

Versuchsauswertung Prozessmaschinen und Apparatechnik
KREISELPUMPE

Florian Enzenberger (*2033971*)
Monique Ramunno (*2035708*)
Sebastian Werner (*2033878*)

Versuchsbetreuer: S. Blendinger

Versuch durchgeführt am 1.6.2005

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|----------|
| 1 | Versuchsbeschreibung | 1 |
| 1.1 | Versuchsanlage | 1 |
| 1.2 | Durchführung | 2 |
| 2 | Ergebnisse | 2 |
| 2.1 | Bestimmung der Drosselkurve | 2 |
| 2.2 | Bestimmung einer $NPSHR_{3\%}$ -Kennlinie | 4 |
| 2.3 | Möglichkeiten der Förderstromregulierung | 8 |
| 3 | Diskussion der Ergebnisse | 9 |
| 3.1 | Drosselkennlinie | 9 |
| 3.2 | $NPSHR_{3\%}$ -Werte | 10 |
| 3.3 | Förderstromregelung | 10 |
| 3.4 | Fehlerquellen | 12 |
| | Anhang | I |
| A | Symbolverzeichnis | I |
| B | Abbildungsverzeichnis | I |
| C | Tabellenverzeichnis | I |
| D | Literatur | II |

1 Versuchsbeschreibung

1.1 Versuchsanlage

Im Versuch *Betriebsverhalten und Kennlinien von Kreiselpumpen* sollen mit der in Abb. 1 dargestellten Versuchsanlage die charakteristischen Kennlinien einer Kreiselpumpe ermittelt werden.

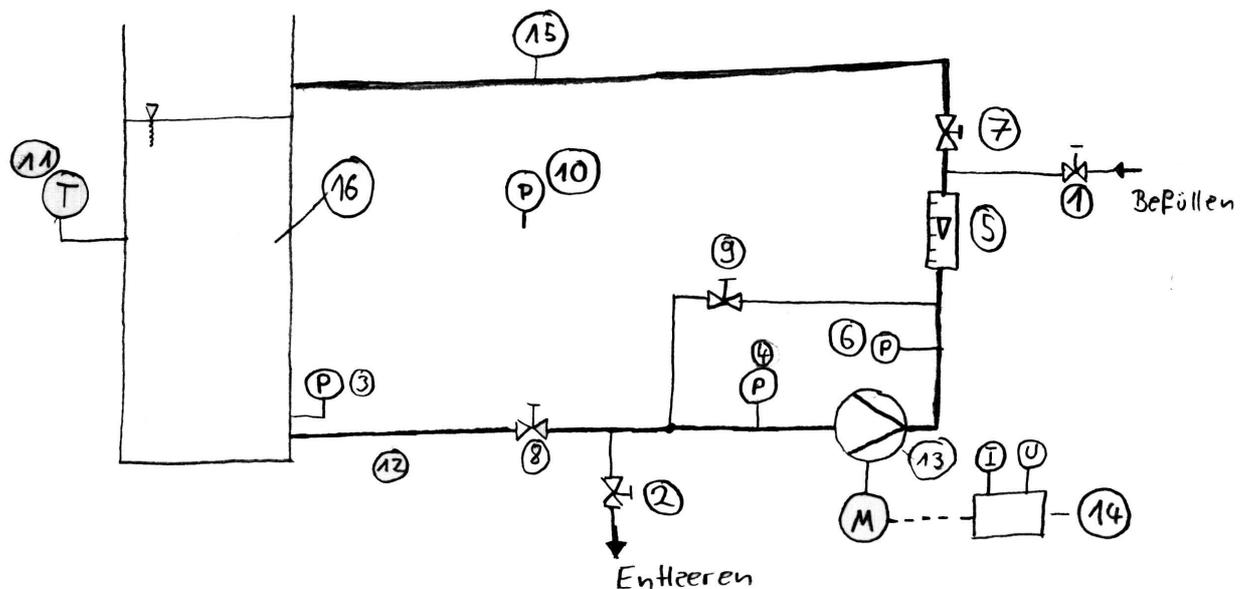


Abbildung 1: Schema der Versuchsanlage [1, Bild 4]

Die Versuchsanlage ist wie folgt aufgebaut: Aus einem Vorratstank (16) mit Thermometer (11) wird über ein Saugrohr (12) das Wasser zur Kreiselpumpe (13) befördert. Auf diesem Weg befindet sich zusätzlich ein Drosselventil (8), welches zur Senkung des Saugvordruckes Verwendung findet. Vor der Pumpe ist zu dem ein Manometer (4) zur Bestimmung des Saugdruckes angebracht.

Die Pumpe ist an einen Wechselstromdimmer (14) angebracht, der zudem die Ermittlung der aktuell anliegenden Spannung und Stromstärke ermöglicht. Auf der Druckseite der Pumpe befindet sich ein Manometer (6) zur Bestimmung des Förderdruckes / Förderhöhe. Über einen durch ein Ventil geregelten Bypass (9) kann ein definierter Volumenstrom zurück zur Saugseite rückgeführt werden. Zur Bestimmung des geförderten Volumenstromes befindet sich auf der Druckseite ein Schwebkörpervolumenstrommessgerät (5) (*Rotameter*).

