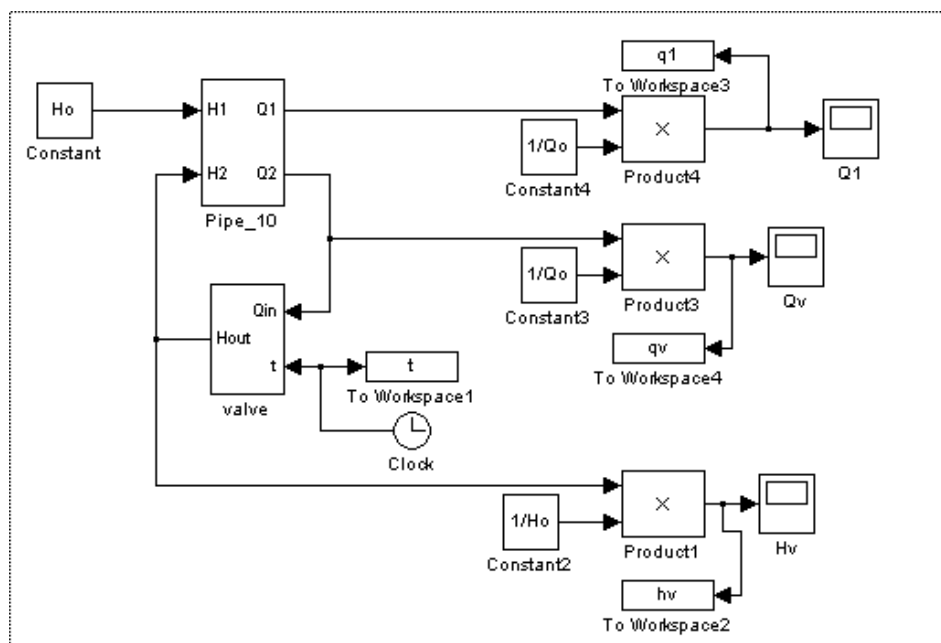


Abbildung 20 : Simulationsmodell Druckleitung mit Ventil

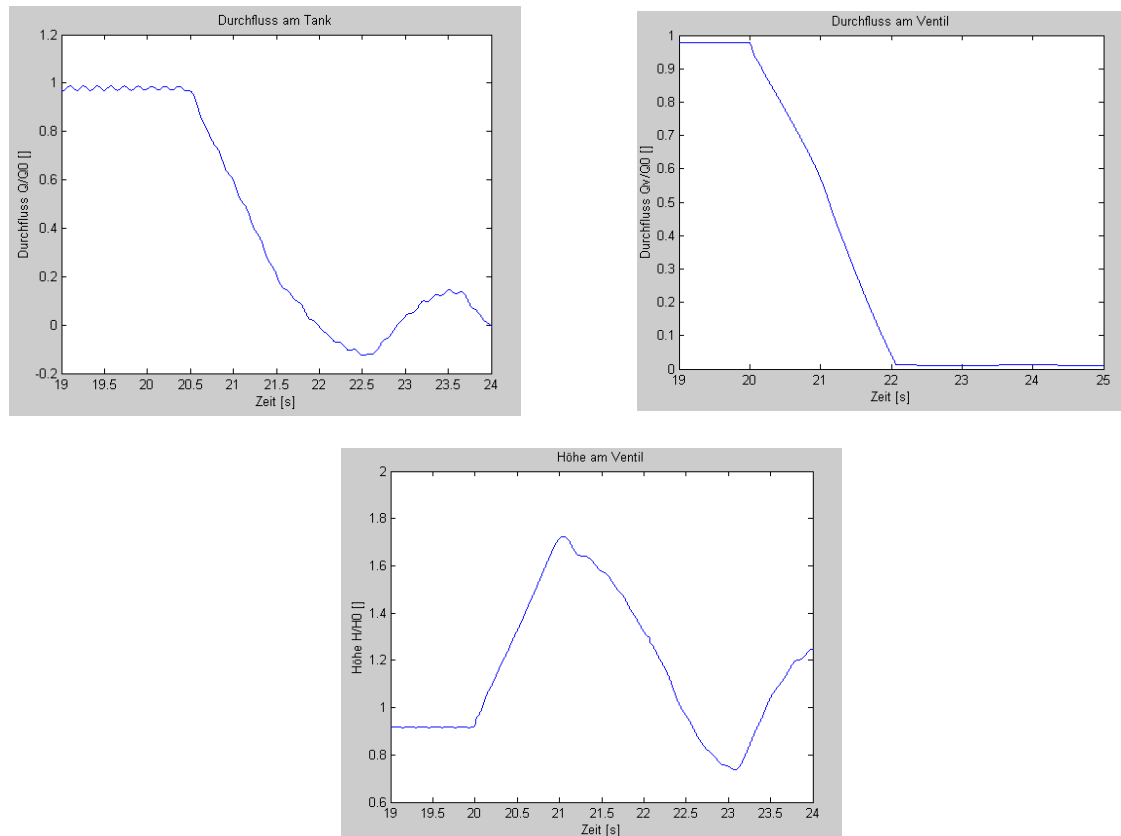


Abbildung 21 : Simulation einer Druckleitung beim Schliessen des Ventils

Der Plot wurde auf Q_0 und H_0 referenziert.

Die Ergebnisse in Abbildung 21 stimmen mit den Ergebnissen von [2] überein. Das Simulationsmodell der Druckleitung kann verwendet werden.

5.3.2 Druckreduzierventil

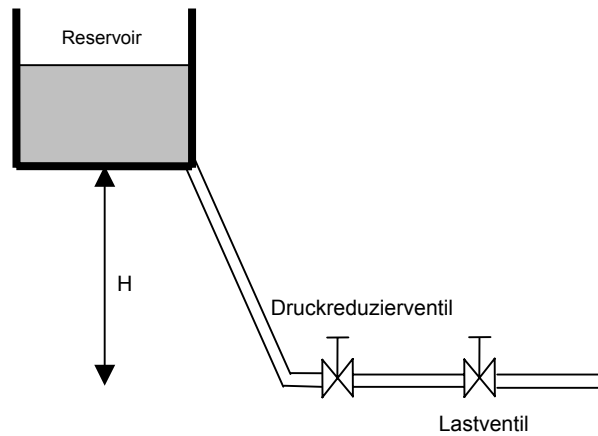


Abbildung 22 : System Druckleitung mit Druckreduzierventil

Reservoir	Druckleitung	Druckreduzierventil	Lastventil	Simulation
Ho = 80 m	L = 300 m D = 0.2 m a = 1200 m/s $\lambda = 0.0018$	$(C_d A_G)_o = 0.006 \text{ m}^2$ $p_{\text{Ausgang}} = 3 \text{ bar}$ Regler: I = 0.001 P = 0.0001	$(C_d A_G)_o = 0.003 \text{ m}^2$ Kennlinie (schliessen): $\tau(t) = 1 - (t/3)^{0.75}$	n = 10 (Anzahl Teilstücke)

Tabelle 3 : Daten des Systems Druckleitung mit Druckreduzierventil

Zum Zeitpunkt $t = 30$ wird das Lastventil anhand der angegebenen Kennlinie um 50% geschlossen.

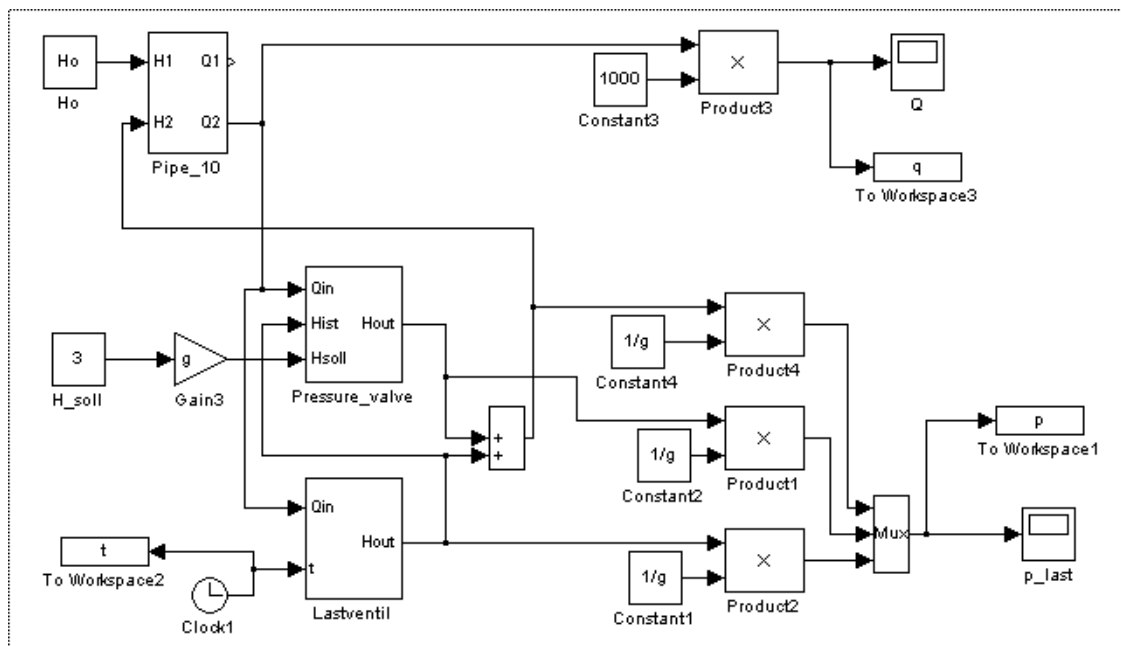


Abbildung 23 : Simulationsmodell Druckleitung mit Druckreduzierventil

Die Simulation in Abbildung 24a zeigt den Durchflusswechsel beim Zeitpunkt $t = 30$. Das Lastventil schliesst in 3 s von 100% auf 50% (anhand der angegebenen Kennlinie).

Der Druck (Abbildung 24b) im Ortsnetz wird durch das Druckreduzierventil auf 3 bar geregelt. Der Druck in der Druckleitung steigt kurzzeitig auf über 13 bar an. Ob dies ein realistischer Wert ist, muss mit Messdaten überprüft werden. Ev. müssen die Regelparameter am Druckreduzierventil noch angepasst werden.

