

Factsheet Kühlschmiermittel auf Werkzeugmaschinen

Planungshilfe für die energieeffizient Auslegung von Kühlschmiermittelsystemen

S. Züst¹, L. Weiss¹, R. Züst²

¹ inspire AG für mechatronische Produktionssysteme und Fertigungstechnik, Zürich, Switzerland

² Züst Engineering AG, Seegräben, Switzerland

1 Einleitung

Werkzeugmaschinen sind aus energetischer Sicht aktive Produkte. Das heisst, sie verbrauchen wesentlich mehr Energie und Ressourcen in der Nutzung als für ihre Erzeugung aufgewendet werden muss. Somit ist für eine energieeffiziente Maschine insbesondere die Nutzung der Maschine zu optimieren. Eine energetische Optimierung bedeutet eine Reduktion der Verluste. Verluste auf Werkzeugmaschinen bedeuten Wärmequellen und thermische Einflüsse auf die Maschinengenauigkeit. Somit ist eine energetische Verbesserung von Werkzeugmaschinen im Betrieb ist nicht nur aus Sicht der Energie interessant, sondern auch aus der der Genauigkeit.

Betrachtet man den Energiebedarf einer Werkzeugmaschine während des Betriebs, so lässt sich dieser auf verschiedene Maschinenaggregate aufgliedern. Ein Maschinenaggregat kann ein Antrieb oder ein Hilfssystem – z.B. Dunstabzug – sein. Leistungsmessungen an Werkzeugmaschine, durchgeführt vom Institut für Werkzeugmaschinen (IWF) der ETH Zürich und der inspire AG, haben gezeigt, dass ein substantieller Anteil der Leistungsaufnahme auf die Hilfsaggregate fällt. Um eine Maschine energetische verbessern zu können, genügt somit eine Betrachtung des Prozesses alleine nicht. Die ganze Maschine muss als System betrachtet werden.

Als Hilfsaggregate zählen auch Kühlschmiermittel. Diese zeigen bei Messungen einen hohen Energiebedarf, verglichen mit dem Gesamtbedarf der Maschine. Die Leistung im Kühlschmiermittelsystem wird für den Antrieb der Pumpe benötigt. Zur bedarfsgerechten Auslegung und zum optimalen Betrieb von Pumpen ist das Merkblatt *Pumpen* von S.A.F.E [1] empfohlen. Darin wird auf die Charakteristika von Pumpen und Pumpensysteme eingegangen. Das Vorliegende Dokument hat zum Ziel, die Erkenntnisse des Merkblattes für Kühlschmiermittelsystem im Speziellen anzuwenden.

2 Kühlschmiermittelsysteme

Die Aufgabe eines Kühlschmiermittelsystems ist, die Prozesszone mit Kühlschmiermittel zu versorgen. Bedingt durch den laufenden Prozess, sind bestimmte Eigenschaften vom Kühlschmiermittel gefordert. Zum einen können diese stoffliche Eigenschaften wie Dichte, Wärmekapazität oder Viskosität sein. Andererseits muss das Kühlschmiermittel auch physikalische Eigenschaften erfüllen. Darunter fallen die Durchflussmenge und die Geschwindigkeit im Kühlschmiermittelstrahl. Die Anforderungen an die Stoffeigenschaften können durch die Wahl eines geeigneten Kühlschmiermediums erfüllt werden. Die physikalischen Eigenschaften sind direkt mit der Leistung im System verbunden. Um die physikalischen Anforderungen möglichst effizient erfüllen zu können, muss die ganze Kühlschmiermittelversorgungskette aus Abbildung 1 betrachtet werden.

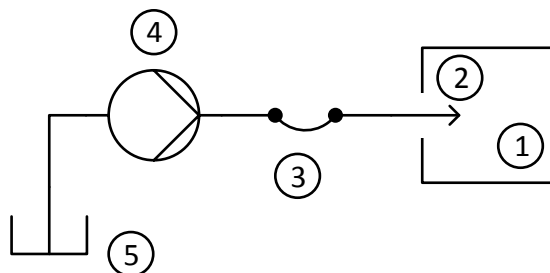


Abbildung 1: Vereinfachte Darstellung eines Kühlschmiermittelsystems mit Prozess (1), Düse (2), Leitung (3), Pumpe (4) und Reservoir (5).

Die dargestellten Komponenten des Kühlschmiermittelsystems haben dabei folgende Funktionen: Durch den Prozess ist die Menge und Form des benötigten Kühlschmiermittels festgelegt. Dieses wird von einer Pumpe aus einem Reservoir durch eine Leitung zur Düse gefördert. Dazu ist ein bestimmter Druck nötig. Die Leistung in einem Fluid ist proportional zum Druck und vom Volumenfluss¹:

$$P = 1.67 \cdot p \cdot Q$$

P	[W]	Leistung
p	[bar]	Druck im Fluid
Q	[l/min]	Durchfluss

Die Leistung im Kühlschmiermittel ist somit direkt proportional zum benötigten Druck und zum geforderten Durchfluss. Bei der Erzeugung dieser fluiddynamischen Leistung arbeitet die Pumpe mit einer bestimmten Übertragungseffizienz. Um ein Kühlschmiermittelsystem energieeffizient auszulegen, müssen deshalb folgende Punkte beachtet werden:

- Nur so viel Druck und Volumenfluss erzeugen wie wirklich notwendig ist
- Druckverluste und Leckage vermeiden
- Hohe mittlere Effizienz der Pumpe anstreben

Damit ein Kühlschmiermittelsystem nach den obigen Punkten ausgelegt werden kann, müssen die geforderten Betriebspunkte bekannt sein. Deshalb wird im Folgenden entgegen dem Kühlschmiermittelfluss vorgegangen, d.h. vom Prozess ausgehend. Dabei steht folgende Fragestellung im Vordergrund: Wie viel Kühlschmiermittel wird benötigt und wie kann es unter minimalem Energieaufwand bereitgestellt werden? In den kommenden Abschnitten werden die Elemente aus Abbildung 1 aus energetischer Sicht erläutert. Das Verhalten des Gesamtsystems wird in Abschnitt 0 behandelt.

Prozess Um den betrachteten Prozess sicherzustellen wird Kühlschmiermittel benötigt. Um diese Versorgung zu ermöglichen, muss eine bestimmte Leistung vom System aufgebracht werden. Die minimale Leistung welche aufgebracht werden muss entspricht der Leistung im Kühlschmiermittelstrahl. Diese kann wie folgt abgeschätzt werden:

$$P = 8.3 \cdot \frac{Q^3 \cdot \rho}{A^2}$$

P	[kW]	Leistung
Q	[l/min]	Durchfluss
ρ	[kg/m ³]	Dichte des Kühlmittel
A	[mm ²]	Strahlquerschnitt

Wichtig dabei ist, dass die kinetische Energie im Strahl proportional zur dritten Potenz des Durchflusses und umgekehrt proportional zum Quadrat des Strahlquerschnitts zunimmt. Somit muss für ein energieeffizientes Kühlschmiermittelsystem der Durchfluss minimal und der Querschnitt maximal gewählt werden; dies unter Berücksichtigung der Prozessanforderungen. Es ist zu beachten, dass Kühlschmiermittel drei Funktionen im Prozessraum wahrnimmt:

- 1) **Kühlen:** Durch den Wärmeübergang vom Prozess in das Kühlschmiermittel kann die überschüssige Wärme aus dem Prozessraum hinausgeführt werden. Charakteristisch für das Kühlen sind der Prozessleistung entsprechend hohe Durchflüsse.
- 2) **Schmieren:** Mit Prozessschmierung kann die Reibung reduziert werden. Damit kann die Qualität beeinflusst werden. Weiter bedeutet weniger Reibung auch weniger Verlustwärme. Schmierung ist bereits mit kleinen Durchflüssen möglich.
- 3) **Späne schwemmen:** Das Ausschwemmen von Spänen ist eine wichtige Funktion zur Prozess- und Qualitätssicherung. Um die Späne erfolgreich transportieren zu können, sind hohe Strahlgeschwindigkeiten nötig. Hohe Strahlgeschwindigkeiten benötigen hohe Drücke und führen zu hohen Durchflüssen.

Es ist zu sehen, dass jede dieser Funktionen den Durchsatz nach unten beschränkt. Für jeden Prozess muss deshalb eine Individuelle Kühlschmiermittelstrategie gefunden werden. Im Folgenden sind zwei Methoden für eine erste Abschätzung des Kühlschmiermittelbedarfs vorgestellt.