Zum Simulieren einer bestimmten Förderhöhe befindet sich zudem ein Drosselventil (7) auf der Druckseite. Hierdurch kann ein Druckverlust eingestellt werden, der wie ein geodätischer Höhendruck wirkt und so die Ermittlung des Volumstromes in Abhängigkeit der Förderhöhe ermöglicht.

Nach dem Drosselventil (7) befindet sich die Rückführung zum Vorratstank (16). Zur Ermittlung des Luftdruckes ist an der Versuchsanlage zudem ein Manometer (10) vorhanden. Die zum Befüllen und Entleeren des Tanks erforderlichen Zu- und Abläufe sind unter (1) und (2) erkennbar.

1.2 Durchführung

Der Versuch gliedert sich in drei Teile:

1. Bestimmung einer Drosselkurve
2. Bestimmung einer NPSHR-3%-Q Kennlinie
3. Förderstromregelung

Im ersten Teil wird an zwei definierten Drehzahlen (bzw. Spannungen) bei jeweils mehreren Volumenströmen Q , welche durch das Drosselventil (7) eingestellt werden können, der Druck am Saug- (4) und Druckstutzen (6) sowie die Stromstärke bestimmt. Zusätzlich wird der Druck im Vorratsbehälter (16) gemessen.

Die Bestimmung des NPSHR verläuft bei jeweils konstanten Volumenströmen. Dann wird über Drosselventil (8) der Vordruck im Saugstutzen stufenweise verringert, was über den Manometer (4) zu beobachten ist. Hierbei muss allerdings über das Drosselventil (7) der Volumenstrom stets nachreguliert werden. Ab einem kritischen Wert beginnt ein deutlich hörbarer Kavitationsvorgang in der Pumpe, der sich auch in einem Abfall des Förderdruckes bemerkbar macht. Sogleich wird ein neuer Volumenstrom eingestellt und die Prozedur wiederholt.

Der dritte Versuchsteil soll zeigen, dass ein vorgegebener Volumenstrom durch mehrere Wege erreicht werden kann:

- Regulierung der Motorzahl
Über den Dimmer (14) wird die Versorgungsspannung des Motors so angepasst, dass sich der Volumenstrom einstellt.
- Drosselung
Das Ventil (7) auf der Druckseite wird zur Regelung des Volumenstromes teilweise geschlossen.
- Bypass
Öffnen des Ventils (9) bis sich am Rotameter der gewünschte Volumenstrom einstellt.
- Kavitation
Verringern des Vordruckes über Drosselventil (8), bis sich durch Kavitation in der Pumpe der gewünschte Volumenstrom einstellt.

Hierbei werden jeweils Druck am Saugstutzen (4), am Druckstutzen (6) sowie Spannung und Stromstärke gemessen.

Die gemessenen Daten sind den Messschriften (siehe Anhang) zu entnehmen.

2 Ergebnisse

2.1 Bestimmung der Drosselkurve

Zur Ermittlung der Drosselkurve werden bei zwei vorgegebenen Drehzahlen die Drücke den Manometern (3), (4) und (6), der Durchfluss Q , Stromstärke I und Spannung U gemessen. Um eine

variable Höhe zu simulieren wird mittels Drossel (7) der Durchfluss schrittweise heruntergeregelt. Die Förderhöhe H ergibt sich mit dem druckseitigen Druck p_D , der Dichte von Wasser ρ und der Erdbeschleunigung g zu

$$H = \frac{p_D}{\rho \cdot g} \quad (1)$$

Die Nutzleistung der Pumpe ist nach [1, Gleichung (3)]

$$P_F = \rho \cdot g \cdot H \cdot Q = p_D \cdot Q \quad (2)$$

Die elektrische Leistung ist nach [1, Gleichung (7)] definiert als

$$P_{el} = U \cdot I \cdot \cos \varphi = U \cdot I \cdot 0,9 \quad (3)$$

Nun ergibt sich der Wirkungsgrad der Pumpe nach [1, Gleichung (8)] zu

$$\eta_{Ges} = \frac{\rho g H Q}{U I \cdot 0,9} = \frac{P_F}{P_{el}} \quad (4)$$

Mit den im Anhang abgedruckten Messwerten erhält man folgende Ergebnisse. Die Förderhöhe über dem Durchfluss aufgetragen ergibt die charakteristische Drosselkennlinie, die für beide Drehzahlen in Abbildung 9 auf Seite 8 aufgezeichnet ist. Trägt man die elektrische Leistung zusammen mit dem Wirkungsgrad über dem Durchfluss auf, erhält man folgende Diagramme.

