

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 81 (1990)

Heft: 4

Artikel: Risikobewertung als Entscheidungshilfe bei Wartung und Unterhalt

Autor: Hartmann, O.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-903088>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 26.11.2024

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Risikobewertung als Entscheidungshilfe bei Wartung und Unterhalt

O. Hartmann

Die hier dargestellte Methode wurde vom Verfasser im Zusammenhang mit Unterhaltsproblemen bei Wasserkraftanlagen entwickelt [1]. Sie unterstützt eine rationale Beurteilung der Frage, ob ein bestimmtes Bauteil oder ein System vorsorglich zu reparieren oder zu ersetzen ist, indem die Kosten der Reparatur dem Risiko des Versagens gegenübergestellt werden. Fällt dieser Vergleich zugunsten der Reparatur aus, übertrifft also das Risiko die Reparaturkosten, so ist die Reparatur vor Eintritt des Versagens als wirtschaftlich gerechtfertigt anzusehen.

L'auteur a développé la méthode représentée ici en rapport avec des problèmes d'entretien liés aux installations hydrauliques [1]. Opposant les coûts de la réparation au risque de la panne, cette méthode soutient un jugement rationnel de la question de savoir si un élément précis de l'installation ou un système doit par mesure de précaution être réparé ou remplacé. Si la comparaison est en faveur de la réparation, c'est-à-dire que le risque est plus important que les coûts de la réparation, la réparation à faire avant que la panne ne survienne, doit alors être considérée comme économiquement justifiée.

Adresse des Autors

Otto Hartmann, Dipl.-Ing.
Hinterbächlistr. 19, 5452 Oberrohrdorf

Einleitung

Die ökonomische Begründung vorsorglicher Reparaturen ist eine Problematik, die sich nicht nur im Zusammenhang mit Wasserkraftwerken stellt. So ist auch die nachstehend angegebene Methode für beliebige Fachgebiete, Systeme und Bauteile anwendbar. Dennoch ist es nicht ganz zufällig, dass der Anstoss aus dem Gebiet der Wasserkraft kommt. Hier treffen mehrere Faktoren zusammen, welche die rationale Begründung einer vorsorglichen Reparatur oder Erneuerung besonders erschweren:

- Wasserkraftanlagen zeichnen sich durch Langlebigkeit und hohe Zuverlässigkeit aus [2]. Sie überdauern Generationen, weshalb eine «Erneuerungspraxis» wie auf anderen industriellen Tätigkeitsgebieten weitgehend fehlt. Dies gilt für die technische wie für die rechtliche Seite des Problems. Erst in den letzten Jahren wurde das Thema «alte Wasserkraftwerke» akut [3].
- Typisch für Wasserkraftanlagen

und ihre Bauteile ist allmähliche Abnutzung durch Erosion, Korrosion, Kavitation, Alterung, Versprödung und ähnliche Erscheinungen. Plötzliches, vollständiges Versagen ist eher selten. Es erschwert die Entscheidungsfindung zweifellos, dass die Reparatur oft nicht als zwingend notwendig erscheint, bis schliesslich ein Versagen eintritt, oft spektakulär, manchmal auch katastrophal verlaufend (Bild 1).

- Wasserkraftanlagen sind nicht allzu häufig und zudem äusserst verschieden voneinander. Dies ist einer statistischen Auswertung hinderlich; das Kriterium der grossen Zahl ist nicht erfüllt. Die vorhandenen Daten über die Zuverlässigkeit von Wasserkraftanlagen sind eher spärlich und zudem oft nicht vergleichbar. Sie erlauben deshalb nur generelle Zuordnungen - die Anlage liegt etwa im Mittelfeld bzw. darüber oder darunter. Eine Antwort auf die Frage, wann ein bestimmtes Bauteil zu ersetzen ist, lässt sich mit Hilfe der Statistik kaum finden.