Ein einfacher Ansatz ist, über die maximale Temperaturerhöhung des Kühlschmiermittels zu gehen. Dabei ist die Temperaturerhöhung gegeben als Differenz zwischen Einlasstemperatur an der Düse und der Temperatur im rückfließenden Kühlschmiermittel nach dem Prozess. Je nach Fertigungsgenauigkeit können verschieden grosse Temperaturerhöhungen toleriert werden. Die Aufgabe des Kühlschmiermittels ist, die durch den Prozess entstehende Wärme abzuführen. Für eine erste Abschätzung kann angenommen werden, dass die entstehende Wärme gleich der Spindelleistung ist. Somit kann die Kühlschmiermittelmenge über die spezifische Wärmekapazität abgeschätzt werden:

¹ Für einen verbesserten Praxisbezug werden in diesem Dokument durchgängig die in der Praxis gebräuchlichen Einheiten anstelle von SI-Einheiten verwendet. Dadurch bedingt ergeben sich in den Gleichungen Konstanten, auf deren Einheitsbezeichnung aus Gründen der Leserlichkeit verzichtet wurde. Die Umrechnung der verwendeten Einheiten auf SI-Einheiten findet sich in Abschnitt 6.

$$Q = 6 \cdot 10^4 \cdot \frac{P}{\Delta T \cdot \rho \cdot c_p}$$

Q [l/min]	Durchfluss
P [kW]	Spindelleistung
ΔT [°C]	Temperaturerhöhung
ρ [kg/m ³]	Dichte des Kühlmittels
c_p [kJ/kg/K]	Wärmekapazität

Wichtig dabei ist, dass die erforderliche Menge Kühlschmiermittel proportional zur Abwärme des Prozesses ist, und umgekehrt proportional zur Temperaturerhöhung. Ebenso wirken sich die Dichte und die Wärmekapazität des Kühlschmiermittels umgekehrt proportional auf den Bedarf aus. So wird bei der gleichen Temperaturerhöhung und Prozess Leistung 150 % mehr Öl als Wasser für die Kühlung benötigt².

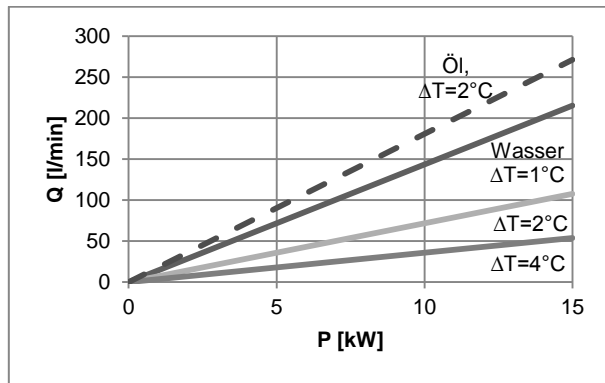


Abbildung 2: Erforderlicher Kühlschmiermittelbedarf für Wasser in Abhängigkeit der momentanen Spindelleistung für verschiedene Temperaturerhöhungen im Kühlschmiermittel. Als Vergleich der Bedarf für Öl als gestrichelte Linie.

Eine andere Möglichkeit zur Charakterisierung des Kühlschmiermittelbedarfs stammt aus der Schleiftechnik: Um den Prozess optimal unterstützen zu können, soll die Strahlgeschwindigkeit des Kühlschmiermittels gleich der Umfangsgeschwindigkeit der Schleifscheibe sein. Der Querschnitt der Düse wird dabei so gewählt, dass nur die Schleifscheibe benetzt wird. Somit ist der Kühlschmiermittelbedarf vollständig über die Strahlgeschwindigkeit und den Strahlquerschnitt gegeben. Ein Beispiel für eine solche Parametrisierung ist in Abbildung 3 zu sehen.

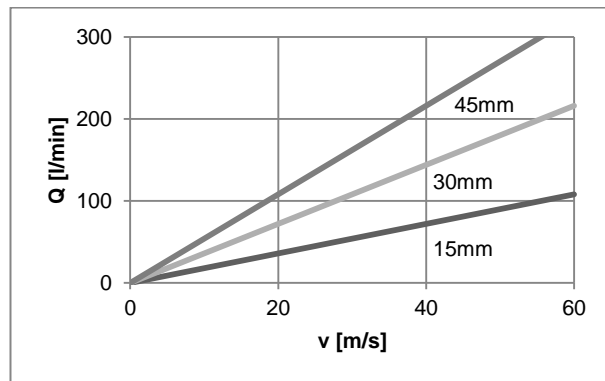


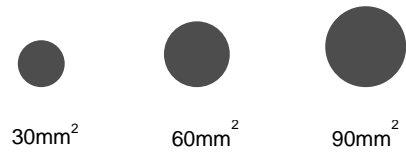
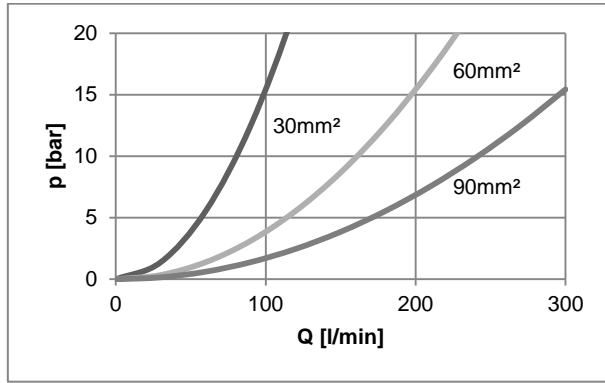
Abbildung 3: Erforderlicher Kühlmittelmengen für verschiedene Schleifscheibendicken in Abhängigkeit der Umfangsgeschwindigkeit. (Strahlhöhe: 2 mm)

Wie beim Schleifen ist auch im bei anderen Prozessen der Strahlquerschnitt von Interesse: Das Kühlschmiermittel soll nur unmittelbar beim Prozess eingebracht werden. Somit lässt sich die Charakterisierung über die Spindelleistung und die Temperaturerhöhung mit Angabe eines Strahlquerschnittes in eine Charakterisierung über die Strahlgeschwindigkeit umrechnen. In den folgenden Abschnitten wird deshalb nur noch von Strahlgeschwindigkeit und Strahlquerschnitt gesprochen.

Düse

Die Düse wandelt die potentielle Energie des Kühlschmiermittels (Druck) in kinetische Energie (Geschwindigkeit) um. Dabei steigt der notwendige Druck proportional zum Quadrat des geforderten Volumenflusses an. Das bedeutet, dass für den doppelten Durchsatz der vierfache Druck benötigt wird. Ändert man den Querschnitt der Düse, so steigt der Druck umgekehrt proportional an. Um denselben Volumenfluss beim halben Düsenquerschnitt zu erhalten, ist somit der doppelte Druck erforderlich.

² Mineralöl: $\rho = 833 \text{ kg/m}^3, c_p = 1.88 \text{ kJ/kg/K}$
 Wasser: $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3, c_p = 4.182 \text{ kJ/kg/K}$



Flächen 1:1 für Ausdruck auf DIN-A4

Abbildung 4: Erforderlicher Düsendruck für verschiedene Düsenquerschnitte um einen bestimmten Durchsatz zu erreichen. (Beispiel: Wasser).

Der erforderliche Druck in der Düse hängt weiter von der Dichte des verwendeten Kühlschmiermittels ab, und lässt sich wie folgt abschätzen:

$$p = 1.4 \cdot 10^{-4} \cdot Q^2 \cdot \frac{\rho}{A}$$

p	[bar]	erforderlicher Druck
Q	[l/min]	Durchfluss
A	[mm ²]	Düsenquerschnitt
ρ	[kg/m ³]	Dichte des Kühlmittels

Vergleicht man erneut Wasser mit Mineralöl, so stellt man fest, dass für denselben Durchsatz rund 17% weniger Druck für die Beschleunigung von Mineralöl benötigt wird.

Leitung

Zwischen der Pumpe und der Düse befindet sich eine Leitung. Darin finden zwei Arten von Druckverlusten statt: Statische und Dynamische. Statische Druckverluste treten auf, wenn ein Höhenunterschied zwischen Pumpenauslass und Düse überbrückt werden muss. Die führt zu einem Druckabfall entsprechend dem Schweredruck des Fluides. Dynamische Druckverluste sind Reibungsverluste und Turbulenzen. Diese sind abhängig von der Fließgeschwindigkeit, der Rohrlänge und des Rohrdurchmessers. Abbildung 5 zeigt die Größenordnung der statischen und dynamischen Druckverluste für Wasser in einer glatten Leitung.