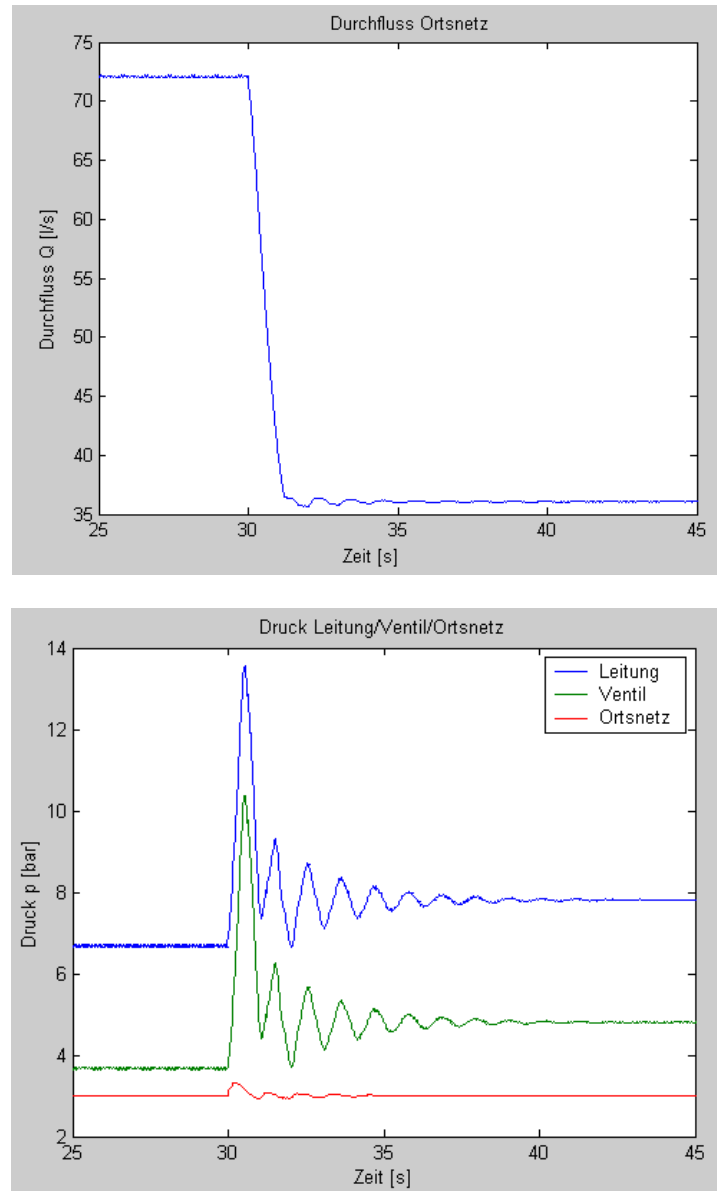


Abbildung 24 : Simulation einer Druckleitung mit Druckreduzierventil

5.3.3 MPT (Maximum Power Tracker)

a) Theorie und Funktionsweise

Der Maximum Power Tracker (MPT) „sucht“ beim aktuellem Durchfluss die Drehzahl, bei welcher die grösste Leistung produziert werden kann.

Funktionsweise des MPT's:

Die Drehzahl $n_{(t-1)}$ und die Leistung $P_{(t-1)}$ wird mit der aktuellen Drehzahl n und der aktuellen Leistung P verglichen. Die Sollwertänderung der Drehzahl wird anhand folgender Tabelle festgelegt.

$n - n_{(t-1)}$	$P - P_{(t-1)}$	n_{Soll}
-	-	+
-	+	-
+	-	-
+	+	+

Tabelle 4 : Funktionsweise MPT

Der Sollwert der Drehzahl kann aber nur geändert werden, wenn die Abweichung $n_{\text{Soll}} - n_{\text{ist}}$ klein ist (Parameter n_{diff} , z.B. 10 U/min) und somit der stationäre Zustand wieder erreicht ist. Die Differenz zum alten Drehzahlsollwert wird mit dem Parameter n_{delta} angegeben.

Bei hohen Drehzahlen und kleinen Durchflüssen kann der Fall auftreten, dass n_{Soll} nicht mehr erreicht werden kann (Reibungsverluste grösser als erzeugte mechanische Leistung). Aus diesem Grund wird bei Leistungen unter P_{min} (Parameter, z.B. 500 W) der Drehzahlsollwert n_{Soll} automatisch auf n_{min} (Parameter, z.B. 500 U/min) gesetzt. Der MPT beginnt dann von neuem mit der Leistungsoptimierung. Die maximale Drehzahl wird mit dem Parameter n_{max} begrenzt.

Beschreibung Regelparameter:

n_{diff}	$n_{\text{Soll}} - n_{\text{ist}}$ muss kleiner als n_{diff} sein, sonst keine	Drehzahländerung.
n_{delta}	n_{Soll} wird um den Parameter n_{delta} erhöht/gesenkt	
n_{max}	n_{Soll} wird auf diesen Parameter begrenzt	
$P_{\text{min}}, n_{\text{min}}$	falls Leistung unter eingestellten Wert fällt, wird n_{Soll} auf n_{min}	gesenkt.
T_{Sample}	Abtastzeit	

Der Regler wurde digital aufgebaut, damit bei der Pilotanlage die Regelparameter direkt in die Software übernommen werden können.

Das Simulationsmodell für den MPT ist in Abbildung 25 zu sehen.

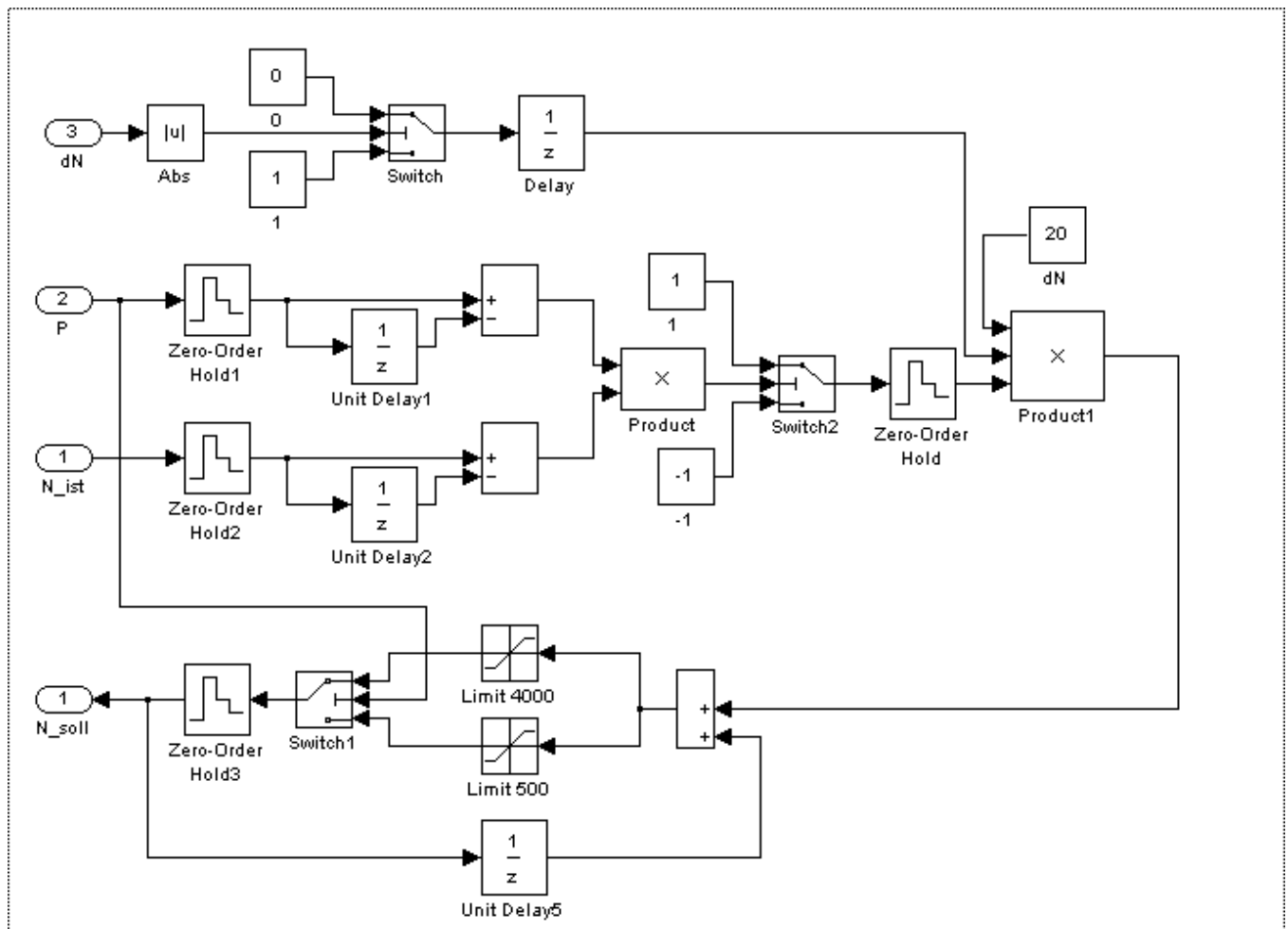


Abbildung 25 : Simulationsmodell Maximum Power Tracker (MPT)

b) Druckturbine "Theorie"

Die Funktionsweise des MPT's soll mit der Druckturbine "Theorie" überprüft werden. Es soll eine positive (40 -> 160 l/s) und negative (160 -> 40 l/s) Änderung im Durchfluss simuliert werden. Der Durchfluss ändert 20 l/s (kein Sprung, sondern eine Rampe).

Der MPT soll bei beiden Durchflüssen die maximale Leistung "finden".

Die max. Leistung der Turbine bei einem Durchfluss von 40 l/s ist nach Kennfeld 750 W (ohne mechanische Verluste und ohmsche Verluste im Generator).

Die max. Leistung der Turbine bei einem Durchfluss von 160 l/s ist nach Kennfeld 5.2 kW (ohne mechanische Verluste und ohmsche Verluste im Generator).

Folgende Regelparameter wurden eingestellt:

n_{diff}	10 U/min
n_{delta}	20 U/min
n_{max}	4000 U/min
n_{min}	500 U/min
P_{min}	500 W
T_{Sample}	1 s

Das Simulationsmodell ist in Abbildung 26 zu sehen.

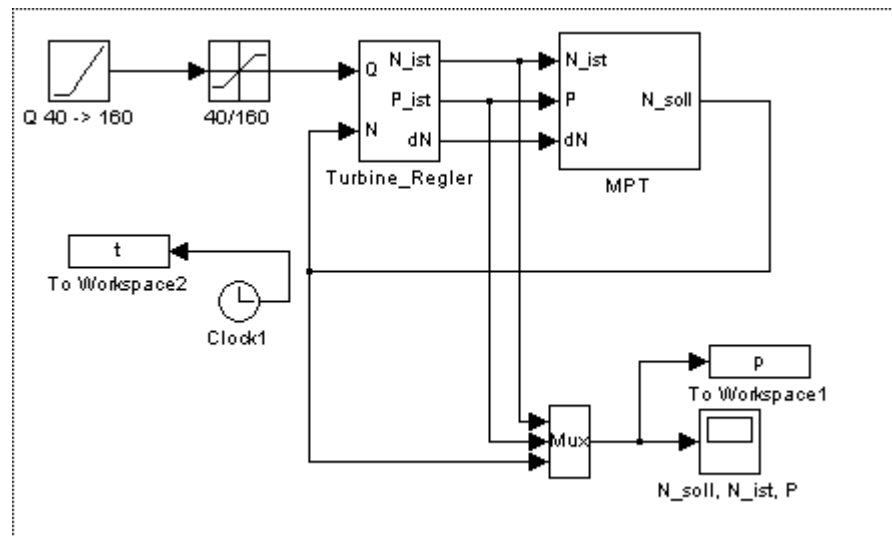


Abbildung 26 : Simulationsmodell MPT mit Druckturbine "Theorie"

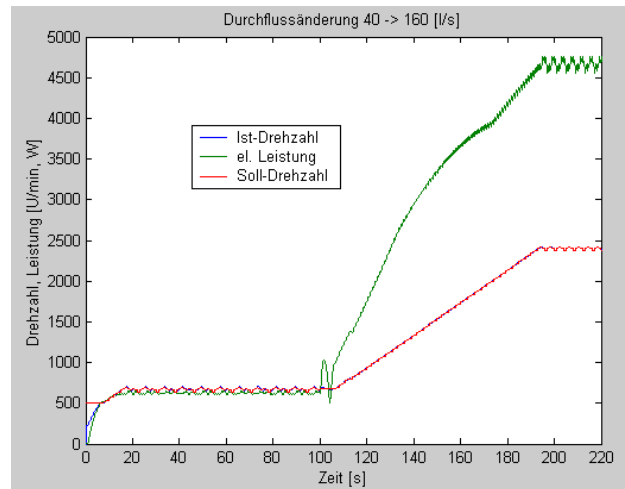


Abbildung 27 : Verhalten MPT "Theoretische" Turbine, pos. Durchflussänderung

Abbildung 27 zeigt das Verhalten bei einem Durchflusswechsel von 40 auf 160 l/s im Zeitpunkt $t = 100$ s. Der MPT regelt auf die maximale Leistung. Durch die mechanischen Verluste ist die Leistung tiefer als im Kennfeld angegeben. Die Anpassung der Leistung dauert ca. 100 s.