Bild 1 Das Wasserkraftwerk St. Anthony Falls in Minneapolis, USA, nach dem Einsturz infolge Unterspülung

Andererseits besteht ein klares Bedürfnis nach analytischen und rationalen Begründungen, handelt es sich doch oft um Millionenbeträge, die für Reparatur oder Ersatz von Komponenten in Wasserkraftanlagen aufzuwenden sind. Qualitative Begründungen, die Reparatur sei dringend, absolut notwendig, überfällig, unvermeidbar usw. können nicht überzeugen. Hinzu kommt, dass viele Betreiber mehrere Anlagen besitzen und deshalb gezwungen sind, Prioritäten zu setzen. «Dringend» allein genügt nicht! Was ist am dringendsten, was folgt an zweiter Stelle, was an dritter?

Bewertung nach Punkten

Einen Ausweg bieten Punktbewertungen [4]. Dabei werden Risikopunkte verwendet, die ihrerseits aus Addition oder Multiplikation von Beurteilungs-Punkten entstehen, indem man die Wahrscheinlichkeit des Versagens (etwa von «keine Gefahr» = Null Punkte bis «akute Gefahr» = 10 Punkte) mit den mutmasslichen Konsequenzen des Versagens (etwa «keine spürbaren Folgen» = Null Punkte bis «katastrophale Folgen» = 10 Punkte) verknüpft.

In der Praxis erweist sich jedoch das Punktesystem als recht abstrakt, und manche Fachleute fühlen sich überfordert, wenn sie die aus Inspektion und Messungen gewonnene Zustandsbeurteilung eines Bauteils in Punkten ausdrücken sollen. Es wurde deshalb versucht, eine Methode zu entwickeln, die mit konkreten Kosten und Wahrscheinlichkeiten arbeitet.

Quantitative Risikobewertung

Irgendwann, nach genügend langer Zeit, wird jedes Bauteil versagen. Die Reparatur ist deshalb grundsätzlich unvermeidbar, es sei denn, man würde die Anlage als Ganzes aufgeben, was wohl in den wenigsten Fällen vernünftig ist und hier nicht weiter in Betracht gezogen wird.

Die Frage lautet also nicht, ob eine Reparatur notwendig ist, sondern ob sie vor Eintritt des Versagens vorzunehmen ist und, wenn ja, zu welchem Zeitpunkt. Es ist naheliegend, die Antwort in einem Kostenvergleich zu suchen. Dabei ist es zweckmässig, die Gesamtkosten in vier Kostenarten aufzugliedern: direkte und indirekte Kosten sowie Folge- und Haftungsschäden.

Tabelle I gibt eine Definition der Kostenarten und einen generellen Vergleich zwischen den Kosten vor und nach Versagen des betrachteten Bauteils. Es ist hervorzuheben, dass zwei Kostenarten, nämlich Folgeschäden und Haftungsschäden, nur im Falle des Versagens eintreten, durch vorsorgliche Reparatur aber grundsätzlich vermieden werden.

Direkte und indirekte Kosten lassen sich ohne weiteres feststellen oder abschätzen. Schwieriger ist es mit den Folge- und Haftungsschäden, da deren Höhe von Zufälligkeiten abhängt. Ein praktisch gangbarer Weg besteht darin, die maximalen Kosten (das «Schadenpotential») abzuschätzen und mit einer geschätzten Wahrscheinlichkeit,

dass ein Versagen zu maximalen Folge- und Haftungskosten führt, zu multiplizieren. Unter der Annahme konstanten Risikos (geringere Schäden treten um so häufiger auf, so dass das Produkt aus Schadenshöhe mal Wahrscheinlichkeit konstant bleibt), können die wahrscheinlichen Folge- und Haftungsschäden als konstante Werte in die Rechnung eingeführt werden.