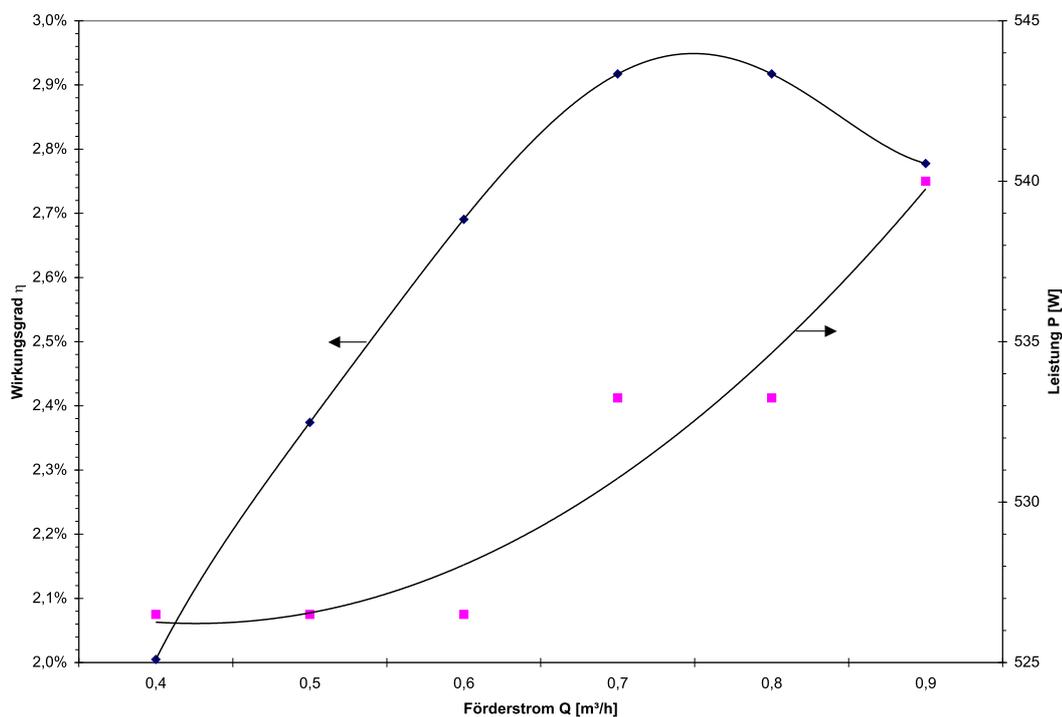


Abbildung 2: Wirkungsgrad und Leistungsaufnahme bei verringerter Drehzahl

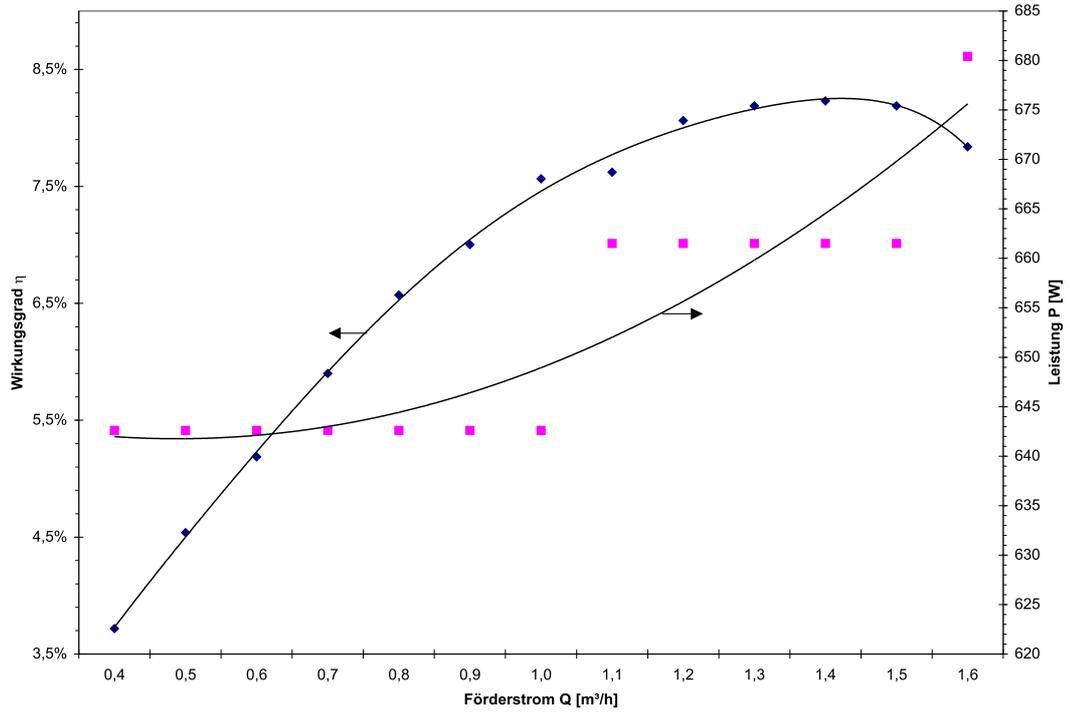


Abbildung 3: Wirkungsgrad und Leistungsaufnahme bei Nenndrehzahl

2.2 Bestimmung einer $NPSHR_{3\%}$ -Kennlinie

Zur Ermittlung $NPSHR_{3\%}$ -Kennlinie wird bei jeweils konstantem Durchfluss der Druck am Saugstutzen p_S mittels Drossel (8) abgesenkt. Dieser wird ebenso wie der Druck am Druckstutzen p_D , der nach Gleichung (1) analog zur Förderhöhe H ist, aufgezeichnet. Der NPSA-Wert ergibt sich aus p_S nach [1, Gleichung (9)] wie folgt

$$NPSHA = z_s + \frac{p_{atm} - p^{LV}(T)}{\rho g} - H_{VS} \quad (5)$$

Mit der Zulaufhöhe z_S , die analog Gleichung (1) definiert ist als

$$z_S = \frac{p_s}{\rho \cdot g} \quad (6)$$

und einem vernachlässigbar kleinen Strömungsverlust H_{VS} ergibt sich

$$NPSHA = \frac{p_s + p_{atm} - p^{LV}(T)}{\rho g} \quad (7)$$

Der temperaturabhängige Dampfdruck $p^{LV}(T)$ für Wasser entstammt [2]. Da die Temperatur während des Versuches durch Dissipation von 30 auf 32 °C zunimmt bleibt der Dampfdruck nicht konstant, wie in Tabelle 1 auf Seite 7 dargestellt. Für die eingestellten Förderströme ergeben sich die folgenden Kennlinien.