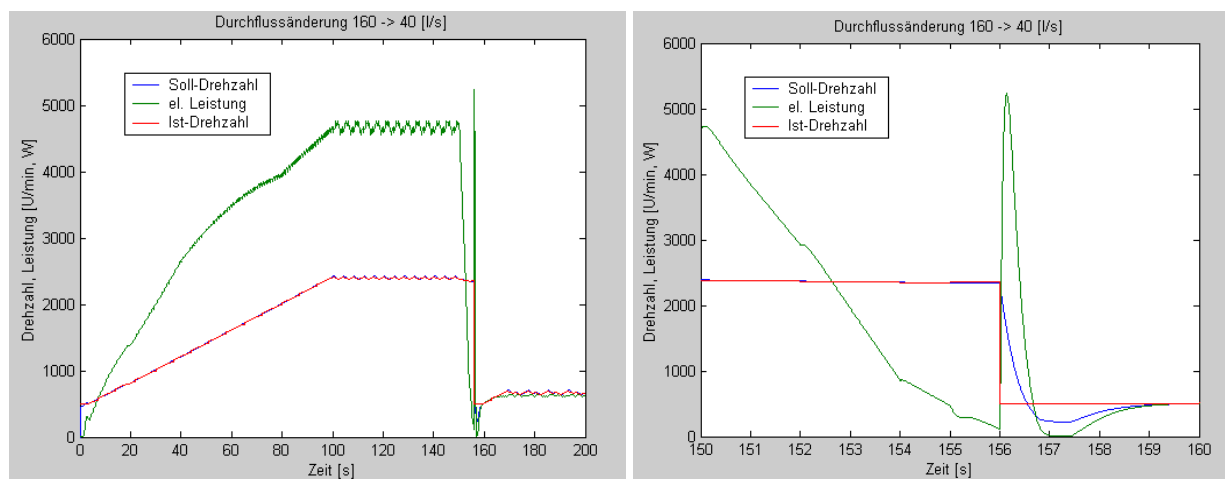


Abbildung 28 : Verhalten MPT "Theoretische" Turbine, neg. Durchflussänderung

Abbildung 28 zeigt das Verhalten bei einem Durchflusswechsel von 160 auf 40 l/s im Zeitpunkt $t = 150$ s. Der MPT regelt auf die maximale Leistung. Durch die mechanischen Verluste ist die Leistung tiefer als im Kennfeld angegeben. Die Anpassung der Leistung dauert ca. 10 s. Während des Durchflusswechsels sinkt die Leistung. Der Drehzahlsollwert kann nicht mehr erreicht werden. Sobald die Leistung unter 500 W sinkt, wird der Sollwert der Drehzahl auf 500 U/min gesetzt (Verzögerung von $t_{\text{Sample}} = 1$ s). Die Leistung steigt an, da die Turbine auf die Solldrehzahl 500 U/min abgebremst wird. Wenn die Drehzahl erreicht ist, wird der MPT wieder eingeschaltet und die Drehzahl mit max. Leistung wird wieder "gesucht".

c) Rohrturbine "Tissot"

Die Funktionsweise des MPT's soll mit der Rohrturbine "Tissot" überprüft werden. Es soll eine positive (30 -> 70 l/s) und negative (70 -> 30 l/s) Änderung im Durchfluss simuliert werden. Der Durchfluss ändert 20 l/s (kein Sprung, sondern eine Rampe).

Der MPT soll bei beiden Durchflüssen die maximale Leistung "finden".

Die max. Leistung der Turbine bei einem Durchfluss von 30 l/s ist nach Kennfeld 400 W (ohne ohmsche Verluste im Generator).

Die max. Leistung der Turbine bei einem Durchfluss von 70 l/s ist nach Kennfeld 4.5 kW (ohne ohmsche Verluste im Generator).

Folgende Regelparameter wurden eingestellt:

n_{diff}	10 U/min
n_{delta}	20 U/min
n_{max}	4000 U/min
n_{min}	500 U/min
P_{min}	200 W
T_{Sample}	1 s

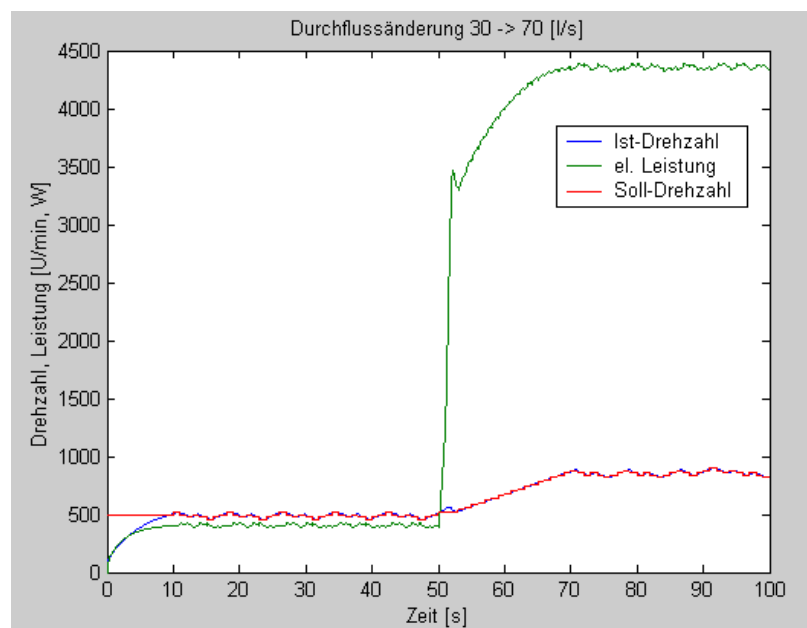


Abbildung 29 : Verhalten MPT "Tissot" Turbine, pos. Durchflussänderung

Abbildung 29 zeigt das Verhalten bei einem Durchflusswechsel von 30 auf 70 l/s im Zeitpunkt $t = 50$ s. Der MPT regelt auf die maximale Leistung. Durch die ohmschen Verluste im Generator ist die Leistung tiefer als im Kennfeld angegeben. Die Anpassung der Leistung dauert ca. 20 s.

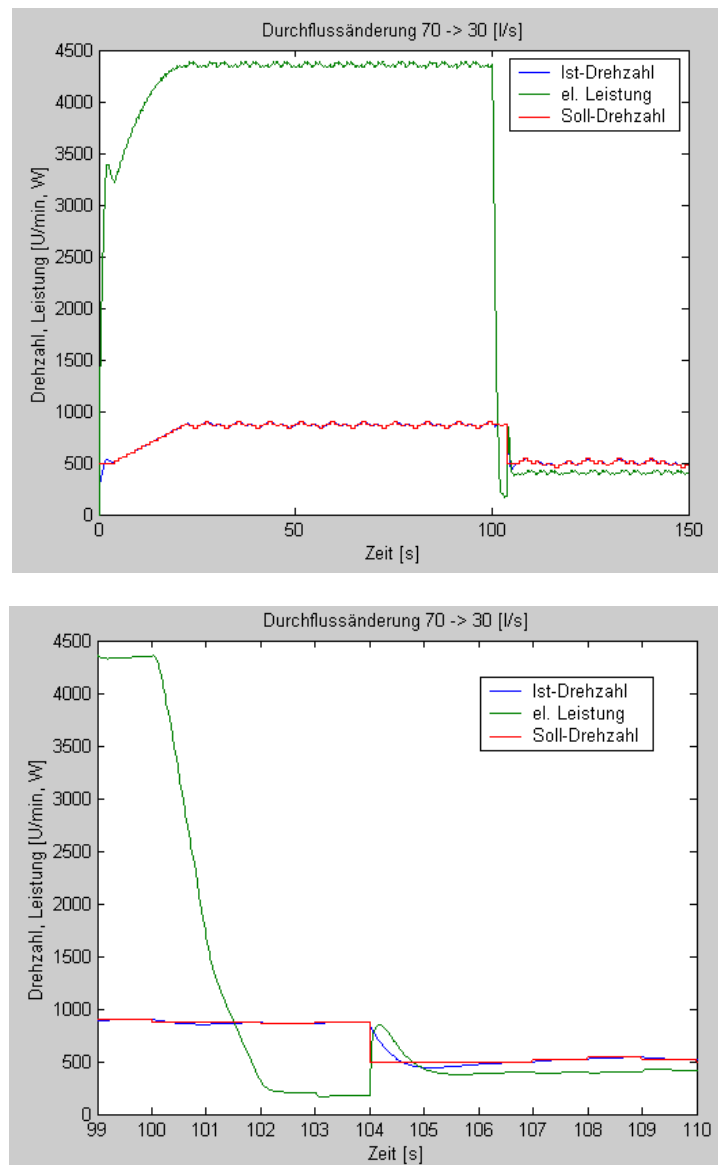


Abbildung 30 : Verhalten MPT "Tissot" Turbine, neg. Durchflussänderung

Abbildung 30 zeigt das Verhalten bei einem Durchflusswechsel von 70 auf 30 l/s im Zeitpunkt $t = 100$ s. Der MPT regelt auf die maximale Leistung. Durch die ohmschen Verluste im Generator ist die Leistung tiefer als im Kennfeld angegeben. Die Anpassung der Leistung dauert ca. 10 s. Während des Durchflusswechsels sinkt die Leistung. Der Drehzahlsollwert kann nicht mehr erreicht werden. Sobald die Leistung unter 200 W sinkt, wird der Sollwert der Drehzahl auf 500 U/min gesetzt (Verzögerung von $t_{\text{Sample}} = 1$ s). Die Leistung steigt an, da die Turbine auf die Solldrehzahl 500 U/min abgebremst wird. Wenn die Drehzahl erreicht ist, wird der MPT wieder eingeschaltet und die Drehzahl mit max. Leistung wird wieder "gesucht".

d) Kreiskolben-Turbine

Die Funktionsweise des MPT's soll mit der Kreiskolben-Turbine überprüft werden. Es soll eine positive (80 -> 160 l/s) und negative (160 -> 80 l/s) Änderung im Durchfluss simuliert werden. Der Durchfluss ändert 20 l/s (kein Sprung, sondern eine Rampe).

Der MPT soll bei beiden Durchflüssen die maximale Leistung "finden".

Die max. Leistung der Turbine bei einem Durchfluss von 80 l/s ist nach Kennfeld 1.3 kW (ohne mechanische und ohmsche Verluste im Generator).

Die max. Leistung der Turbine bei einem Durchfluss von 160 l/s ist nach Kennfeld 5.4 kW (ohne mechanische und ohmsche Verluste im Generator).