Ein Vergleich der so ermittelten Gesamtkosten für die Reparatur vor und nach Versagen lässt bereits eine gewisse Aussage zu: Ist der Unterschied gering, lohnt sich eine vorsorgliche Reparatur kaum. Führt das Versagen jedoch zu erheblichen Mehrkosten, ist die vorsorgliche Reparatur angezeigt. Es leuchtet auch ohne weiteres ein,

Kostenart	Definition	Geplante Wartung Reparatur vor Versagen	Erzwungener Ausfall Reparatur nach Versagen
Direkte Kosten	Kosten für Material und Arbeit, die bei der Reparatur anfallen	Optimale Lösung für Reparatur oder Ersatz kann gewählt werden	Reparatur oft nicht mehr möglich, Teil muss ersetzt werden; Zeitdruck verhindert preisgünstige Ersatzbeschaffung; zusätzliche Kosten für Nacht- und Wochenend-Schichtarbeit
Indirekte Kosten	Entgangene Betriebseinnahmen infolge Betriebsausfalls	Dauer des Stillstands reduziert durch Planung und Vorbereitung der Arbeiten; Zeitpunkt kann so gewählt werden, dass Einnahmenverlust minimal wird	Beschaffung von Ersatzteilen und mangelnde Vorbereitung verlängern die Dauer des Betriebsausfalls; da Zeitpunkt des Versagens zufällig, ist mit durchschnittlichen Einnahmeverlusten zu rechnen
Folgeschäden	Schäden an anderen Teilen der Anlage infolge Versagens der betrachteten Komponente	Nicht gegeben	Können ein Vielfaches der direkten Kosten betragen, je nach betrachteter Komponente; zusätzliche Dauer des Betriebsausfalls zur Behebung der Folgeschäden
Haftungsschäden	Schäden ausserhalb der Anlage, Haftung gegenüber Dritten	Nicht gegeben	Je nach betrachteter Komponente, möglicherweise katastrophal

Tabelle 1 Gegenüberstellung der Kostenarten

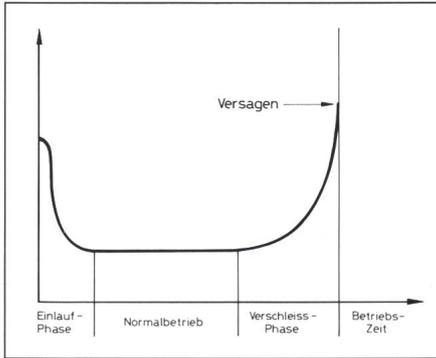


Bild 2 Fehlerhäufigkeit in Abhängigkeit von der Lebensdauer - generelle Darstellung («Badewannenkurve»)

dass man die vorsorgliche Reparatur um so früher durchführen sollte, das heisst mit grösserem Sicherheitsabstand zum vermutlichen Zeitpunkt des Versagens, je grösser der Kostenunterschied ist. Aber wann? Man will die Reparaturkosten ja auch nicht zu früh aufwenden.