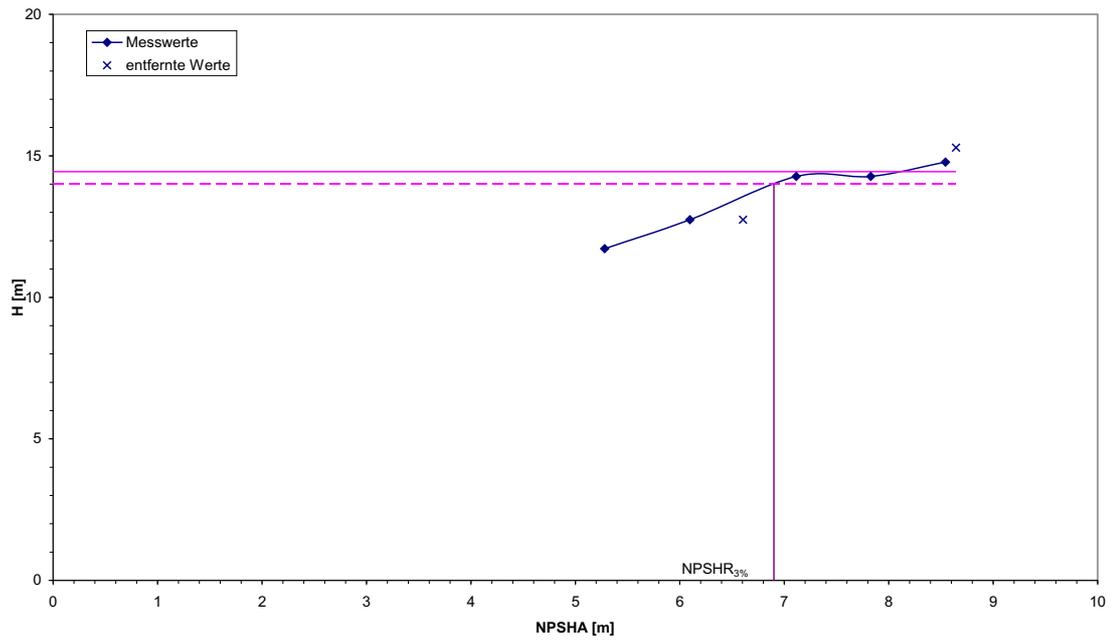


Abbildung 4: Ermittlung des NPSHR für $1,2 \frac{m^3}{h}$

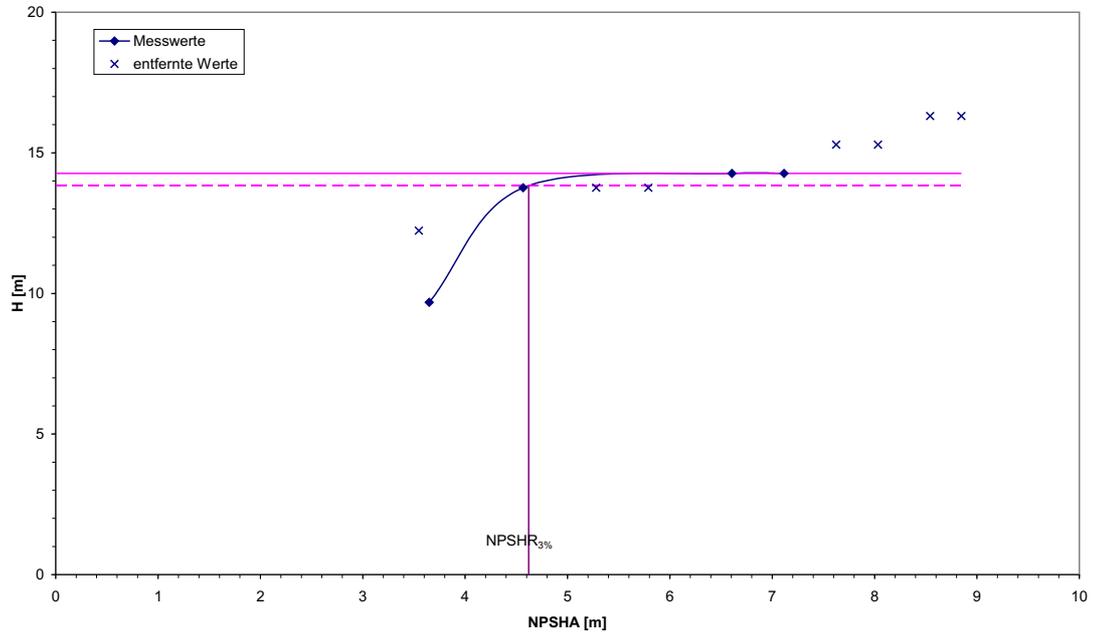


Abbildung 5: Ermittlung des NPSHR für $1,0 \frac{m^3}{h}$