Folgende Regelparameter wurden eingestellt:

n_{diff}	10 U/min
n_{delta}	40 U/min
n_{max}	5000 U/min
n_{min}	500 U/min
P_{min}	200 W
T_{Sample}	2 s

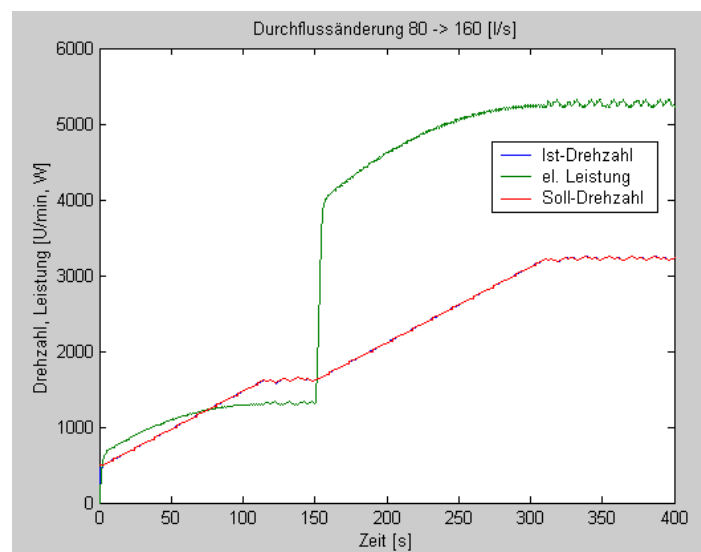


Abbildung 31 : Verhalten MPT Kreiskolben-Turbine, pos. Durchflussänderung

Abbildung 31 zeigt das Verhalten bei einem Durchflusswechsel von 80 auf 160 l/s im Zeitpunkt $t = 150$ s. Der MPT regelt auf die maximale Leistung. Durch die mechanischen und ohmschen Verluste im Generator ist die Leistung tiefer als im Kennfeld angegeben. Die Anpassung der Leistung dauert ca. 150 s.

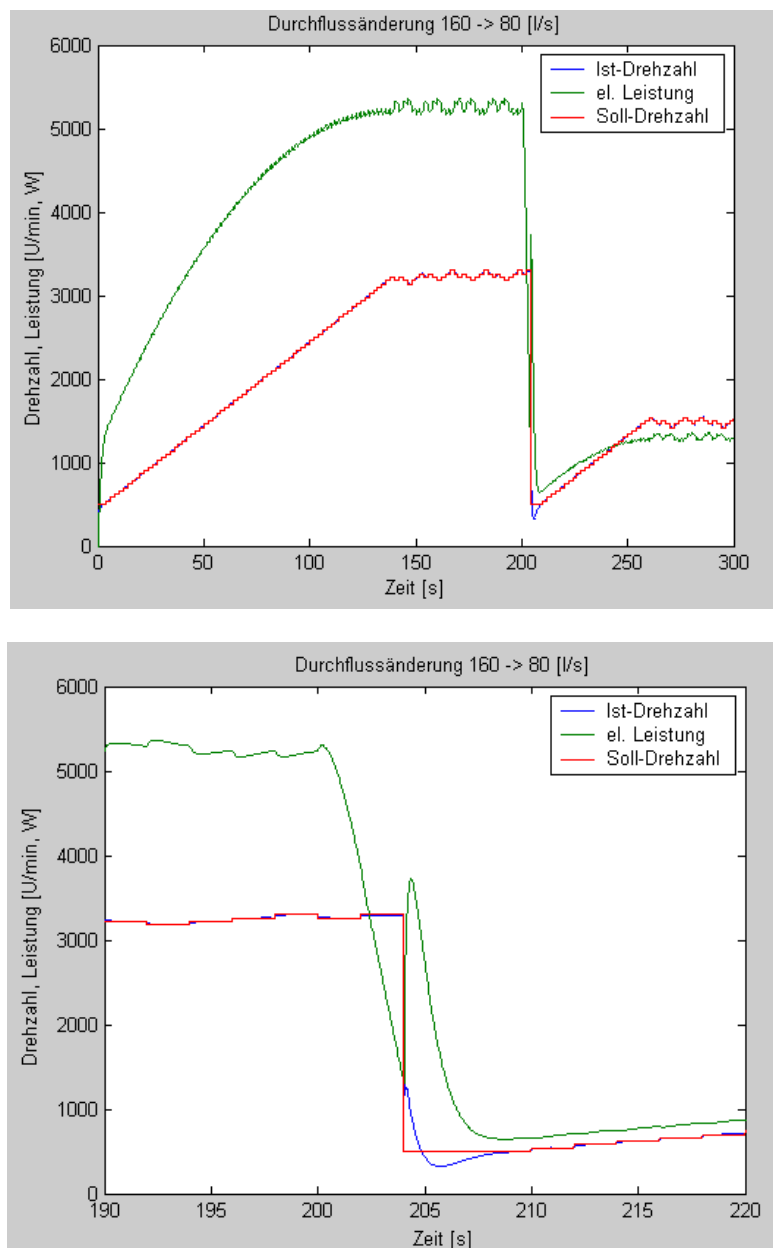
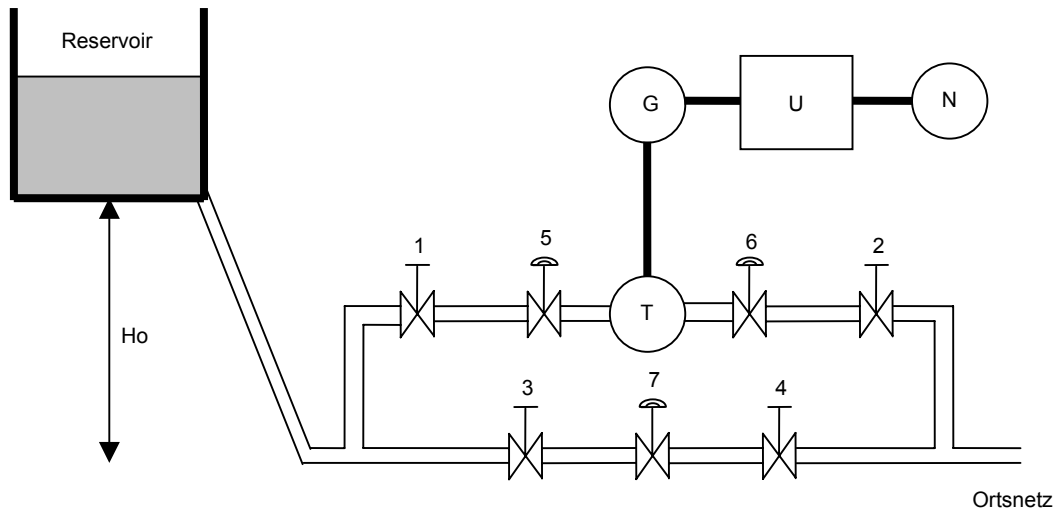


Abbildung 32 : Verhalten MPT Kreiskolben-Turbine, neg. Durchflussänderung

Abbildung 32 zeigt das Verhalten bei einem Durchflusswechsel von 160 auf 80 l/s im Zeitpunkt $t = 200$ s. Der MPT regelt auf die maximale Leistung. Durch die mechanischen und ohmschen Verluste im Generator ist die Leistung tiefer als im Kennfeld angegeben. Die Anpassung der Leistung dauert ca. 60 s. Während des Durchflusswechsels sinkt die Leistung. Der Drehzahlsollwert kann nicht mehr erreicht werden. Sobald die Leistung unter 200 W sinkt, wird der Sollwert der Drehzahl auf 500 U/min gesetzt (Verzögerung von $t_{\text{Sample}} = 2$ s). Die Leistung steigt an, da die Turbine auf die Solldrehzahl 500 U/min abgebremst wird. Wenn die Drehzahl erreicht ist, wird der MPT wieder eingeschaltet und die Drehzahl mit max. Leistung wird wieder "gesucht".

5.3.4 Simulation Öffnen des Ventils Turbine

Das Öffnen des Ventils der Turbine (5) soll simuliert werden. Vor dem Öffnen wird der Druck im Ortsnetz mit dem Druckreduzierventil im "by-pass" (7) geregelt. Nach dem Öffnen des Ventils regelt das Druckreduzierventil (6) den Druck im Ortsnetz.



- 1-4 Handventile
- 5 Steuerventil Turbine
- 6 Druckreduzierventil nach Turbine
- 7 Druckreduzierventil "by-pass"
- T Rohrturbine "Tissot"
- G Generator (Tissot)
- U Umrichter
- N El. Netz 3x400V
- Ho Gefälle Reservoir -> Ortsnetz

Abbildung 33 : Blockschema Druckreduzierung mit Energierückgewinnung

In Tabelle 5 sind die Daten für die Simulation aufgelistet. Das Lastventil ist bei dieser Simulation immer geöffnet. Das Druckreduzierventil (6) wurde auf einen höheren Druck (+0.5 bar) als das Druckventil (7) eingestellt.

Reservoir	Druckleitung	Turbine + Generator	Druckreduzierventil Turbine	Ventil Turbine
Ho = 80 m	L = 300 m D = 0.2 m a = 1200 m/s $\lambda = 0.0018$	Siehe Daten Rohrturbine "Tissot"	$(C_d A_G)_o = 0.008 \text{ m}^2$ p_Ausgang = 3.5 bar Regler: I = 0.001 P = 0.0001	$(C_d A_G)_o = 0.008 \text{ m}^2$ Kennlinie (öffnen): $\tau(t) = (t/2.1)^{0.75}$

Druckreduzierventil "by-pass"	Lastventil	Simulation
$(C_d A_G)_o = 0.008 \text{ m}^2$ p_Ausgang = 3 bar Regler: I = 0.001 P = 0.0001	$(C_d A_G)_o = 0.003 \text{ m}^2$ konstant geöffnet	n = 10 (Anzahl Teilstücke Druckleitung)

Tabelle 5 : Daten Simulation Öffnen Ventil Turbine

Das Simulationsmodell ist in Abbildung 34 dargestellt.