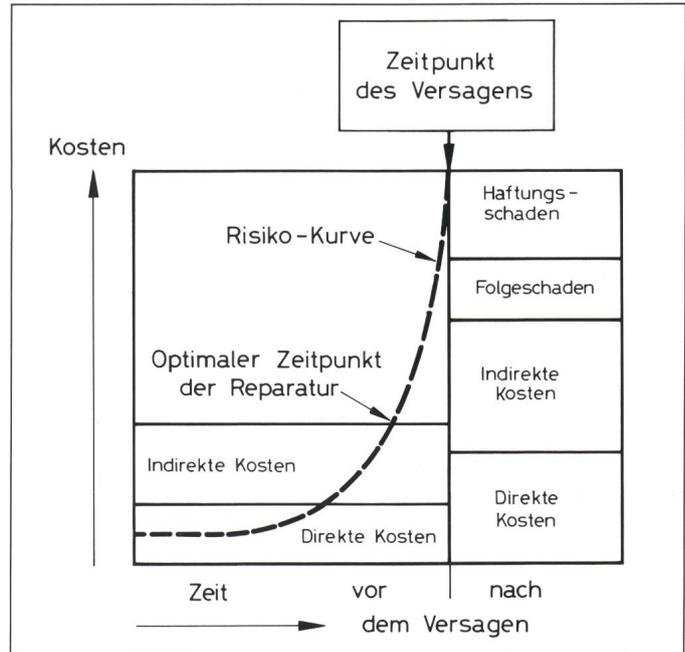
Der optimale Zeitpunkt

Hier kann die Überlegung weiterhelfen, dass die Reparatur spätestens dann ausgeführt sein sollte, wenn das mit dem Versagen verbundene Risiko die Kosten der vorsorglichen Reparatur übertrifft. Risiko ist dabei als Produkt aus Wahrscheinlichkeit des Versagens und dem erwarteten Schaden zu verstehen, entspricht also einem Geldbetrag. Nun liegt im allgemeinen - wir betrachten den rechten Teil der bekannten «Badewannenkurve» in Bild 2 [5] - eine zeitabhängige Verschlechterung des Zustandes vor. Das bedeutet, dass die ursprünglich sehr kleine Wahrscheinlichkeit des Versagens zuerst wenig, dann allmählich stärker und zuletzt, mit zunehmender Abnutzung, immer rascher zunimmt, bis sie im Augenblick des Versagens hundert Prozent erreicht. In gleichem Mass nimmt das Risiko im Verlauf der Zeit zu und entspricht im Augenblick des Versagens den mutmasslichen Gesamtkosten.

Dieser Vorgang ist in Bild 3 veranschaulicht. Der Schnittpunkt der Risikokurve mit den Reparaturkosten gibt den optimalen Zeitpunkt für die vorsorgliche Reparatur an. Für den Schnittpunkt gilt gemäss Definition des Risikos, dass die Wahrscheinlichkeit des Versagens dem Verhältnis zwischen Schadenshöhe und vorsorglichen Reparaturkosten entspricht.

Nun ist der Verlauf der Risikokurve natürlich nicht bekannt. Er hängt von

Bild 3 Kostenarten und Risikoverlauf



der Art des Bauteils und seiner Beanspruchung sowie von der Wartung und anderen Umständen ab.

Für manche Fälle wird ein etwa linearer Verlauf gelten, meist jedoch eine progressive Zunahme, wie in Bild 3 angedeutet. Ein exponentieller Verlauf dürfte oft eine brauchbare Näherung darstellen. Dies hat den Vorteil, dass die Wahrscheinlichkeit des Versagens über der Zeit im logarithmischen Massstab eine Gerade ergibt, die durch zwei Punkte bestimmt ist.

Auf diese Weise kann das Ergebnis einer Zustandsbeurteilung einfach und anschaulich mit den Reparaturkosten und der vermutlichen Schadenshöhe im Falle eines Versagens verknüpft

werden, indem der Experte die Wahrscheinlichkeit des unmittelbaren Versagens im Istzustand sowie die mutmassliche Restlebensdauer des Bauteiles abschätzt. Beide Werte werden mit einer geraden Linie verbunden, und die Linie der Äquivalenz-Wahrscheinlichkeit wird eingetragen, wie in Bild 4 gezeigt. Der Schnittpunkt ist der gesuchte Zeitpunkt, ab welchem das Risiko grösser wird als die Reparaturkosten.

Das Beispiel in Tabelle II verdeutlicht das Vorgehen. Es handelt sich dabei um eine Risikobewertung für eine