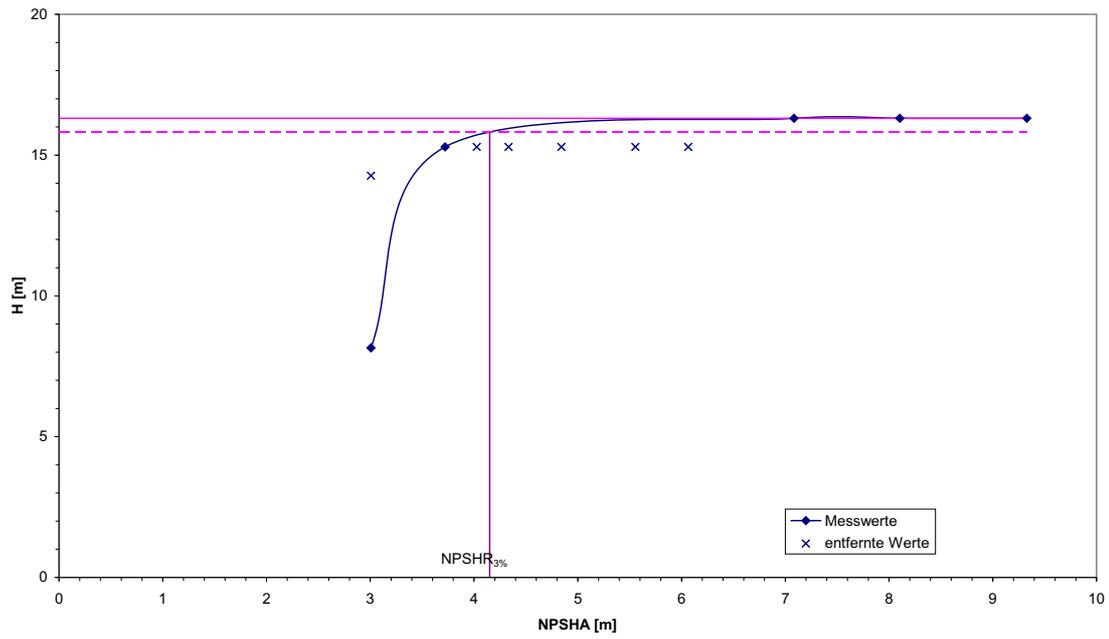


Abbildung 6: Ermittlung des NPSHR für $0,8 \frac{m^3}{h}$

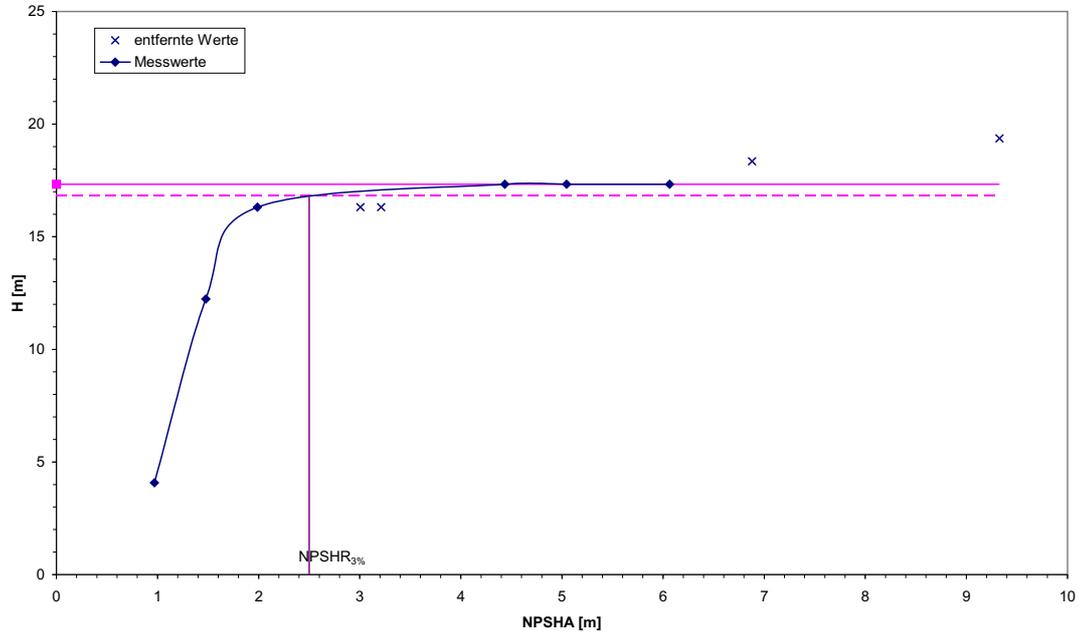
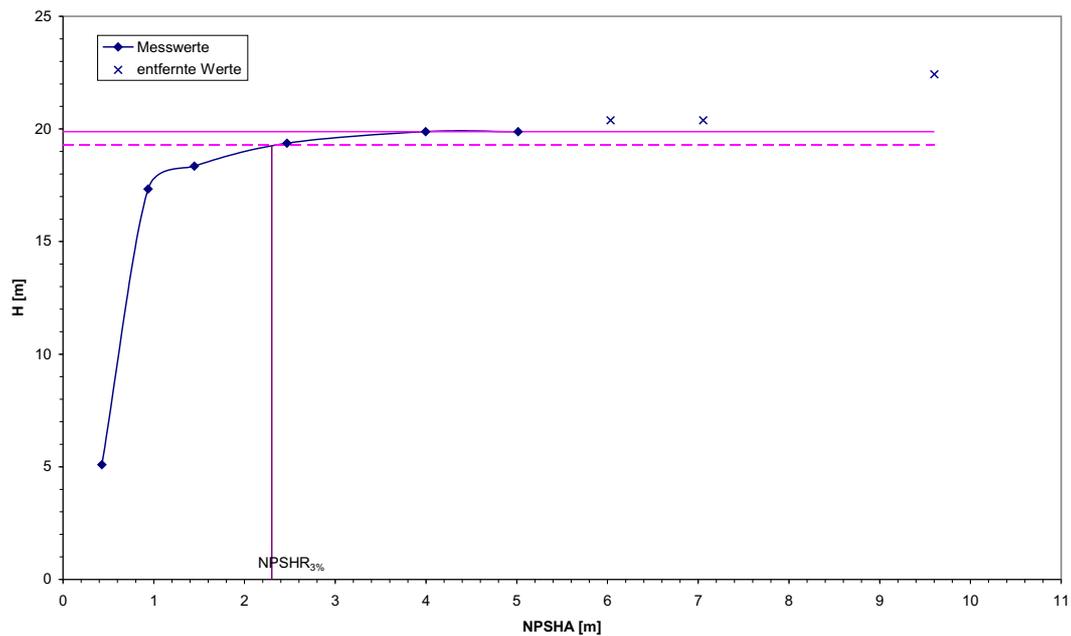