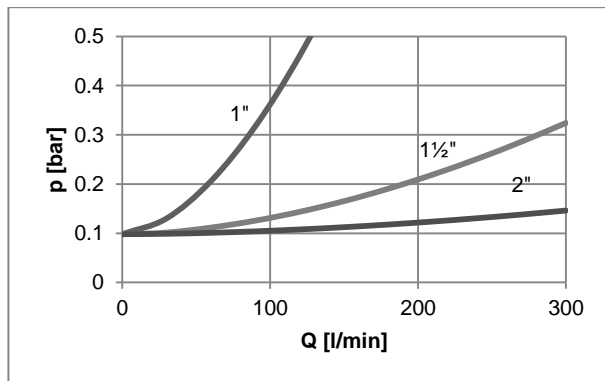


Abbildung 5: Druckverlust in einer 5 m langen Leitung mit 1 m Höhendifferenz für verschiedene Durchmesser. Der statische Anteil beträgt 0.1 bar. (Beispiel: Wasser)

Der statischer Druckverlust in einer Leitung ist gleich dem Schweredruck der Flüssigkeitssäule und beträgt:

$$p_{stat} = 10^{-4} \cdot \rho \cdot H$$

p	[bar]	Statischer Druckverlust
ρ	[kg/m ³]	Dichte des Kühlmittels
H	[m]	Höhenunterschied

Der dynamische Druckverlust hängt von der Flussgeschwindigkeit und dem Reibungskoeffizient ab. Der Reibungskoeffizient wiederum hängt von der Beschaffenheit des Rohres und der Art der Strömung ab (laminar oder turbulent). Für ein glattes Rohr kann folgende Approximation verwendet werden:

$$p_{dyn} = 2.2 \cdot 10^{-8} \cdot Q^2 \cdot \frac{\rho \cdot \nu \cdot L}{D^4}$$

p	[bar]	Dynamischer Druckverlust
Q	[l/min]	Durchfluss
L	[m]	Länge der Leitung
D	[cm]	Durchmesser der Leitung
ν	[mm ² /s]	Kinematische Viskosität
ρ	[kg/m ³]	Dichte des Kühlmittels

Wichtig dabei ist, dass der Durchmesser mit der vierten Potenz den Druckverlust beeinflusst. Eine falsche Wahl des Rohrdurchmessers verursacht einen überproportionalen Druckverlust während des Betriebs. Dieser Effekt ist auch in Abbildung 5 zu sehen. Aus Sicht der Leistung bedeutet dies für das Beispiel aus Abbildung 5 bei 100 l/min einen Reibungsverlust von 60 W für 1" Durchmesser und 0.6 W bei 1.5" Durchmesser. Eine Durchmesserreduktion von 30 % hat hier eine Zunahme im Reibungsverlust von 300 % zur

Folge. Der Druck, welcher über die Leitung verloren geht muss ebenfalls von der Pumpe erzeugt werden. Diese Erzeugung ist mit Verlusten behaftet (siehe nächsten Abschnitt). Also fällt der reale Leistungsverlust deutlich höher als 60 W, respektive 0.6 W aus.

Pumpe

Eine Pumpe ist eine fluiddynamische Maschine zur Förderung von inkompressiblen Fluiden. Das Verhalten einer Pumpe wird durch die Pumpenkennlinien dargestellt. Diese beschreibt den Zusammenhang zwischen Volumenstrom, Druck, Drehzahl und Leistungsaufnahme. Wichtig dabei ist der nominale Betriebspunkt, gegeben durch den nominalen Volumenstrom. In diesem Betriebspunkt zeigt die Pumpe die maximale Effizienz. Weicht der aktuelle Volumenstrom nach unten ab, so steigt der Anteil der Reibungsverluste an der Gesamtarbeit des Systems. Bei einer Abweichung nach oben erhöhen sich die ohmschen Verluste des Antriebes und die Turbulenzen im Fluid.

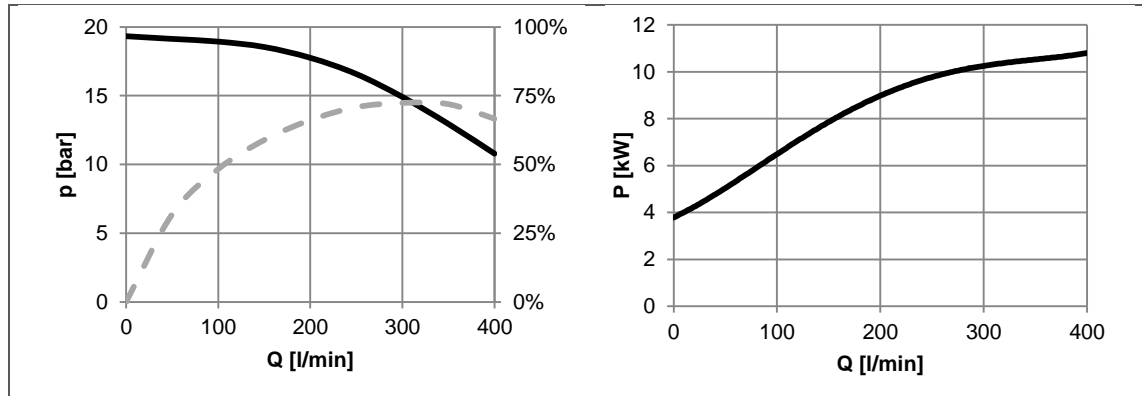


Abbildung 6: Beispiel einer Pumpenkennlinie: Die Beziehung zwischen Fördervolumen und Druck ist links dargestellt. Ebenso die Effizienz als gestrichelt graue Linie. Rechterhand ist der Bezug zwischen Volumenstrom und Leistungsaufnahme der Pumpe ersichtlich.

Der Betriebspunkt einer Pumpe besteht aus dem Druck und dem Durchfluss, welcher von der Pumpe geliefert wird. Eine Pumpe kann nur die Betriebspunkte anfahren, welche auf der Pumpenkennlinie liegen. Ist ein gewünschter Betriebspunkt gegeben, welcher nicht auf der Kennlinie liegt, so muss in erster Linie überprüft werden, ob dieser realisiert werden kann: Liegt der Punkt im p - Q -Diagramm oberhalb der Kennlinie, ist er nicht realisierbar. Alle Punkt auf oder unterhalb der Kennlinie sind realisierbar. Für realisierbare Betriebspunkte, welche nicht auf der Kennlinie liegen, müssen durch geeignete Massnahmen auf die Kennlinie verschoben werden. Mögliche Strategien sind:

- 1) **Druck erhöhen:** Durch das Installieren einer Drossel kann zusätzlicher Widerstand in das System gebracht werden. Damit erhöht sich der Druck, welcher für den gewünschten Durchfluss nötig ist.
- 2) **Durchfluss erhöhen:** Es wird so viel Durchfluss erzeugt, dass der geforderte Druck erreicht wird. Über einen Bypass wird der überflüssige Durchfluss in das Reservoir zurückgeleitet.
- 3) **Pumpenkennlinie verschieben:** Wird diese so verschoben, dass sie durch den gewünschten Betriebspunkt geht, so kann dieser von der Pumpe realisiert werden. Um die Kennlinie zu verschieben kommen Drehzahlregelung oder der Einsatz von mehreren Pumpen in Frage.

Um die richtige Pumpe und die richtige Strategie auswählen zu können, müssen die intendierten Betriebspunkte bekannt sein. Siehe dazu Abschnitt 3.1 und das Merkblatt *Pumpen*.

Reservoir

Das Reservoir in einem Kühlschmiermittelsystem kann verschiedene Aufgaben haben. Zu diesen gehören die Aufbereitung des Fluides (Filtration, Reinigung, Absetzen), sowie thermische Aspekte (erzwungene / freie Abkühlung). Für die energetische Betrachtung ist dabei wichtig, dass es sich beim Reservoir über ein offenes System handelt: Denn das Fluid verlässt die Leitung als Strahl unter Umgebungsdruck. Anschließend sammelt sich das Fluid unter Einfluss der Gravitation im Reservoir. Wo es nach einer allfälligen Reinigung erneut angesogen wird. Da der Rückfluss nicht in einer Leitung stattfindet, können sich statische Druckverluste nicht aufheben. Somit müssen sie bei der Auslegung der Pumpe berücksichtigt werden.

3 Betriebspunkte und Systemverluste

Im letzten Abschnitt wurden die einzelnen Elemente eines Kühlschmiermittelsystems erläutert. Nun geht es darum zu beschreiben, wie sich die einzelnen Elemente im Verbund verhalten.