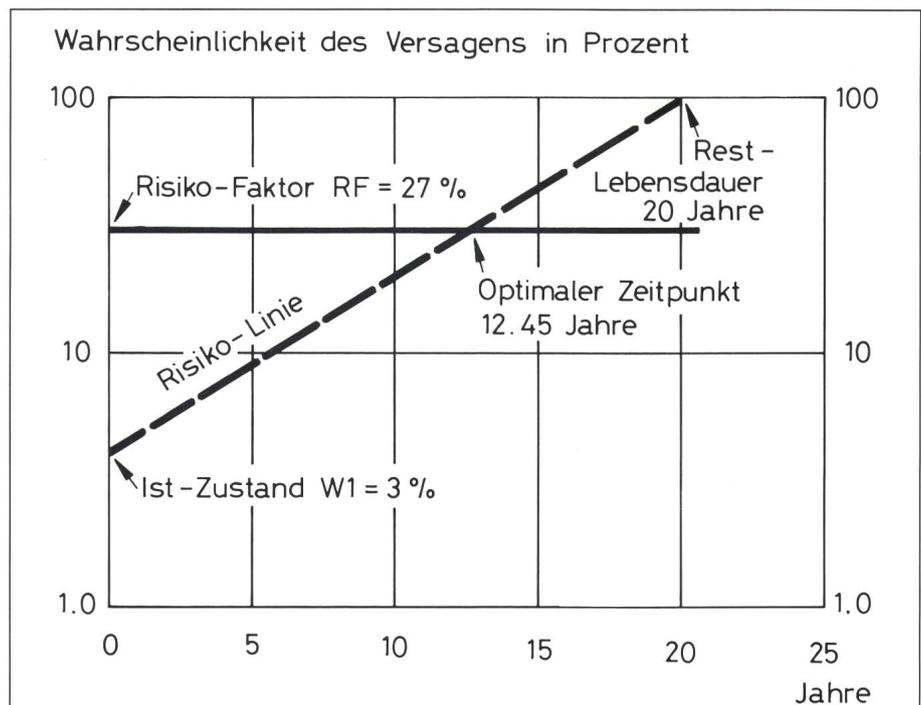


Bild 4 Risikobewertung einer Druckleitung. Grafische Lösung

Druckrohrleitung aus dem Jahre 1944, die einer Zustandsbeurteilung unterzogen wurde. Eine Druckrohrleitung wurde als Beispiel gewählt, weil bei dieser Kraftwerkskomponente signifikante Folge- und Haftungsschaden-Potentiale vorliegen. Zu beachten ist auch der erhebliche Unterschied in den indirekten Kosten, bedingt einerseits durch den Zeitbedarf für die Beschaffung von Material und Hilfsmitteln, andererseits durch geeignete Wahl des Zeitpunktes bei geplanter Reparatur, wodurch der Energieausfall weiter reduziert wird. Die graphische Darstellung

in Bild 4 entspricht den Zahlenwerten des Beispiels in Tabelle II.

Schlussbemerkung

Die hier dargestellte Methode ermöglicht die Umsetzung eines technischen Befundes (der Zustandsbeurteilung eines Bauteils) in monetäre Größen und damit die wirtschaftliche Begründung einer vorsorglichen Reparatur. Sie führt natürlich nicht zu einer «genauen» Ermittlung von Risiko und Restlebensdauer. Keinesfalls kann oder soll sie die Beurteilung des Zu-

standes durch den Fachmann ersetzen. Im Gegenteil, nur über eine fachtechnisch einwandfreie Zustandsbeurteilung können die benötigten Daten gewonnen werden. Inspektion, Versuche und Messungen sind die Voraussetzung für eine zuverlässige Zustandsbeurteilung. Reparaturkosten und mutmassliche Kosten des Versagens müssen bestimmt oder abgeschätzt werden. Die «Genauigkeit» hängt letztlich vom Aufwand ab, den man für diese Untersuchungen treiben will.

Die Problematik der Risikokurve macht auch deutlich, wie wichtig es ist, Messungen schon lange vor dem Eintreten einer kritischen Situation vorzunehmen, möglichst schon im Neuzustand. Eine Veränderung der Messwerte ist meist signifikanter als der Absolutwert, kann aber nur festgestellt werden, wenn Vergleichsdaten aus früheren Messungen zur Verfügung stehen.

Die technische Beurteilung liegt also der Anwendung dieser Methode zugrunde. Sie soll deren Umsetzung in Managemententscheide unterstützen. In der Tat ist vorsorgliche Instandhaltung nicht zuletzt ein Managementproblem, nämlich die Bereitstellung von Finanzmitteln, bevor eine zwingende Notwendigkeit für jedermann erkennbar vorliegt. Ist ein Schaden einmal eingetreten, so ist alles klar, und das erforderliche Budget wird wohl oder übel bewilligt. Es gibt ja auch im Grunde nichts mehr zu entscheiden. Doch bevor «das Kind im Brunnen liegt», ist eine überzeugende Begründung schwierig.