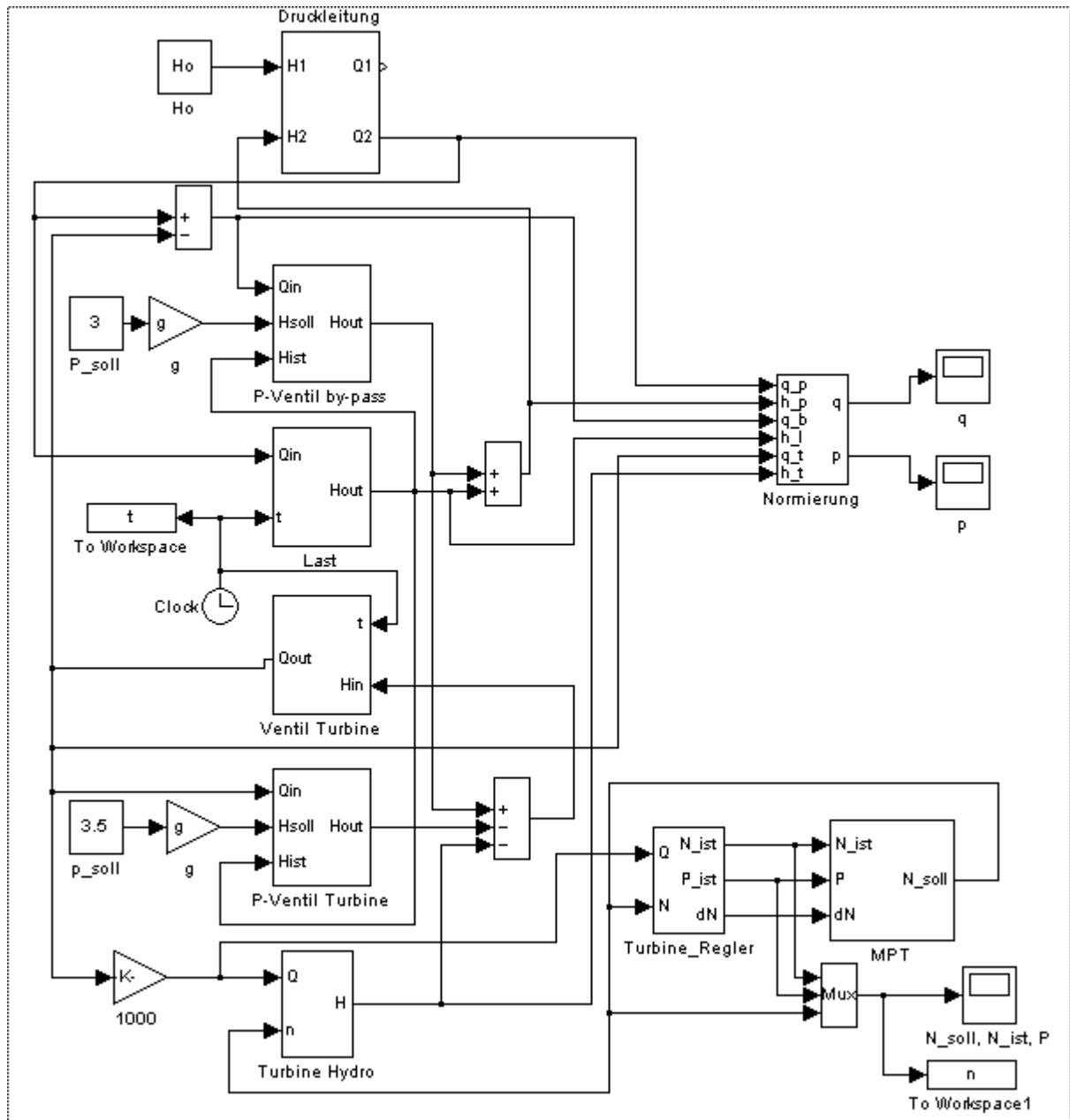


Abbildung 34 : Simulationsmodell Gesamtsystem Öffnen Ventil Turbine

Die Simulationsergebnisse sind in Abbildung 35 dargestellt. Wenn das Ventil vor der Turbine geschlossen ist, wird der Druck im Ortsnetz mit dem Druckreduzierventil (7) auf 3 bar geregelt.

Beim Zeitpunkt $t = 20$ s wird das Ventil vor der Turbine nach der Kennlinie in Tabelle 5 geöffnet. Der Durchfluss durch die Turbine steigt. Der Durchfluss im "by-pass" sinkt gegen 0.

Beim Öffnen des Ventils steigt der Druck im Ortsnetz auf ca. 4.2 bar an. Nach ca. 5 s sind die Druckverhältnisse wieder stabil und der Ortsdruck wird mit dem Druckreduzierventil (6) auf 3.5 bar geregelt. Der Druckabfall über die Turbine beträgt ca. 1.5 bar.

Der MPT regelt auf die Drehzahl der Turbine, bei welcher die maximale Leistung produziert wird.

Der eingestellte Differenzdruck zwischen den beiden Druckreduzierventilen muss im min. 0.3 bar betragen, sonst kann das System instabil sein (Nachweis nur mit Simulation -> Überprüfung in der Praxis notwendig).

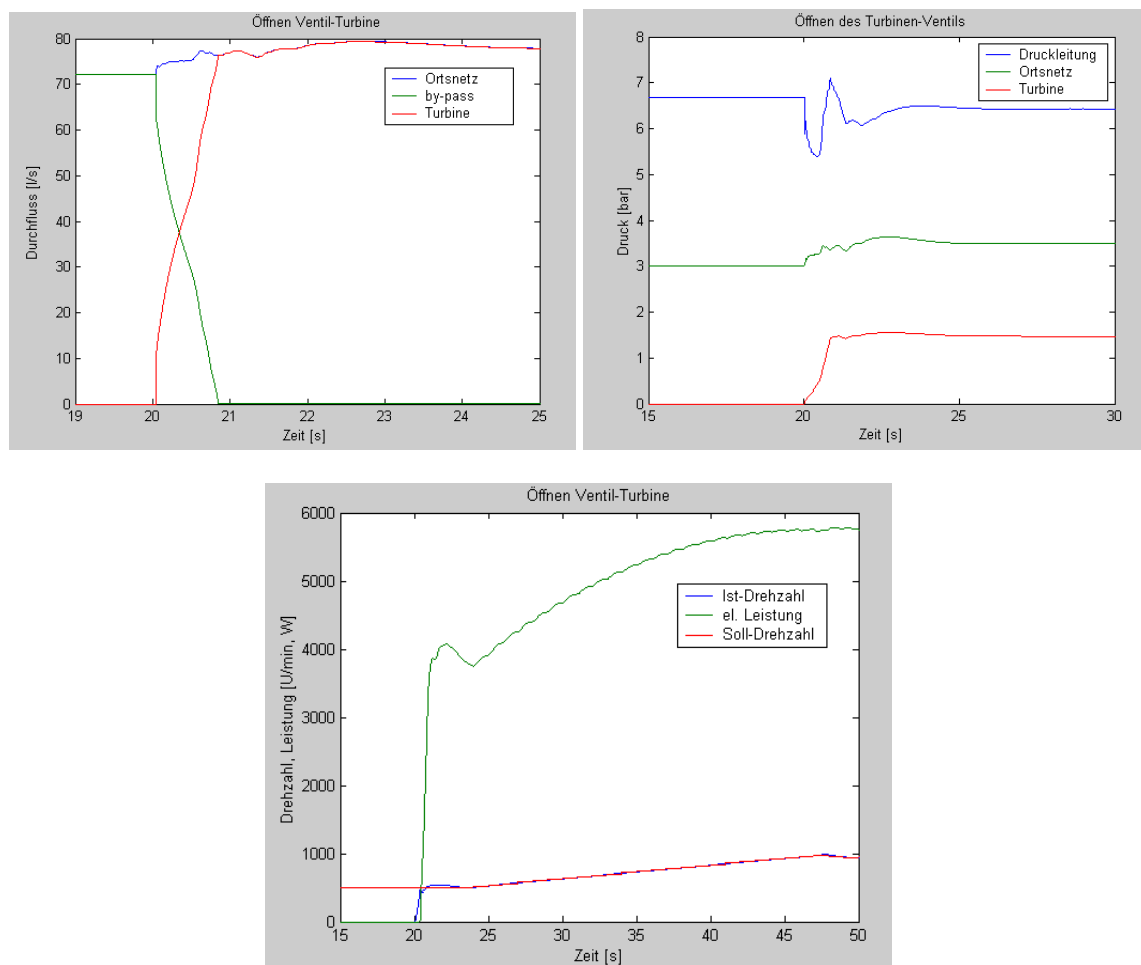
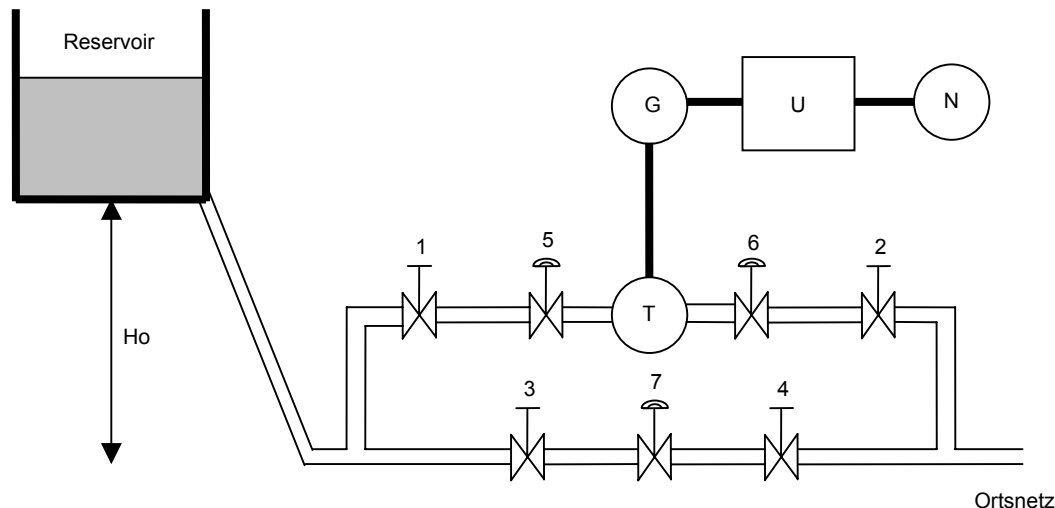


Abbildung 35 : Öffnen des Ventils Turbine

5.3.5 Simulation pos. Lastwechsel (Turbine "Tissot")

Ein positiver Lastwechsel (50% auf 100%) im Ortsnetz soll simuliert werden.



- 1-4 Handventile
- 5 Steuerventil Turbine
- 6 Druckreduzierventil nach Turbine
- 7 Druckreduzierventil "by-pass"
- T Rohrturbine "Tissot"
- G Generator (Tissot)
- U Umrichter
- N El. Netz 3x400V
- Ho Gefälle Reservoir -> Ortsnetz

Abbildung 36 : Blockschema Druckreduzierung mit Energierückgewinnung

In Tabelle 6 sind die Daten für die Simulation aufgelistet. Das Ventil der Turbine ist bei dieser Simulation immer geöffnet. Das Druckreduzierventil (6) wurde auf einen höheren Druck (+0.5 bar) als das Druckventil (7) eingestellt.

Reservoir	Druckleitung	Turbine + Generator	Druckreduzierventil Turbine	Ventil Turbine
Ho = 80 m	L = 300 m D = 0.2 m a = 1200 m/s $\lambda = 0.0018$	Siehe Daten Rohrturbine "Tissot"	$(C_d A_G)_o = 0.008 \text{ m}^2$ $p_{\text{Ausgang}} = 3.5 \text{ bar}$ Regler: I = 0.001 P = 0.0001	$(C_d A_G)_o = 0.008 \text{ m}^2$ Konstant geöffnet

Druckreduzierventil "by-pass"	Lastventil	Simulation
$(C_d A_G)_o = 0.008 \text{ m}^2$ $p_{\text{Ausgang}} = 3 \text{ bar}$ Regler: I = 0.001 P = 0.0001	$(C_d A_G)_o = 0.003 \text{ m}^2$ Das Ventil wird von 50% auf 100% geöffnet. Kennlinie (öffnen): $\tau(t) = (t/2.1)^{0.75}$	n = 10 (Anzahl Teilstücke Druckleitung)

Tabelle 6 : Daten Simulation pos. Lastwechsel

Das Simulationsmodell ist in Abbildung 37 dargestellt.