Abbildung 7: Ermittlung des NPSHR für $0,6 \frac{m^3}{h}$

Abbildung 8: Ermittlung des NPSHR für $0,4 \frac{m^3}{h}$

Zur Ermittlung des $NPSHR_{3\%}$ -Wertes wird von der Asymptote, der sich H annähert, 3% abgezogen. Der Schnittpunkt dieser Asymptote mit der H -Kennlinie liefert den $NPSHR_{3\%}$ -Wert, der auf der NPSHA-Achse abgelesen wird.

| Durchfluss Q m^3/h | Temperatur T $^{\circ}C$ | Dampfdruck p^{LV} bar | $NPSHR_{3\%}$ m |
|---------------------------|-------------------------------|------------------------------|----------------------|
| 1,2 | 30 | 0,042 | 6,90 |
| 1,0 | 30 | 0,042 | 4,62 |
| 0,8 | 31 | 0,045 | 4,15 |
| 0,6 | 31 | 0,045 | 2,50 |
| 0,4 | 32 | 0,048 | 2,30 |

Tabelle 1: $NPSHR_{3\%}$ -Werte für verschiedene Volumenströme

Die über den Durchfluss aufgetragenen $NPSHR_{3\%}$ -Werte ergeben die Anlagenkennlinie, die im folgenden Diagramm zusammen mit den in Kapitel 2.1 auf Seite 2 ermittelten Drosselkennlinien dargestellt ist.

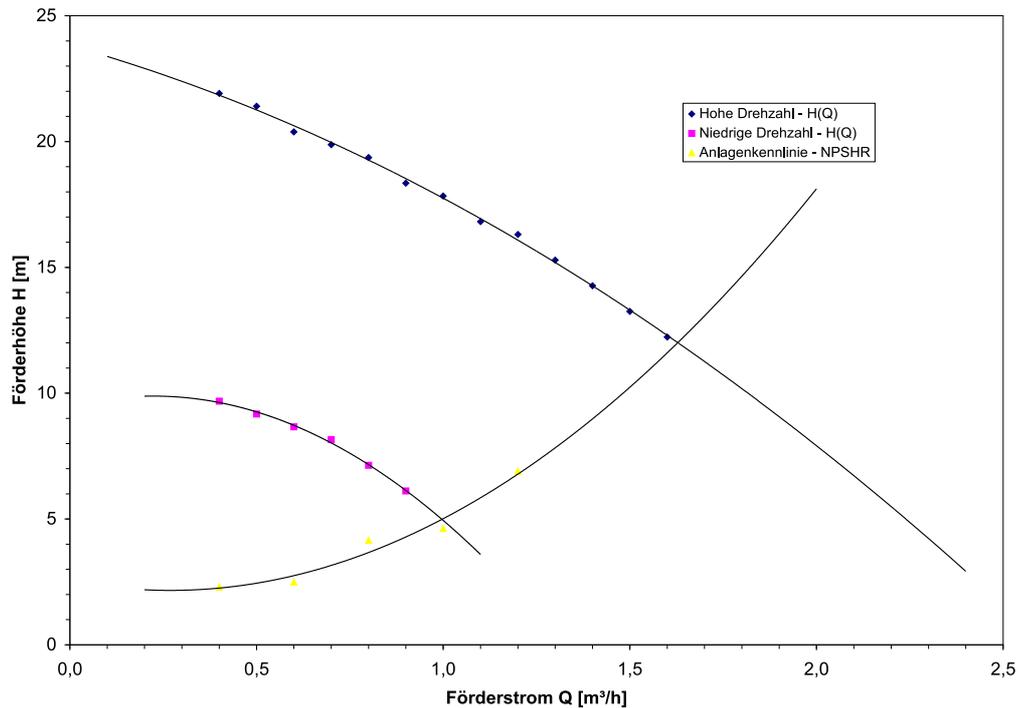


Abbildung 9: Anlagenkennlinie (NPSHR) und Drosselkennlinien

2.3 Möglichkeiten der Förderstromregulierung

Es wurde ein Förderstrom von $1 \frac{m^3}{h}$ eingestellt. Die Messwerte sind zusammen mit den Ergebnissen in Tabelle 2 aufgeführt.