3.1 Anlagenkennlinie und Pumpenbetriebspunkte

Die Charakteristik einer Pumpe kann durch eine Pumpenkennlinie beschrieben werden. Analog kann die Charakteristik der Düse und der Leitung in einer Anlagenkennlinie dargestellt werden. Diese Anlagenkennlinie beschreibt, bei welchem Druck welcher Druckfluss stattfindet. Oder anders ausgedrückt: Welchen Druck die Pumpe zu erbringen hat, damit der gewünschte Durchfluss erreicht wird. Der Druck und Durchfluss einer Pumpe sind jedoch nicht unabhängig voneinander. Ihr Zusammenhang ist durch die Pumpenkennlinie gegeben. Der Betriebspunkt eines Systems aus Pumpe, Leitung und Düse befindet sich also im Schnittpunkt der Pumpen- und Anlagenkennlinie. Ein Beispiel dazu ist in Abbildung 7 zu sehen. Wichtig dabei ist, dass die beiden Kennlinien sich genau entgegengesetzt krümmen. Es ist also nur ein Schnittpunkt, und damit Betriebspunkt, vorhanden. Die Anzahl möglicher Betriebspunkte für ein Kühlschmiermittelsystem mit Pumpe, Leitung und Drossel ist somit limitiert. Im folgenden Abschnitt werden die Möglichkeiten erläutert, welche die Ansteuerung von Betriebspunkten ermöglichen, die nicht im Schnittpunkt der Kennlinien liegen.

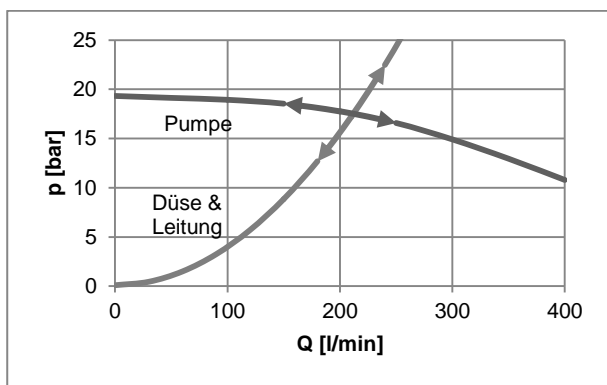


Abbildung 7: Beispiel einer Anlagenkennlinie und eine Pumpenkennlinie. Der Betriebspunkt des Kühlschmiermittelsystems liegt im Schnittpunkt der Kennlinien (215 l/min bei 17,5 bar). Um einen anderen Betriebspunkt zu erreichen muss die Pumpen- oder Anlagenkennlinie verändert werden.

Je nach Anforderung des Prozesses kann der Düsenquerschnitt variieren. Somit entsteht für jeden Düsenquerschnitt eine eigene Anlagenkennlinie, und damit auch einen Schnittpunkt mit der Pumpenkennlinie. Wird der Düsenquerschnitt kontinuierlich variiert, so erhält man ein Anlagenkennfeld. Die möglichen Betriebspunkte ergeben sich aus der Schnittmenge des Anlagenkennfeldes mit der Pumpenkennlinie. Das heißt, nur ein Teil der gewünschten Betriebspunkte ist mit dem gegebenen System realisierbar. Siehe dazu das Beispiel in Abbildung 8.

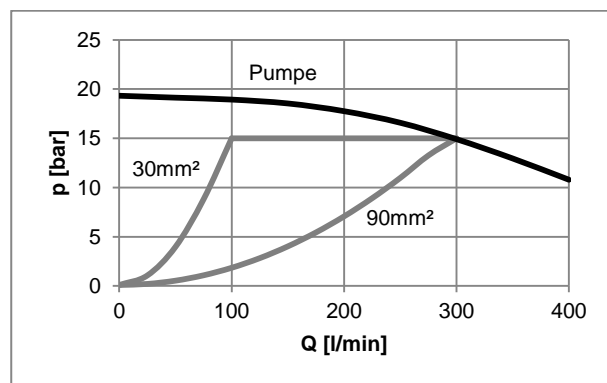


Abbildung 8: Beispiel eines Anlagenkennfeldes. Während dem Betrieb kommen alle Punkte innerhalb des Kennfeldes als Betriebspunkt in Frage. Mit der gezeigten Pumpe kann aber nur ein Betriebspunkt realisiert werden (300 l/min, 15 bar)

3.2 Realisieren von Betriebspunkten

Bedingt durch die Anforderungen des Prozesses sind eine bestimmte Kühlschmiermittelmenge und ein Strahlquerschnitt gefordert. Daraus ergeben sich der Druck und der Durchfluss an der Düse. In der Leitung entstehen Druckverluste in Abhängigkeit vom Durchfluss. Die Pumpe muss also den geforderten Druck an der Düse liefern und zusätzlich den Druckverlust in der Leitung kompensieren. Weiter muss der benötigt Durchfluss erbracht werden. Die Frage ist nun, wie dieser Betriebspunkt realisiert werden kann. Prinzipiell bestehen zwei Vorgehen: Modifikation der Anlagenkennlinie oder Modifikation der Pumpenkennlinie. Modifikationen der Anlagenkennlinie haben zu Ziel, den Druck oder den Volumenstrom soweit zu erhöhen, bis die Anlagenkennlinie die Pumpenkennlinie schneidet. Dabei muss der überschüssige Druck oder Durchsatz vernichtet werden. Dies kann mittels einer Drossel oder eines Bypasses geschehen. Als für die Modifikation der Pumpenkennlinie sind hier Drehzahlregelung oder der Einsatz von mehreren Pumpen als Möglichkeiten vorhanden. Die vier Strategien – Drossel, Bypass, Drehzahlregelung und mehrere Pumpen – wurden bereits in Abschnitt 2 erwähnt und sind im nächsten Abschnitt detaillierter erläutert.

Drossel

Durch eine Querschnittsverengung in der Drossel wird zusätzlicher Widerstand erzeugt. Der Druckverlust über die Drossel muss von der Pumpe kompensiert werden, damit der gewünschte Druck in der Düse realisiert wird. Wird nun die Drossel so eingestellt, dass der Druckabfall über der Drossel gleich der Differenz zwischen dem Pumpendruck und dem benötigten Druck beim gewünschten Durchfluss ist, so kann der gewünschte Betriebspunkt realisiert werden. Das Vorgehen ist in Abbildung 9 zu sehen:

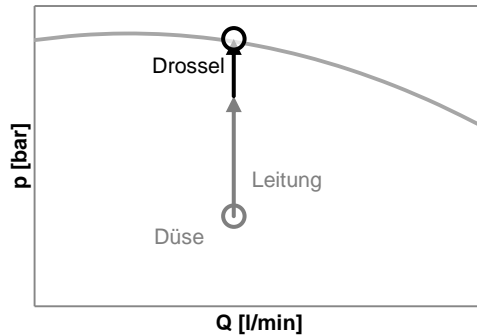


Abbildung 9: Funktion einer Drossel: Der Widerstand der Leitung wird erhöht, bis der gewünschte Volumenfluss eintritt.

Wie erwähnt findet über die Drossel ein Druckverlust statt. Es ist zu beachten, dass bei diesem Prozess keine nutzbare Arbeit verrichtet wird. Somit findet ein Leistungsverlust statt. Dieser ist proportional zu Druckreduktion und zum Durchfluss:

$$P = 1.67 \cdot \Delta p \cdot Q$$

P	[W]	Leistungsverlust
Δp	[bar]	Druckreduktion
Q	[l/min]	Durchfluss

Bei einem Durchsatz von 100 l/min und einer Druckreduktion von 5 bar findet also ein Leistungsverlust von 830 W statt. Da die Druckerzeugung mit einer Pumpe verlustbehaftet ist, sind die tatsächlichen Verluste höher als 830 W. Verluste im System bedeuten gleichzeitig auch Wärmequellen. Für das gegebene Szenario von 100 l/min Durchfluss und 5 bar Druckreduktion ergibt sich somit eine erwartete Erwärmung des Kühlschmiermittels um 0.13 °C.

Bypass

Ein Bypass bietet die Möglichkeit überflüssigen Durchfluss von der Pumpe direkt in das Reservoir zurückzuleiten. Lässt man also die Pumpe so viel Druck produzieren wie vom Betriebspunkt gefordert wird, kann mit dem Bypass der Durchfluss durch die Düse entsprechend den Anforderungen reduziert werden. Damit diese Methode Anwendbar ist, ist die Bedingung *Betriebspunkt unterhalb der Pumpenkennlinie* nicht mehr hinreichend. Zusätzlich muss der geforderte Druck grösser oder gleich dem minimalen Pumpendruck sein.