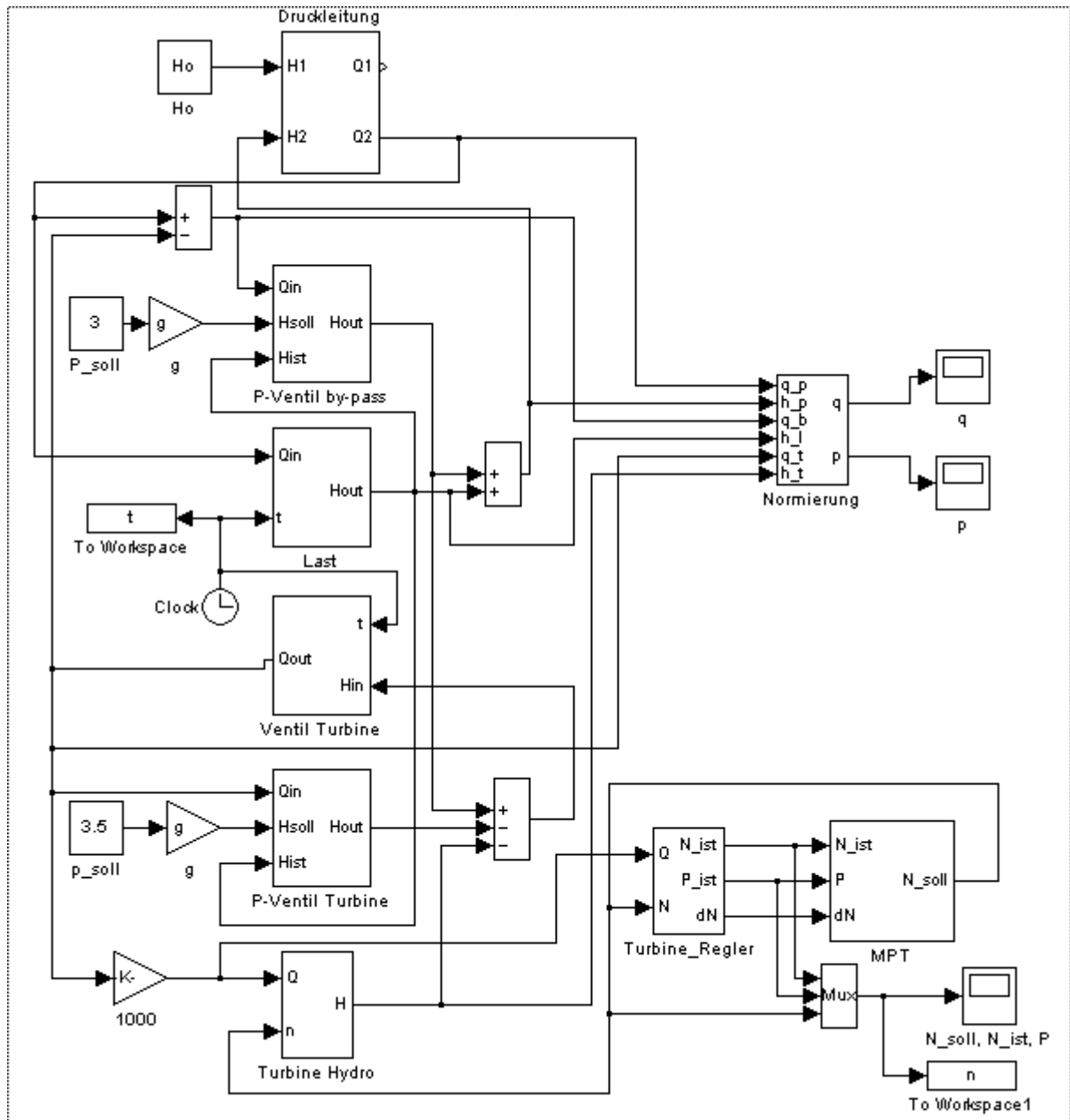


Abbildung 37: Simulationsmodell Gesamtsystem positiver Lastwechsel

Die Simulationsergebnisse sind in Abbildung 38 dargestellt.

Beim Zeitpunkt $t = 100$ s wird das Lastventil von 50% auf 100% geöffnet. Der Druck fällt im Ortsnetz für ca. 1 s auf 2 bar zusammen. Während dieser öffnet das Druckreduzierventil des "by-pass".

Durch den grösseren Durchfluss steigt der Druckabfall an der Turbine von 0.4 bar auf 1.5 bar.

Der Ausgangsdruck wird auf 3.5 bar geregelt.

Der MPT regelt auf die Drehzahl der Turbine, bei welcher die maximale Leistung produziert wird.

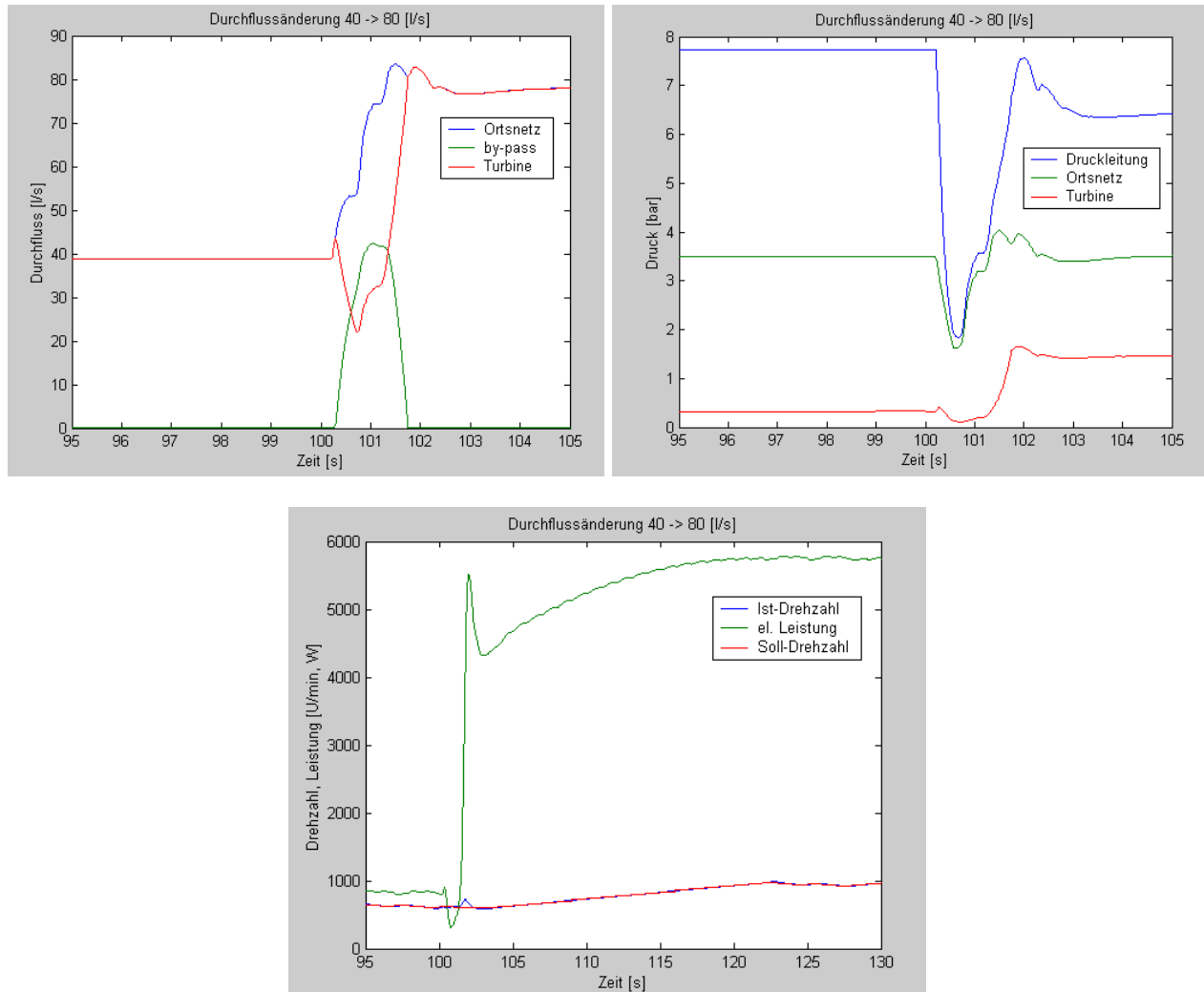
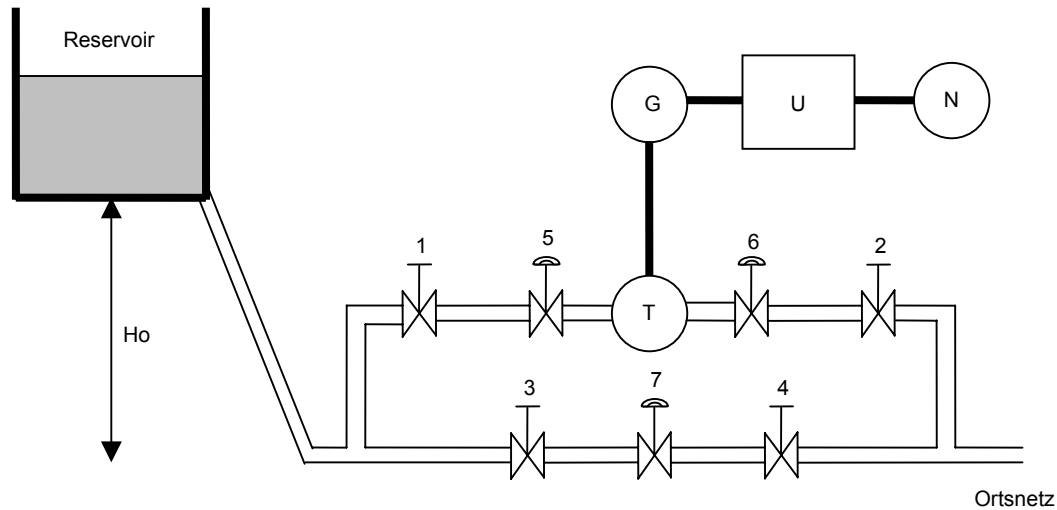


Abbildung 38 : pos. Lastwechsel Turbine "Tissot"

5.3.6 Simulation neg. Lastwechsel (Turbine "Tissot")

Ein negativer Lastwechsel (100% auf 50%) im Ortsnetz soll simuliert werden.



- 1-4 Handventile
- 5 Steuerventil Turbine
- 6 Druckreduzierventil nach Turbine
- 7 Druckreduzierventil "by-pass"
- T Rohrturbine "Tissot"
- G Generator (Tissot)
- U Umrichter
- N El. Netz 3x400V
- Ho Gefälle Reservoir -> Ortsnetz

Abbildung 39 : Blockschema Druckreduzierung mit Energierückgewinnung

In Tabelle 7 sind die Daten für die Simulation aufgelistet. Das Ventil vor der Turbine ist bei dieser Simulation immer geöffnet. Das Druckreduzierventil (6) wurde auf einen höheren Druck (+0.5 bar) als das Druckventil (7) eingestellt.

Reservoir	Druckleitung	Turbine + Generator	Druckreduzierventil Turbine	Ventil Turbine
Ho = 80 m	L = 300 m D = 0.2 m a = 1200 m/s $\lambda = 0.0018$	Siehe Daten Rohrturbine "Tissot"	$(C_d A_G)_o = 0.008 \text{ m}^2$ p_Ausgang = 3.5 bar Regler: I = 0.001 P = 0.0001	$(C_d A_G)_o = 0.008 \text{ m}^2$ Konstant geöffnet

Druckreduzierventil "by-pass"	Lastventil	Simulation
$(C_d A_G)_o = 0.008 \text{ m}^2$ p_Ausgang = 3 bar Regler: I = 0.001 P = 0.0001	$(C_d A_G)_o = 0.003 \text{ m}^2$ Das Ventil wird von 100% auf 50% geschlossen. Kennlinie (öffnen): $\tau(t) = (t/2.1)^{0.75}$	n = 10 (Anzahl Teilstücke Druckleitung)

Tabelle 7 : Daten Simulation negativer Lastwechsel

Das Simulationsmodell ist in Abbildung 40 dargestellt.