Dabei mag der Umstand eine Rolle spielen, dass heute mehr als früher die Entscheidungsträger in technisch-industriellen Bereichen keine technische Ausbildung besitzen und deshalb rein technische Argumentationen kaum nachvollziehen können. Es liegt an den Ingenieuren, ihre Anliegen in einer auch dem Nichttechniker verständlichen Sprache vorzubringen.

Literatur

- [1] O. Hartmann: Why Worry Before Trouble? Hydro Review, August 1988; Kansas City, Missouri, USA.
- [2] O. Hartmann: Die Zuverlässigkeit amerikanischer Wasserkraftwerke und Pumpspeichieranlagen. Wasser, Energie, Luft. Heft 7/8, 76. Jg. 1984, Baden.
- [3] A. Engel, M. Fehle, O. Hartmann: Ein altes Wasserkraftwerk – was nun? Bulletin SEV/VSE Nr. 22/1985, Zürich.
- [4] Asset Survey Assessment Guide (Leitfaden zur Zustandsbeurteilung). Interne Arbeitsanleitung der British Columbia Hydro, Vancouver BC, Kanada.
- [5] K.G. Boving: Grundsätzliche Überlegungen der Instandhaltungsprinzipien von Anlagen und ihre Anwendung im Rahmen der unternehmerischen Möglichkeiten. Der Maschinenschaden 60 (1987) Heft 1, München.

	Reparatur vor Versagen	nach
<i>Direkte Kosten</i>		
Baukosten neue Druckleitung, Mio Fr.	8.10	8.10
Erschwerniszuschlag, %	-	30.00
Erschwerniszuschlag, Mio Fr.	-	2.43
Total direkte Kosten, Mio Fr.	8.10	10.53
<i>Indirekte Kosten</i>		
Jahresproduktion der Zentrale, GWh	98,30	98.30
Durchschnittspreis Ersatzenergie, Fr./kWh	0.12	0.12
Gesicherte Leistung, MW	30.00	30.00
Preis der Ersatzleistung, Mio Fr./MWA	0.13	0.13
Ausfallzeit, Wochen	30.00	70.00
Für Energieausfall massgebend, Wochen	10.00	70.00
Energieausfall, GWh	18.90	132.33
Kosten der Ersatzleistung, Mio Fr.	0.72	5.07
Kosten der Ersatzenergie, Mio Fr.	2.27	15.88
Total indirekte Kosten, Mio Fr.	2.99	20.95
<i>Folgeschäden</i>		
Maximaler Folgeschaden		
Definition: Totalschaden an der Zentrale		
Geschätzte direkte Kosten, Mio Fr.		48.00
Zusätzliche Ausfallzeit, Wochen		80.00
Energieausfall, GWh		151.23
Kosten der Ersatzenergie, Mio Fr.		18.15
Kosten der Ersatzleistung, Mio Fr.		5.80
Maximaler Folgeschaden, Mio Fr.		71.94
Wahrscheinlichkeit des Maximalschadens, %		10.00
Wahrscheinlicher Folgeschaden, Mio Fr.	-	7.19
<i>Haftungsschäden</i>		
Maximaler Haftungsschaden		
Personenschaden: 10 Tote, 100 Verletzte, Mio Fr.		20.00
Sachschaden, Mio Fr.		10.00
Geschätzter Maximalschaden, Mio Fr.		30.00
Wahrscheinlichkeit, %		10.00
Wahrscheinlicher Haftungsschaden, Mio Fr.	-	3.00
Gesamtkosten, Mio Fr.	11.09	41.68
<i>Risikofaktor, Rf = 11.09/41.68</i>		
Log Rf		0.27
Wahrscheinlichkeit des Versagens bei Inspektion, W1, %		-0.57
Log W1		3.00
Wahrscheinliche Restlebensdauer ab Inspektion, R1, Jahre		-1.52
Wahrscheinlichkeit des Versagens am Ende der Restlebensdauer, W2, %		20.00
Log W2		100.00
Umschlagpunkt, (Log Rf - Log W1) * R1 / (Log W2 - Log W1), Jahre		-
		12.45

Tabelle 2 Risikobewertung einer Druckleitung