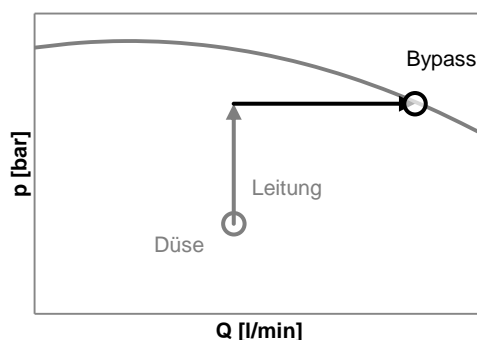


Abbildung 10: Funktion eines Bypasses: Der Durchfluss der Pumpe wird so weit erhöht, bis der Druck entsprechend den Anforderungen abgesunken ist. Der überflüssige Volumenstrom fließt direkt ins Reservoir zurück.

Analog zur Drossel leistet das Kühlschmiermittel welches durch den Bypass fließt keine nutzbare Arbeit am System. Somit fällt durch den Bypass ein Verlust an. Dieser Verlust ist proportional zum Druck und zum Durchfluss im Bypass:

$$P = 1.67 \cdot p \cdot \Delta Q$$

P	[W]	Leistungsverlust
p	[bar]	Pumpendruck
ΔQ	[l/min]	Durchfluss durch Bypass

Werden also 100 l/min Kühlschmiermittel bei 10 bar Druck benötigt, aber 200 l/min gefördert, so fließen 100 l/min durch den Bypass. Das entspricht einem Leistungsverlust von 1.7 kW. Diese Verlustleistung bildet eine Wärmequelle.

Drehzahlregelung Mit Hilfe eines Frequenzumrichters kann die Drehzahl des Pumpenantriebes gezielt verändert werden. Die Frequenz kann nun so gewählt werden, dass die Pumpe genau den benötigten Volumenstrom und den benötigten Druck erzeugt. Somit wird keine Leistung im Fluid durch die Regelung verloren (vergleiche *Drossel* oder *Bypass*). Eine Veranschaulichung ist in Abbildung 11 zu sehen. Es ist jedoch zu beachten, dass der dazu notwendige Frequenzumrichter Wandlungsverluste beinhaltet. Das Verhalten von Pumpen bei Drehzahländerung lässt sich in erster Näherung durch folgende Proportionalitätsgesetze beschreiben:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} \qquad \frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \qquad \frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3$$

Das bedeutet, dass bei einer Halbierung der Drehzahl noch 50% des ursprünglichen Volumenstroms gefördert werden. Dabei wird noch 25% des ursprünglichen Drucks bei 12.5% der ursprünglichen Leistungsaufnahme erzeugt. Eine Drehzahlregelung kann sich demnach lohnen, falls die Pumpe mehr Druck als benötigt liefert.

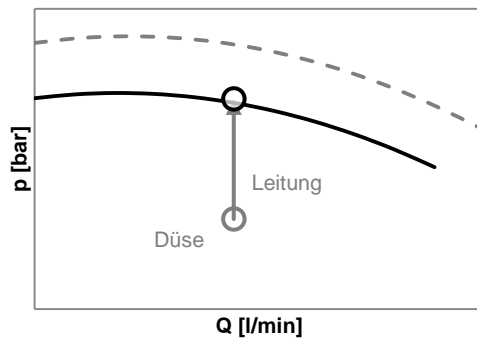


Abbildung 11: Durch Änderung der Pumpendrehzahl kann die Kennlinie der Pumpe verschoben werden.

Die Installation von Frequenzumrichtern und den notwendigen Messeinrichtungen sind mit Mehrkosten verbunden. Diese müssen gegen die Leistungseinsparungen und die Reduktionen im Wärmeeintrag abgewogen werden. Im Weiteren ist die Drehzahlregelung begrenzt. So sind Drehzahlen im Bereich von 25-105 % der Nenn Drehzahl möglich. Sollen auch Betriebspunkte unterhalb von 25 % Nenn Drehzahl angefahren werden, sind Installationen wie eine Drossel nötig.

Mehrere Pumpen

Pumpen können seriell oder parallel betrieben werden. Die Art der Kombination und Dimensionierung hängt vom Anwendungsfall ab. Je nach Ansteuerung wird eine oder mehrere Pumpen in Betrieb genommen. Für jede Betriebskombination von Pumpen kann eine eigene Kennlinie gezeichnet werden. Ist ein Betriebspunkt gegeben, kann diejenige Pumpenkombination ausgewählt werden, welche die gegebenen Anforderungen am effizientesten erfüllt. Ein Beispiel dazu ist in Abbildung 12 gegeben: Es werden zwei identische Pumpen parallel betrieben. Sind beide Pumpen an, so ergibt sich die Kennlinie gemäss der Darstellung. Für den gewünschten Druck und Durchfluss ist jedoch nur eine Pumpe nötig:

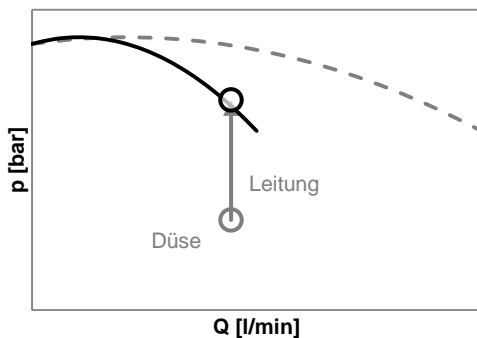


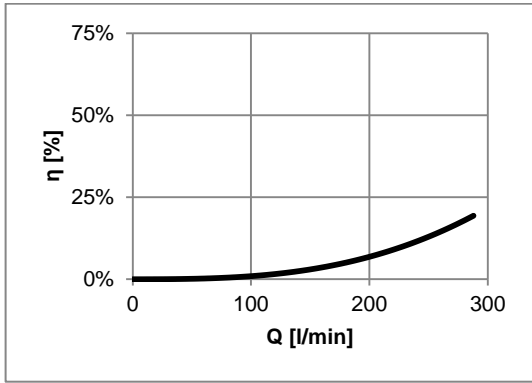
Abbildung 12: Einsatz von mehreren Pumpen: Es werden zwei Pumpen parallel betrieben (graue Kennlinie). Für den gewünschten Betriebspunkt ist nur eine Pumpe in Betrieb (schwarze Kennlinie)

Es besteht auch die Möglichkeit die Pumpen mit Drehzahlregelung auszustatten. Damit wird die Anzahl möglicher Betriebspunkte erhöht. Weiter ist das Vorgehen auch aus Sicht der Energieeffizienz interessant: Wie in Abbildung 6 zu sehen war, nimmt die Effizienz einer Pumpe mit abnehmendem Durchfluss ab. Hat man nun die Wahl zwischen einer grossen Pumpe oder zwei kleinen parallel betriebenen Pumpen, ist folgende Tatsache zu beachten: Für Betriebspunkt, welcher mit einer einzelnen kleinen Pumpe realisiert wird kann, ist die Effizienz höher als wenn er mit einer grossen Pumpe beliefert wird. Mit zwei parallel betriebenen Pumpen besteht also die Möglichkeit ein breites Spektrum an Betriebspunkten Effizient realisieren zu können.

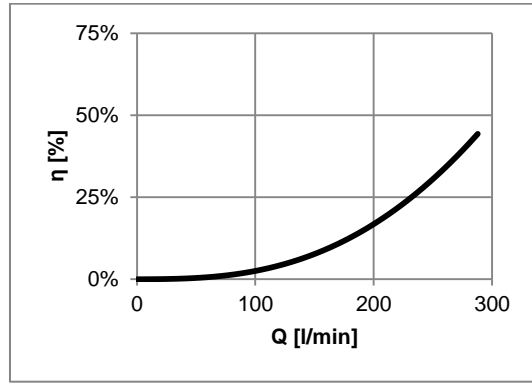
Die vier Strategien – Drossel, Bypass, Drehzahlregelung und mehrere Pumpen – unterscheiden sich sowohl im Druck wie auch im Durchfluss, welche von der Pumpe geliefert werden. Damit verursacht jede Strategie auch eine spezifische Leistungsaufnahme der Pumpe. Die Verwendung eines Bypass ist dabei in zweierlei Hinsicht ungünstig: Erstens ist die Anzahl realisierbarer Betriebspunkte wesentlich kleiner als bei den anderen Strategien. Zweitens wird mehr Durchfluss als notwendig erzeugt. Dies hat automatisch eine höhere Leistungsaufnahme zur Folge. Um die drei anderen Strategien aus energetischer Sicht untereinander vergleichen zu können, kann der Wirkungsgrad des Systems betrachtet werden. Dieser ist in Abbildung 13 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Wirkungsgrad bei maximalem Durchfluss für alle Strategien vergleichbar ist. Der Unterschied liegt primär im Teillastbetrieb:

- Erfolgt die Regelung des Durchflusses über eine Drossel, so steigt der Wirkungsgrad mit zunehmendem Durchfluss an. Dies ist eine Folge davon, dass bei niedrigen Durchflüssen zu viel Leistung von der Pumpe bereitgestellt wird. Die überschüssige Leistung wird über die Drossel vernichtet, und senkt somit den Wirkungsgrad des Systems.
- Unterhalb von 70 l/min Durchfluss kann der Betriebspunkt nicht durch Drehzahlregelung alleine realisiert werden. Die benötigte Pumpendrehzahl liegt ausserhalb des möglichen Betriebsbereiches. Es muss also mit einer Drossel nachgeholfen werden. Dies führt zu einem starken Abfall des Wirkungsgrades.
- Oberhalb von 70 l/min Durchfluss wird der Vorteil einer Drehzahlregelung der Pumpe sichtbar: Durch das, dass nur die benötigte Leistung im Fluid bereitgestellt wird, ist der Wirkungsgrad des Systems deutlich höher
- Mit zunehmendem Durchfluss steigt auch die Drehzahl der Frequenzgeregelten Pumpen an. Dabei nehmen die Wandlungsverluste des Frequenzumrichters relativ zur Leistungsaufnahme des Systems ab. Dies führt zu einem weiteren Anstieg des Gesamtwirkungsgrades.
- Beim Einsatz von mehreren parallel installierten Pumpen kommt der Vorteil bei Teillast zu tragen: Kleine Durchflüsse können mit einem höheren Wirkungsgrad realisiert werden. Hohe Durchflüsse können dennoch durch das Zuschalten der zweiten Pumpe gefördert werden.

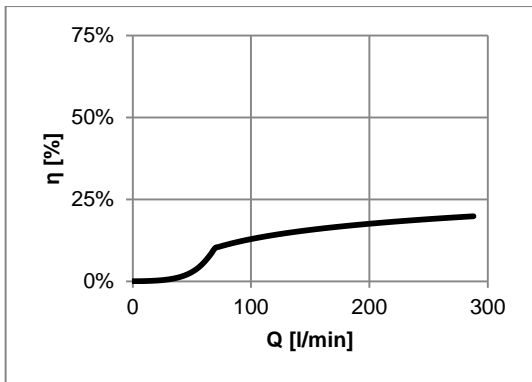
Die Entscheidung, welche Strategie für den Vorliegenden Fall am besten ist, hängt vom intendierten Betrieb ab. Bei Szenarien, welche nur Volllast beanspruchen, lohnen sich die Mehrkosten für Drehzahlregelung oder mehrere Pumpen nicht. Der Wirkungsgrad der Systeme bei Volllast ist schliesslich vergleichbar. Soll das System jedoch über ein breites Spektrum an Betriebspunkten betrieben werden, so ist eine Evaluation aller Strategien sinnvoll.



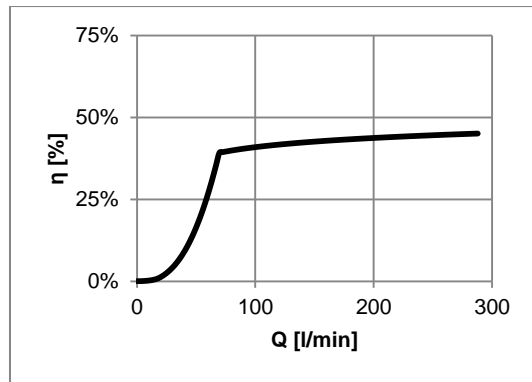
a) Ohne Drehzahlregelung, A=30 mm²



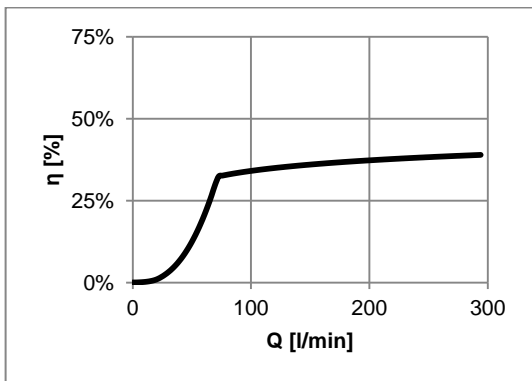
b) Ohne Drehzahlregelung, A=90 mm²



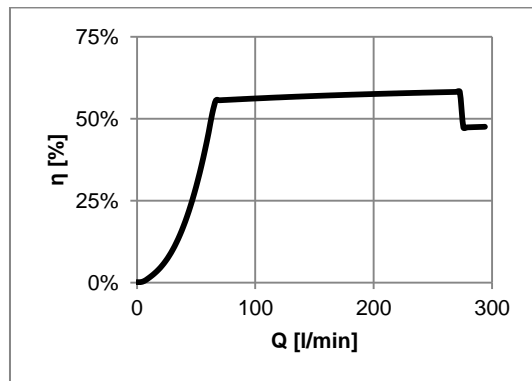
c) Mit Drehzahlregelung, A=30 mm²



d) Mit Drehzahlregelung, A=90 mm²



e) Zwei parallele geregelte Pumpen, A=30 mm²
nur eine Pumpe in Betrieb



f) Zwei parallele geregelte Pumpen, A=90 mm²
zuschalten der zweiten Pumpe ab Q=280 l/min

Abbildung 13: Geschätzter Wirkungsgrad des Kühlschmiermittelsystems für verschiedene Strategien und Düsenquerschnitte A. Der Wirkungsgrad beschreibt hier das Verhältnis zwischen fluiddynamischer Leistung im Kühlschmiermittelstrahl und der Leistungsaufnahme der Pumpe.

3.3 Einfluss auf die Werkzeugmaschine

In den obigen Abschnitten wurde auf die einzelnen Komponenten eines Kühlschmiermittelsystems sowie deren Wechselwirkung eingegangen. Weiter wurden die möglichen Regelstrategien über den Wirkungsgrad des Systems energetisch bewertet. Ein Kühlschmiermittelsystem ist ein Bestandteil einer Werkzeugmaschine. Deshalb müssen auch die Auswirkungen auf die Maschine diskutiert werden, um eine ganzheitliche energetische Optimierung durchführen zu können.

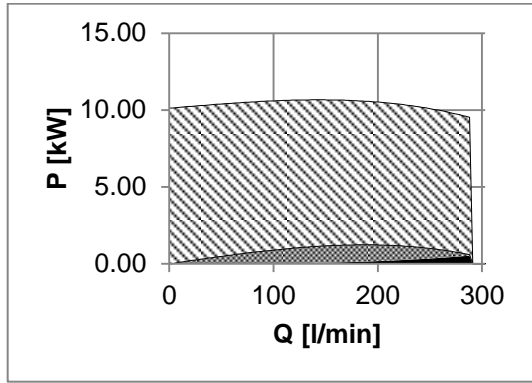
Das Kühlschmiermittelsystem liefert ein Fluid mit bestimmtem Durchsatz und Strahlgeschwindigkeit in die Prozesszone. Dazu benötigt das System elektrische Energie. Ferner entsteht im System Verlustwärme. Diese muss durch geeignete Massnahmen abgeführt werden, um die thermische Stabilität zu gewährleisten. Um die entstehende Verlustwärme im Kühlschmiermittelsystem abschätzen zu können, wird folgende Annahme getroffen: *Alle Verluste äussern sich als thermische Effekte*. Damit lässt sich die entstehende Wärme im Kühlschmiermittelsystem abschätzen. Abbildung 14 zeigt das Resultat einer solchen Abschätzung für verschiedene Regelstrategien und Betriebspunkte. Wichtig dabei ist:

- Unter Maximallast zeigen alle Strategien vergleichbare Verluste. Dabei sind die Anteile der Pumpe dominant.
- Für den Betrieb mit konstanter Drehzahl und einer Drossel sind die erwarteten Verluste in der Grössenordnung von 10 kW. Je nach Betriebspunkt haben die Drosselverluste einen substantiellen Anteil an den Gesamtverlusten des Systems.
- Bei den Strategien mit Drehzahlregelung nehmen die Verluste proportional zur Leistung im Fluid zu. Die Vorteile von mehreren Pumpen sind – analog zur Analyse des Wirkungsgrades – bei Teillast sichtbar, wenn nur eine Pumpe in Betrieb ist.