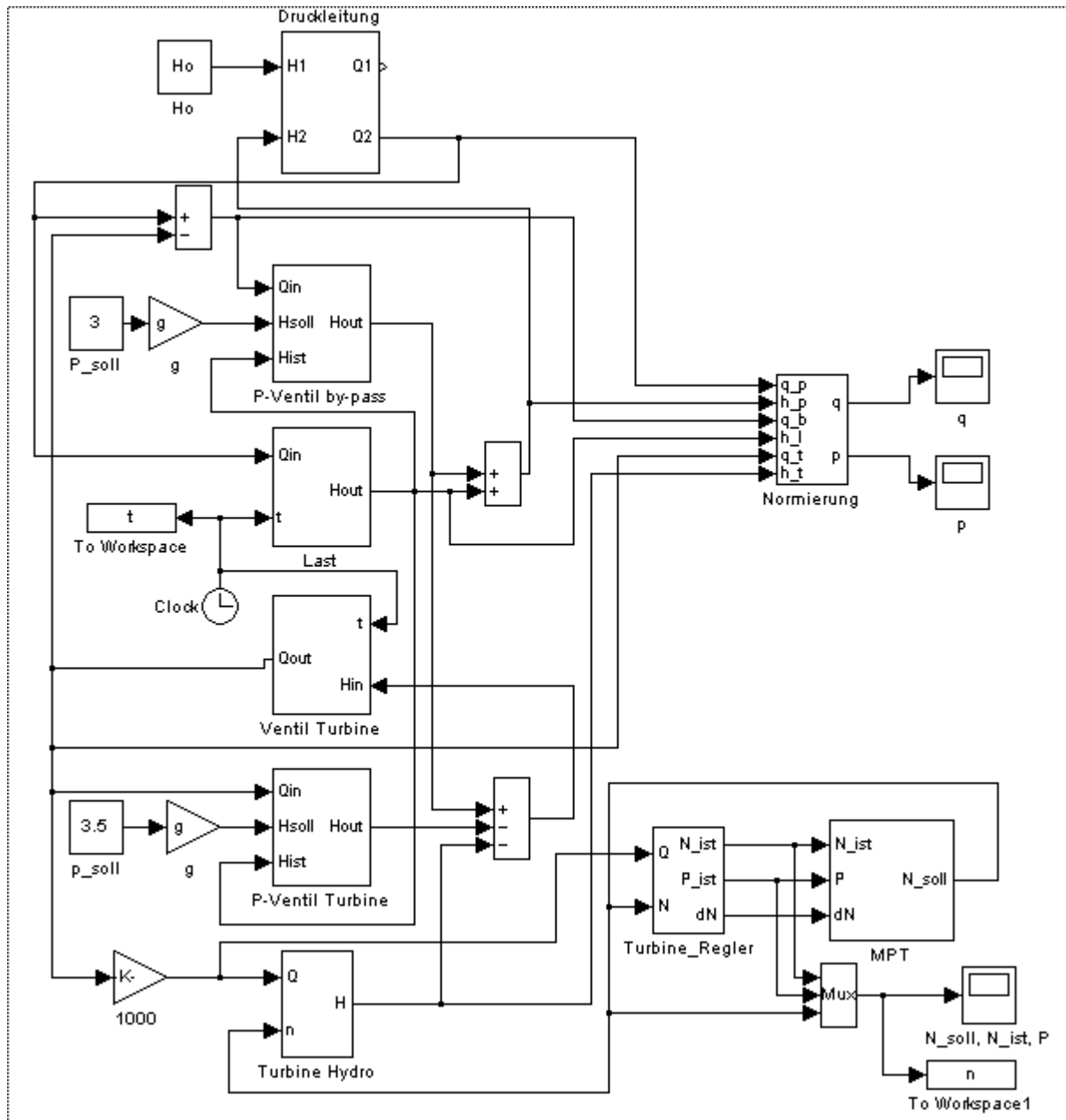


Abbildung 40 : Simulationsmodell Gesamtsystem negativer Lastwechsel

Die Simulationsergebnisse sind in Abbildung 41 dargestellt.

Beim Zeitpunkt $t = 100$ s wird das Lastventil von 100% auf 50% geschlossen. In der Druckleitung steigt der Druck auf über 20 bar an. Der Druckanstieg ist von der Schliessgeschwindigkeit des Lastventils abhängig. Simulationen mit kleineren Schliessgeschwindigkeiten haben deutlich kleinere Druckanstiege gezeigt. Im Ortsnetz und an der Turbine ist der Druckanstieg klein.

Durch den kleineren Durchfluss sinkt der Druckabfall an der Turbine von 1.5 bar auf 0.4 bar.

Der Ausgangsdruck wird auf 3.5 bar geregelt.

Der MPT regelt auf die Drehzahl der Turbine, bei welcher die maximale Leistung produziert wird.

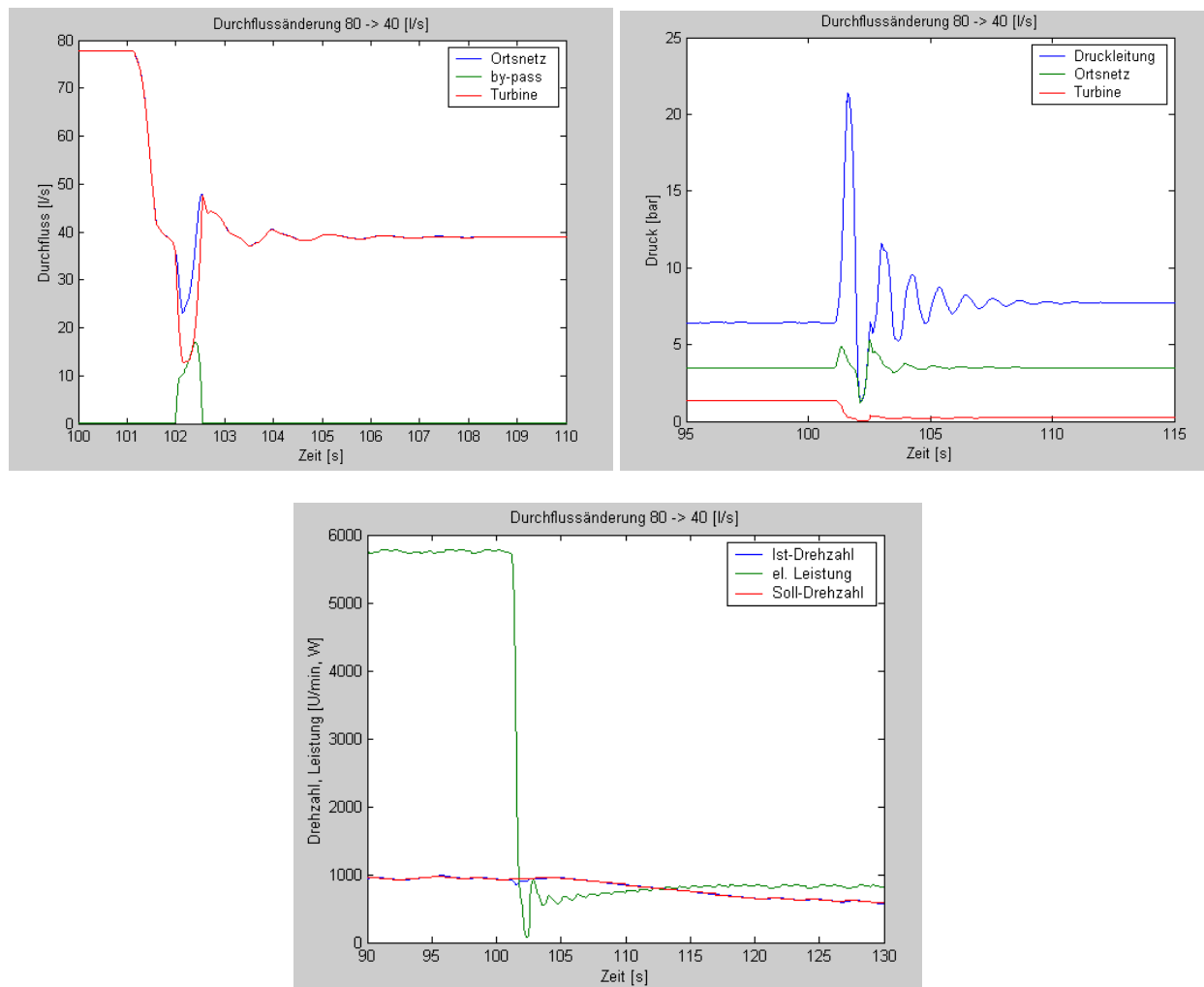
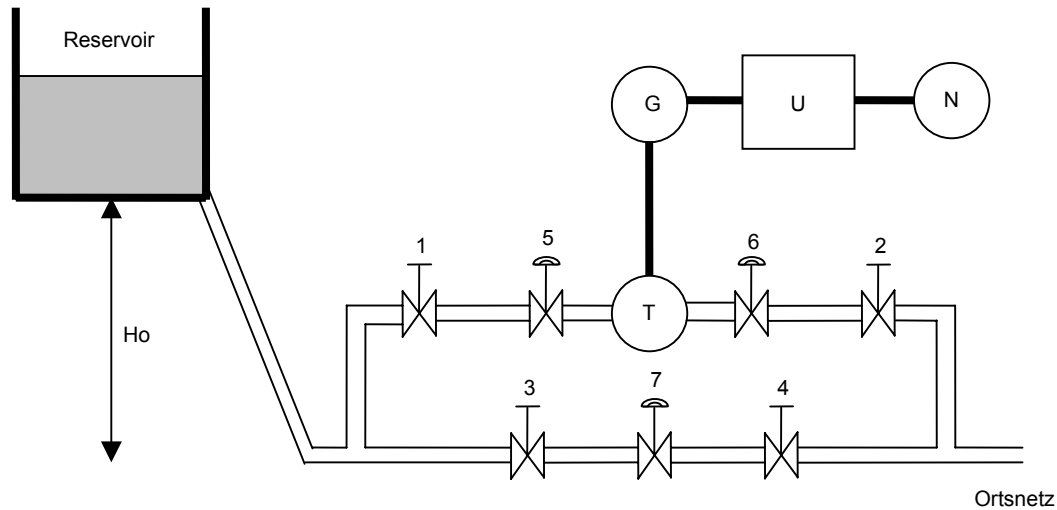


Abbildung 41 : neg. Lastwechsel Turbine "Tissot"

5.3.7 Simulation el. Netzausfall (Turbine "Tissot")

Ein el. Netzausfall soll simuliert werden.



- 1-4 Handventile
- 5 Steuerventil Turbine
- 6 Druckreduzierventil nach Turbine
- 7 Druckreduzierventil "by-pass"
- T Rohrturbine "Tissot"
- G Generator (Tissot)
- U Umrichter
- N El. Netz 3x400V
- Ho Gefälle Reservoir -> Ortsnetz

Abbildung 42 : Blockschema Druckreduzierung mit Energierückgewinnung

In Tabelle 7 sind die Daten für die Simulation aufgelistet. Das Ventil vor der Turbine wird beim detektieren des el. Netzausfall geschlossen. Das Lastventil ist 100% geöffnet. Das Druckreduzierventil (6) wurde auf einen höheren Druck (+0.5 bar) als das Druckventil (7) eingestellt.

Reservoir	Druckleitung	Turbine + Generator	Druckreduzierventil Turbine	Ventil Turbine
Ho = 80 m	L = 300 m D = 0.2 m a = 1200 m/s $\lambda = 0.0018$	Siehe Daten Rohrturbine "Tissot"	$(C_d A_G)_o = 0.008 \text{ m}^2$ $p_{\text{Ausgang}} = 3.5 \text{ bar}$ Regler: I = 0.001 P = 0.0001	$(C_d A_G)_o = 0.008 \text{ m}^2$ Kennlinie (schliessen): $\tau(t) = 1 - (t/2.1)^{0.75}$

Druckreduzierventil "by-pass"	Lastventil	Simulation
$(C_d A_G)_o = 0.008 \text{ m}^2$ $p_{\text{Ausgang}} = 3 \text{ bar}$ Regler: I = 0.001 P = 0.0001	$(C_d A_G)_o = 0.003 \text{ m}^2$ Konstant geöffnet	n = 10 (Anzahl Teilstücke Druckleitung)

Tabelle 8 : Daten Simulation el. Netzausfall

Das Simulationsmodell ist in Abbildung 43 dargestellt.