Aus den gemessenen Werte (p_b, p_s, p_d, I, A und Q) können somit die Werte für P_F, P_{el}, H und η ermittelt werden. Die Berechnungen ergeben sich wie folgt:

Zur Berechnung von P_F wird [1, Formel 3] verwendet:

$$P_F = \rho g H Q = p_d Q \quad (8)$$

Die elektrische Leistungsaufnahme kann analog (3) ermittelt werden.

Der Wirkungsgrad η ist als Quotient von P_F zu P_{el} definiert. Deswegen gilt:

$$\eta = \frac{P_F}{P_{el}} \quad (9)$$

Die Förderhöhe ergibt sich analog Gleichung (1).

Die Betriebskosten K pro Betriebsjahr (8000 Stunden) ergeben sich durch:

$$K = P_{el} t k \quad (10)$$

Hierbei ist k der Strompreis pro Kilowattstunde.

Unter der Annahme, dass eine Pumpe mit einem Wirkungsgrad η , welcher 10% über dem bisherigen liegt, soll unter Berücksichtigung der Investitionskosten I von 400 € ermittelt werden, nach welcher Zeit sich eine Amortisierung einstellt. Hierzu wird wie folgt vorgegangen:

1. Ermittlung des neuen η
2. Berechnung von $P_{el,neu}$ via

$$P_{el,neu} = \frac{P_F}{\eta} \quad (11)$$

3. Ermittlung des Zeitpunktes, an dem beide Installationen die gleichen Kosten verursachen:

$$t = \frac{I}{k(P_{el} - P_{el,neu})} \quad (12)$$

Zusammenfassend ergibt sich folgende Tabelle:

| | Drehzahl | Drosselung | Bypass | Kavitation |
|-------------------------|----------|------------|--------|------------|
| p_b [bar] | 0,12 | | | |
| p_s [bar] | -0,02 | -0,03 | -0,1 | -0,5 |
| p_d [bar] | 0,5 | 1,6 | 0,8 | 0,6 |
| Q [$\frac{m^3}{3}$] | 1 | | | |
| I [A] | 3,6 | 3,15 | 3,2 | 2,95 |
| U [V] | 160 | 210 | | |
| H [m] | 6,12 | 15,29 | 8,15 | 6,12 |
| P_F [W] | 16,67 | 41,67 | 41,67 | 16,67 |
| P_{el} [W] | 518,40 | 595,35 | 604,80 | 557,55 |
| η [%] | 3,22 | 7,00 | 3,67 | 2,99 |
| K [€] p.a. | 414,72 | 476,28 | 483,84 | 446,04 |
| $\eta + 10\%$ [%] | 13,22 | 17,00 | 13,67 | 12,99 |
| $P_{el,neu}$ [W] | 126,12 | 245,12 | 162,51 | 128,31 |
| Amortisierung [h] | 10197 | 11421 | 9044 | 9319 |

Tabelle 2: Ergebnisse der Förderstomregulierung

3 Diskussion der Ergebnisse

3.1 Drosselkennlinie

Die in 2.1 ermittelte Leistungsaufnahme steigt proportional zur geförderten Menge, der Wirkungsgrad weist hingegen bei bestimmten Fördermengen ein Maximum auf. Dies entspricht den nach [1, Bild 3] zu erwartenden Ergebnissen. Für den Betrieb bei Nenndrehzahl wird der maximale Wirkungsgrad von 8,3% bei einem Förderstrom von $1,4 m^3/h$ erreicht, bei $5/7$ der Nenndrehzahl liegt der Wirkungsgrad von 2,94% bei $0,75 m^3/h$. Man erkennt, dass der bessere Wirkungsgrad bei Betrieb mit Nenndrehzahl erreicht wird. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Motor auf diese Drehzahl ausgelegt ist und eine aktive Kühlung durch den eingebauten Ventilator erst ab einer gewissen Drehzahl Wirkung zeigt.

Die Drosselkennlinien (Abbildung 9 auf der vorherigen Seite) entsprechen qualitativ den nach [3, Unterkapitel III a, Bild 2-2] zu erwartenden Verlauf. Die Kennlinien sind *druckweich*, was ein typisches Merkmal hydrodynamischer Verdrängerpumpen ist. Für eine auf ca. $5/7$ der Nenndrehzahl reduzierte Drehzahl liegt die Kurve in einem entsprechend niedrigeren Bereich.

3.2 NPSHR_{3%}-Werte

Die Ermittlung der NPSHR_{3%}-Werte in 2.2 birgt einige Schwierigkeiten. Da die wenigen gemessenen Werte stark schwanken ist eine zuverlässige Auftragung nicht gewährleistet. Teilweise ist kein Konvergenzniveau ersichtlich, was besonders in Abbildung 5 auf Seite 5 deutlich zu sehen ist. Um annähernd sinnvolle Verläufe zu erhalten, müssen etliche Werte (gekennzeichnet durch x) aus der Auswertung herausgenommen werden. Die Kennlinien entsprechen nun zumindest qualitativ dem, nach der Literatur [1, Bild 2] zu erwartenden Verlauf. Durch die zweifelhaften Messwerte ist aber eine quantitative Zuverlässigkeit nicht gewährleistet.