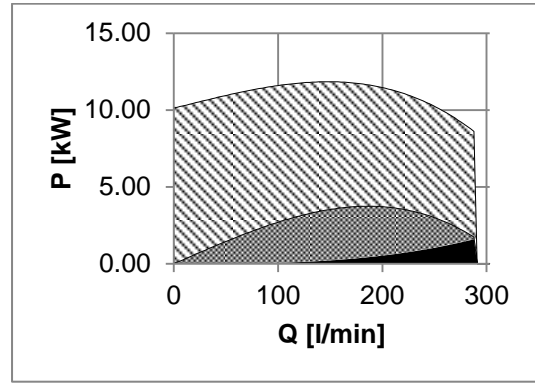
Greift man das Beispiel der Kühlschmiermittelmenge aus Abbildung 2 nochmals auf, so ergibt sich folgende Situation: Gegeben sei ein Kühlschmiermittelsystem, welches für eine Maximallast von 300 l/min ausgelegt wurde. Für eine prozessbedingte Wärmequelle von 10 kW und einer tolerierten Erwärmung von 2°C sind 75 l/min Wasser als Kühlschmiermittel benötigt. Wird das Kühlschmiermittel von der Pumpe aus Abbildung 13 bzw. Abbildung 14 gefördert, so ergibt sich je nach Regelstrategie folgendes Bild:

- Wird der Durchfluss über eine Drossel geregelt, so fallen zusätzlich 10 kW Wärmeleistung durch das Kühlschmiermittelsystem an. Es muss also nochmals so viel Wärmeleistung aus dem System geführt werden, wie der Prozess generiert.
- Bei Einsatz von Drehzahlregelung sind die Wärmequellen im Kühlschmiermittelsystem mit 0.1 kW bis 0.4 kW vernachlässigbar klein, verglichen mit der Wärmeleistung von 10 kW im Prozessraum.

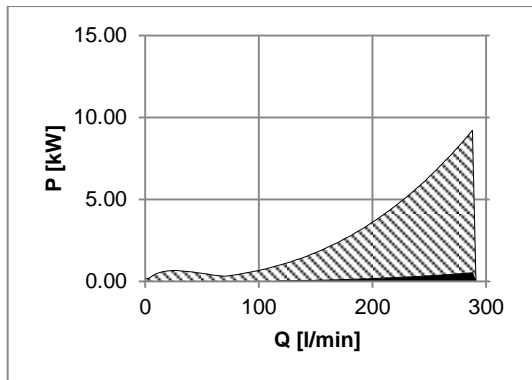
Der Einsatz von Drehzahlregelung in diesem Fall, würde neben der Leistungsreduktion am Kühlschmiermittelsystem um 9 kW auch zu einer mittleren Einsparung von 2.5 kW Kühlerleistung führen (bei einem COP von 4). Dieses Beispiel zeigt, dass eine ganzheitliche Betrachtung für die energetische Optimierung von Kühlschmiermittelsystemen notwendig ist. Da das Kühlschmiermittelsystem im Allgemeinen ein Bestandteil der Werkzeugmaschine oder der Maschinenhalle ist, können Reduktionen der Verluste auch zu maschinen- oder hallenseitigen Einsparungen führen. Weiter bedeuten weniger Verluste auch weniger Wärmequellen auf der Maschine. Damit ist ein direkter Einfluss auf das thermische Verhalten der Maschine gegeben.



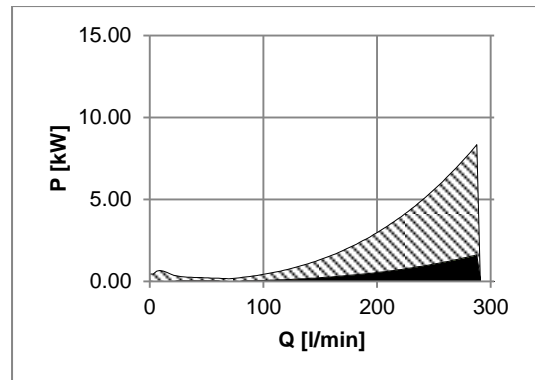
a) Ohne Drehzahlregelung, A=30 mm²



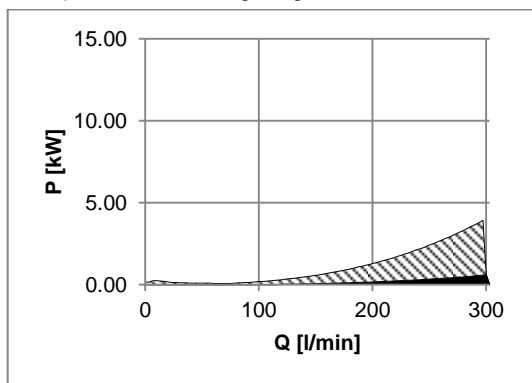
b) Ohne Drehzahlregelung, A=90 mm²



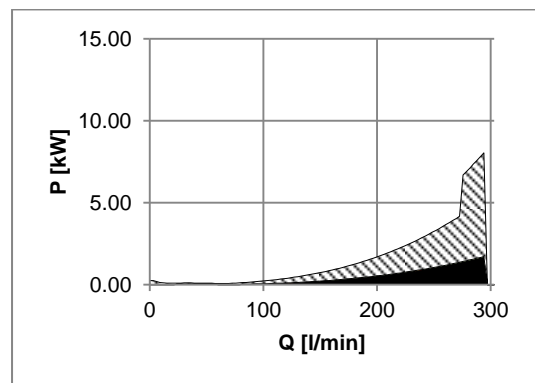
c) Mit Drehzahlregelung, A=30 mm²



d) Mit Drehzahlregelung, A=90 mm²



e) Zwei parallele geregelte Pumpen, A=30 mm²
nur eine Pumpe in Betrieb



f) Zwei parallele geregelte Pumpen, A=90 mm²
zuschalten der zweiten Pumpe ab Q = 280 l/min

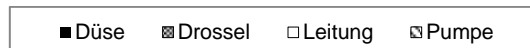


Abbildung 14: Quantifizierung der Systemverluste aufgeteilt nach Pumpe, Leitung (nicht sichtbar), Drossel und Düse für verschiedene Durchflüsse und Düsenquerschnitte A realisiert durch verschiedene Strategien..