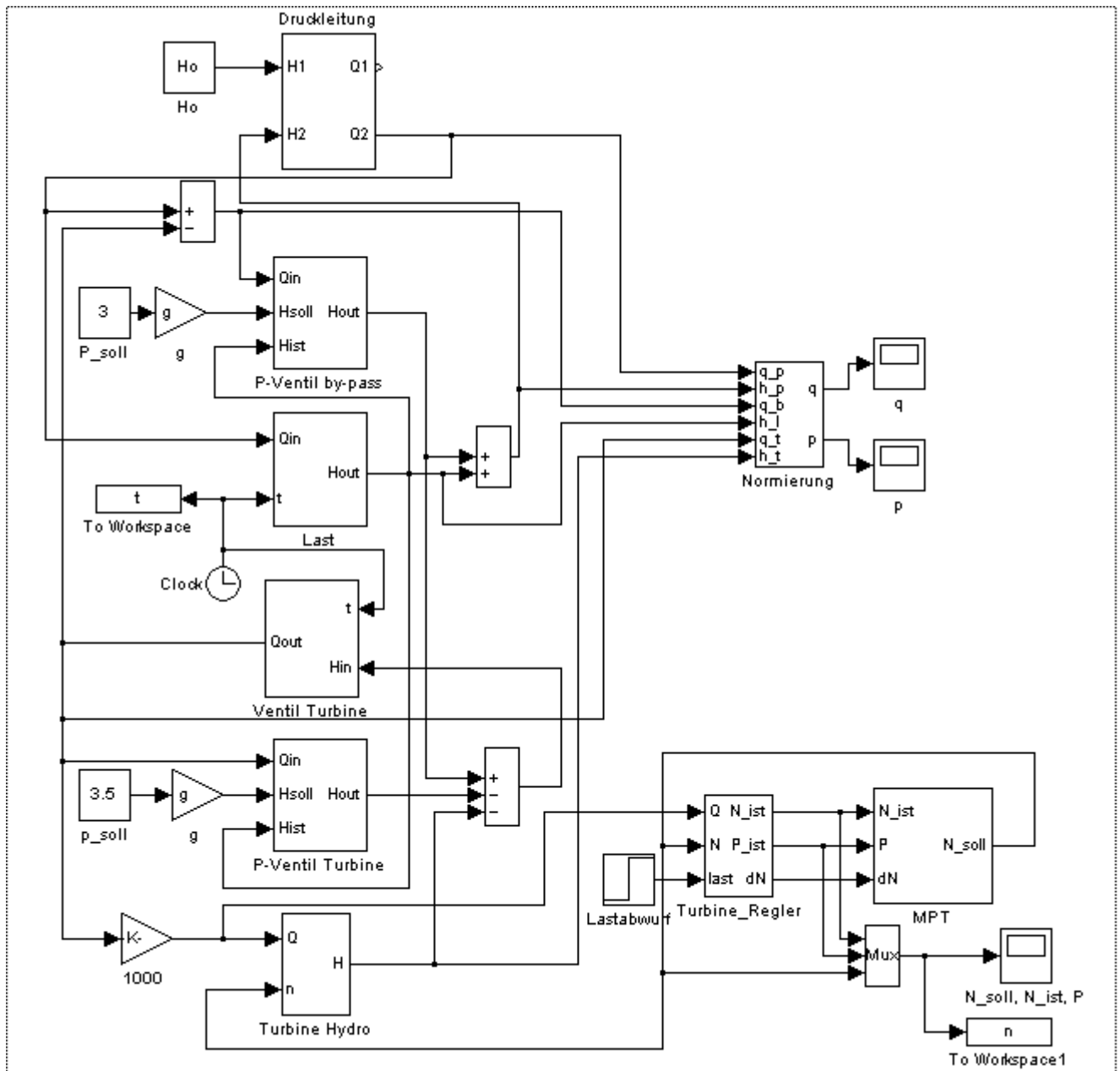


Abbildung 43 : Simulationsmodell Gesamtsystem el. Netzausfall

Die Simulationsergebnisse sind in Abbildung 44 dargestellt.

Beim Zeitpunkt $t = 60$ s wird das el. Netz vom Generator getrennt und das Ventil vor der Turbine geschlossen. Der Ortsdruck wird nach dem Schliessen des Ventils vor der Turbine durch das Druckreduzierventil im "by-pass" auf 3 bar geregelt.

Die Drehzahl der Turbine steigt nach dem Netzausfall an. Die Drehzahl steigt auf ca. 2700 U/min an. Die Drehzahl steigt nicht höher an, da nach Kennfeld bei dieser Drehzahl keine Leistung mehr produziert wird. Da die Reibung im Kennfeld berücksichtigt ist, bleibt die Drehzahl auf 2700 U/min stehen. In Abbildung 44d wurde die Reibung nicht im Kennfeld sondern im Simulationsmodell berücksichtigt. Die Drehzahl sinkt durch die Reibungsverluste.

Beim erstellen der Kennfeld für eine Turbine sollte nur der hydraulische Teil der Turbine im Kennfeld berücksichtigt werden. Die mechanischen Verluste von Turbine und Generator sollten als Parameter im Simulationsmodell eingegeben werden.

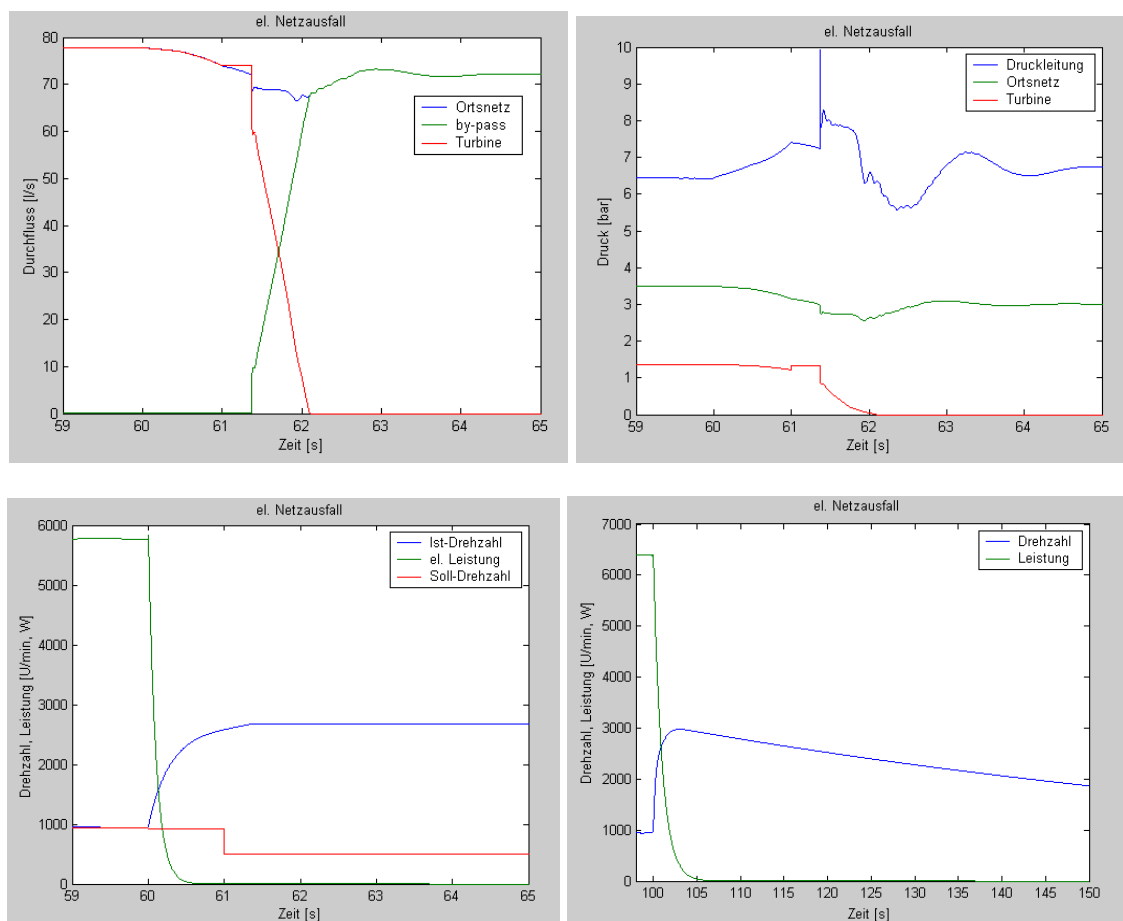


Abbildung 44 : el. Netzausfall Turbine "Tissot"

6 Mögliche Turbinen

6.1 Rohrturbine "Tissot"

Diese Rohrturbine wurde von N. Tissot entwickelt. Die Turbine hat keine verstellbaren Schaufeln, der optimale Arbeitspunkt wird durch verstellen der Drehzahl erreicht.

Die Turbine wurde von N. Tissot ausgemessen, Muscheldiagramme sind vorhanden. Momentan wird die Turbine in Frankreich getestet. Es existiert 1 Prototyp mit Generator.

6.2 Rohrturbine "ecopower"

Die Firma ecopower hat eine Rohrturbine entwickelt. Die Turbine hat keine verstellbaren Schaufeln. Der optimale Arbeitspunkt wird über die Drehzahl eingestellt.

Die Turbine ist einfach aufgebaut, da der Generator und die Turbine eine Einheit bilden.

Es existiert ein Prototyp, welcher nicht funktionsfähig ist -> zu grosse Lagerverluste. Die Lager müssen gewechselt werden, Konzept vorhanden (Herr Freudiger).

Rechtliche Situation wird momentan durch T.Schafroth geklärt, da ecopower stillgelegt wurde. Ev. Verkauf der Turbine möglich.

Ein BFE Projekt wurde im Jahr 2000 durchgeführt (mit Herrn Leutwiler)

6.3 Rohrturbine "Axent"

Im Internet wird diese Turbine mit einem sehr guten Wirkungsgrad bei variabler Drehzahl angeboten. Bis jetzt aber keine konkreten Daten erhalten.

6.4 Kreiskolben-Turbine

Kreiskolbenpumpen sind auf dem Markt erhältlich. Sie können auch als Motor(Turbine) eingesetzt werden. Der komplizierte Aufbau, die Reibungsverluste durch die Dichtungen und der bescheidene Wirkungsgrad sprechen eher weniger für diese Arbeitsmaschine

7 Literaturangaben

- [1] BINER H-P. - 1995 - Neue Technologien für Kleinwasserkraftwerke
- [2] WYLIE, E.B. & STREETER, V. L. - 1993 - Fluid transients in systems. Rentice Hall.
- [3] NIELSEN, T.K. & RASMUSSEN, F.O. - 1992 - Analytic model for dynamic simulations of Francis turbines implemented in MOC. 16th Symposium of IHAR, Sao Paolo.
- [4] NIELSEN, T.K. - 1995 - Simulation of dynamic behaviour of governing turbines sharing the same electrical grid. 7th international meeting, Slovenia

8 Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung	Bemerkungen
MPT	Maximum Power Tracker	
a	Wellengeschwindigkeit	[m/s]
D	Rohrdurchmesser	[m]
g	Erdbeschleunigung	9.81 [m/s ²]
H	Piezometrische Höhe	[m]
p	Druck	[bar]
Jh	Hydraulisches Trägheitsmoment Turbine	[Kg/m ⁴]
Jt	Mechanisches Trägheitsmoment Turbine	[kg*m ²]
Jg	Mechanisches Trägheitsmoment Generator	[kg*m ²]