4 Übersicht

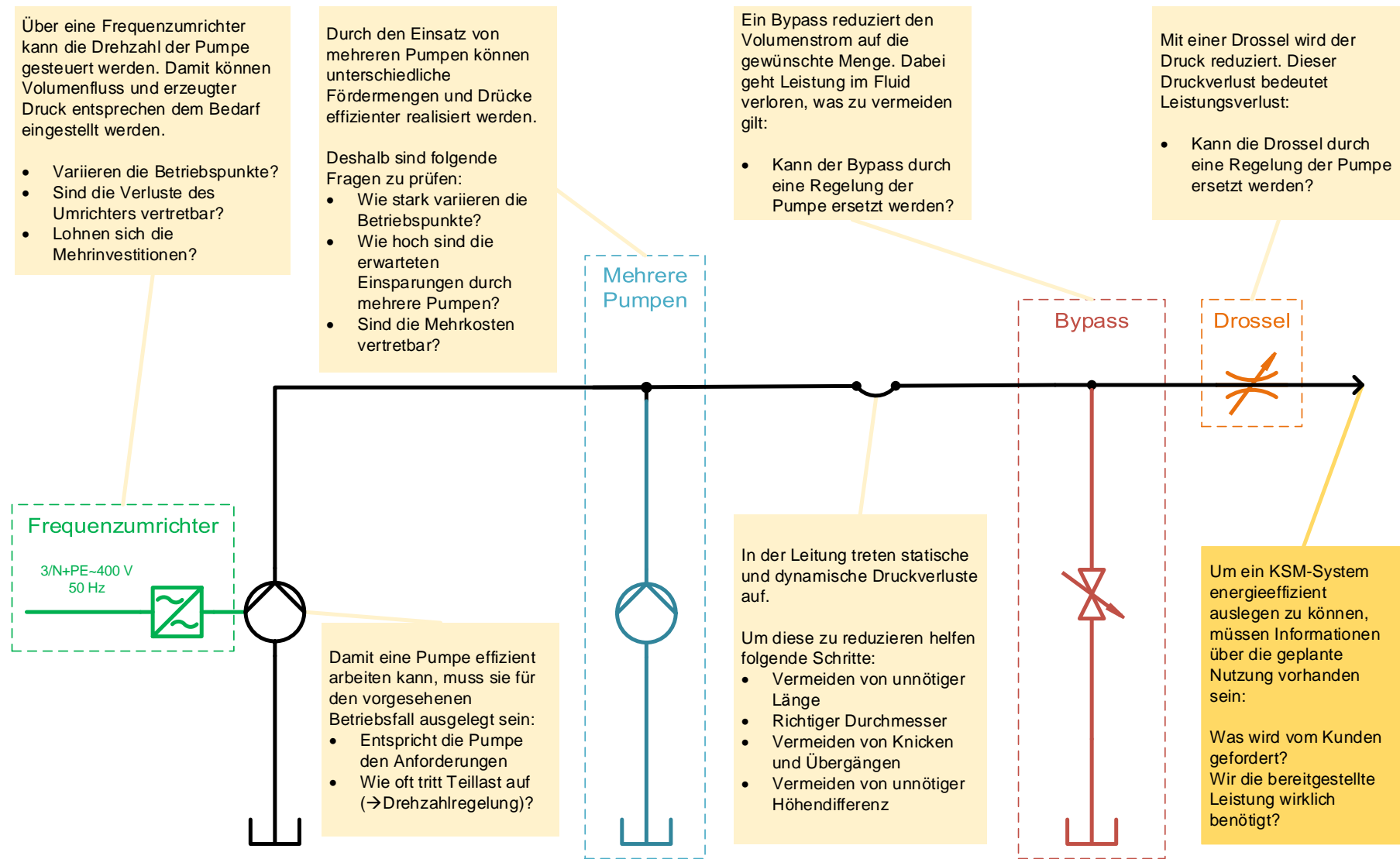


Abbildung 15: Übersicht über die Komponenten eines Kühlschmiermittelsystems und der Massnahmen zur Vermeidung von Verlusten.

5 Beispiel

Das folgende Beispiel soll die Anwendung der obigen Erkenntnisse an einem Anwendungsfall demonstrieren. Es deckt dabei folgende Punkte ab:

- Kenntnis über den intendierten Betrieb verschaffen
- Minimale Menge und Druck des Kühlschmiermittels bestimmen
- Erstellen eines Anlagenkennfeldes: Welche Betriebspunkte der Pumpe werden benötigt
- Vergleich verschiedener Regelstrategien

Ausgangslage Ein Kühlschmiermittelsystem soll einen Schleifprozess versorgen. Dabei muss die Kühlschmiermittelaustrittsgeschwindigkeit gleich der Umfangsgeschwindigkeit der Schleifscheibe sein. Weiter soll die Düse jeweils passend zur Schleifscheibe gewählt werden: Düsenbreite gleich der Schleifscheibenbreite und Düsenhöhe gleich 3 mm. So dass nur die Schleifscheibe benetzt wird, und kein Kühlschmiermittel verloren geht. Prozessbedingt sind folgende Wertebereich für die Schleifscheibe vorgehen:

- Umfangsgeschwindigkeit 12 - 50 m/s
- Scheibenbreite: 15 - 60 mm

Durch häufig wechselnde Aufträge werden im Betrieb alle Betriebspunkte gleich häufig angefahren. Die Anlage wird dabei von einer unregelmäßigen Pumpe mit Kühlschmiermittel versorgt. Diese wurde so ausgelegt, dass der Betriebspunkt *50 m/s Austrittsgeschwindigkeit bei 60 mm Scheibenbreite* gerade noch realisiert werden kann. Für alle anderen Betriebspunkte kommt eine Drossel zum Einsatz. Die Frage ist nun, ob sich die Regelung der Drehzahl oder die Installation von zwei parallel betriebenen Pumpen finanziell lohnen können.

Vorgehen Um eine erste Abschätzung des finanziellen Aufwandes machen zu können, sollen folgende Betriebspunkte bewertet werden: [12 m/s, 15 mm], [50 m/s, 15 mm], [12 m/s, 60 mm] und [50 m/s, 60 mm]. Diese entsprechen den Extremalstellen des Anlagenkennfeldes. Mit der Mittelung über diese vier Punkte kann ein erster Eindruck über die Leistungsaufnahmen der Pumpen gewonnen werden. Ausgehend von der mittleren Leistungsaufnahme können die Betriebskosten über den Strompreis und die Investitionskosten abgeschätzt werden.

Resultate Die Quantifizierung des beschriebenen Vorgehens ist in Tabelle 1 zu sehen. Die Investition ergibt sich aus den Kosten für die Pumpe, sowie für den Frequenzumrichter³ im Fall der Drehzahlregelung. Wie in der Zusammenstellung zu erkennen ist, weist die geregelte Pumpe eine Mehrinvestition von 3970.- CHF auf, zeigt aber nach erster Abschätzung eine um 6.6 kW geringere Leistungsaufnahme. Bei einem Strompreis von 0.15 CHF/kWh wird nach 4030 Betriebsstunden eine Kosteneinsparung über den Energieverbrauch gleich der Mehrinvestition erwartet. Mit der analogen Berechnung für die parallel betriebenen Pumpen erhält man eine Gewinnschwelle von 8200 Betriebsstunden.

	Investition [CHF]	Mittlere Leistung [kW]	Stromkosten [CHF/1000h]	Gewinnschwelle [h]
Unregelmäßige Pumpe	13'355	13.9	2085	-
Geregelte Pumpe	17'325	7.33	1100	4030
Parallele geregelte Pumpen	22'532	6.43	965	8194

Tabelle 1: Resultate der Leistungs- und Kostenabschätzung für eine unregelmäßige Pumpe, eine geregelte Pumpe und zwei parallel betriebene Pumpen unter denselben Einsatzbedingungen. Als Richtwert für den Strompreis wurde 0.15 CHF/kWh verwendet.

Diese Analysen beziehen sich nur auf den Stromverbrauch. Sekundäre Einflüsse der geregelten Pumpe – wie durch den reduzierten Wärmeeintrag in die Maschine – sind hier nicht berücksichtigt. Ebenso sind die Entwicklungskosten für die Implementation einer geregelten Pumpe in dieser ersten Abschätzung nicht enthalten.

Fazit Die Betriebsdauer des Kühlschmiermittelsystems von 4'000 bis 8'000 Stunden ist bei einer Werkzeugmaschine zu erwarten. Für den vorliegenden Fall sind also beide Versionen mögliche Kandidaten für eine Effizienzsteigerung des Kühlschmiermittelsystems. Neben der Einsparung von Energie kommt weniger Wärmeeintrag durch den bedarfsgerechten Betrieb dazu.

Wird eine gestaffelte Verbesserung durchgeführt – das heisst zuerst auf eine geregelte Pumpe, danach auf zwei geregelte Pumpen – ist folgendes zu beachten: Für den späteren Wechsel von

³ Die Preisangaben wurden freundlicherweise von der Grundfos AG zur Verfügung gestellt.

einer geregelten Pumpe auf zwei parallel betriebene geregelte Pumpen beträgt die erwartete Gewinnschwelle von 40'000 Betriebsstunden. Diese ist für ein Kühlschmiermittelsystem einer Werkzeugmaschine deutlich zu lang. Im folgenden Beispiel ist demnach der initiale Entscheid für die neue Strategie entscheidend. Ein Strategiewechsel zu einem späteren Zeitpunkt lohnt sich auf Grund des geringen Unterschiedes zwischen einer einzelnen und zwei parallelen geregelten Pumpen nicht.

6 Begriffe, Symbole, und Einheiten

In den oben aufgeführten Formeln ist auf die Benennung der Einheiten der verwendeten Konstanten zur Erhöhung der Leserlichkeit verzichtet worden. Falls nicht anders aufgeführt, gelten folgende Bezeichnungen:

Nomenklatur		Einheit	→	SI
A	Querschnittsfläche	[mm ²]	÷ 10 ⁶	[m ²]
P	Leistung	[kW]	× 1'000	[W]
p	Druck	[bar]	× 100'000	[Pa]
Q	Durchfluss	[l/min]	÷ 60'000	[m ³ /s]
ρ	Dichte	[kg/m ³]		[kg/m ³]
n	Drehzahl	[rpm]	÷ 60	[1/s]
ν	Kinematische Viskosität	[m ² /s]		[m ² /s]
L	Länge	[m]		[m]
D	Durchmesser	[m]		[m]
H	Höhe	[m]		[m]
T	Temperatur	[°C]	+ 273.15	[K]
c_p	Spez. Wärmekapazität	[kJ/kg/K]	÷ 1'000	[J/kg/K]

7 Quellen

- [1] C. U. Brunner, J. Nipkow, P. Gyger, and T. Staubli, "Merkblatt 23: Pumpen," 2012.