Wie in 9 auf Seite 8 ersichtlich ergeben die ermittelten NPSHR_{3%}-Werte dennoch einen Verlauf der Anlagenkennlinie, wie er auch in [3, Unterkapitel III a, Bild 2-2] dargestellt ist. Die Anlagenkennlinie kann durch ein Polynom 2. Grades gut gefittet werden, was auf eine turbulente Strömung hindeutet.

3.3 Förderstromregelung

Im Vergleich der Regulierungsmöglichkeiten des Fördervolumenstromes ergeben sich (nach Tabelle 2) folgende Diagramme:

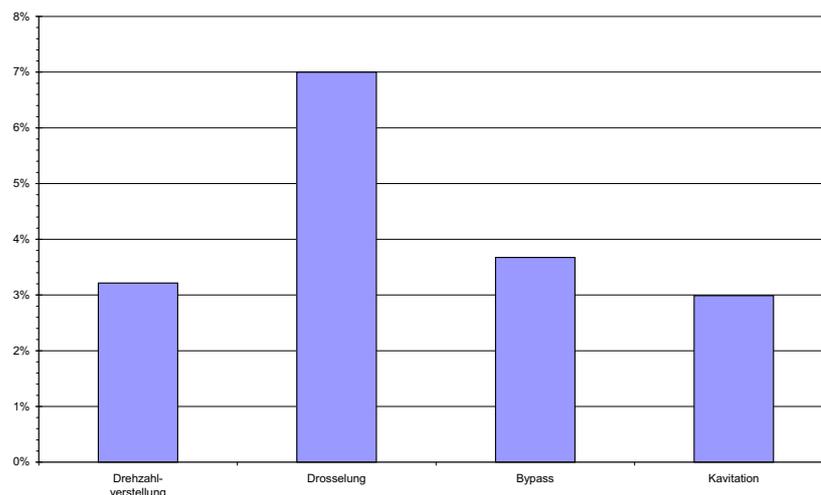


Abbildung 10: Vergleich der Wirkungsgrade verschiedener Förderstromregulierungen

Hier hat die Drosselung auf der Druckseite mit rund 7% den höchsten Wirkungsgrad. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass die Pumpe mit Nenndrehzahl betrieben wird und lediglich ein höherer Druckverlust auf der Druckseite ausgleichen muss.

Die Regelung der Drehzahl hat mit knapp über 3% Wirkungsgrad eine deutlich schlechtere Position. Der schlechte Wirkungsgrad ist auf den Dimmer zurückzuführen. Zudem kommt es bei der Regulierung der Drehzahl zu einer sehr hohen Wärmeentwicklung an der Pumpe, was die Vermutung unterstützt, dass die Pumpe bei verminderter Nennspannung weit ineffizienter arbeitet.

Bypassregelung und Kavitation haben ebenfalls einen Wirkungsgrad rund um 3%, was sich vor allem dadurch begründet, dass bei beiden Methoden der Druck auf der Druckseite massiv abfällt, was sich in einer deutlich niedrigeren Förderleistung (und somit auch im Wirkungsgrad) widerspiegelt.

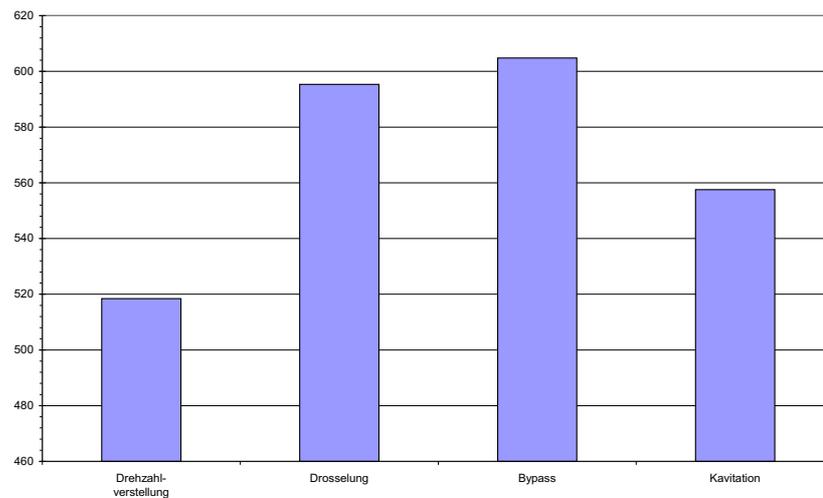


Abbildung 11: Vergleich der Leistungsaufnahmen verschiedener Förderstromregulierungen

Die mit über 600 W gemessene Leistungsaufnahme bei der Bypassregulierung ist darauf zurückzuführen, dass die Pumpe stets mit Vollast arbeitet. Bei der Drosselung ist die Aufnahme etwas geringer, was darauf zurückzuführen ist, dass ein höherer druckseitiger Druck aufgebracht werden muss. Die erwartungsgemäß geringste Leistungsaufnahme wird bei der Drehzahlregulierung erreicht.

Für die Förderstromregelung durch Drosselung (vgl. Kapitel 2.3) wird nun dargestellt, wie sich die Kosten für die Anlage mit rund 7% bzw. 17% Wirkungsgrad entwickelt.

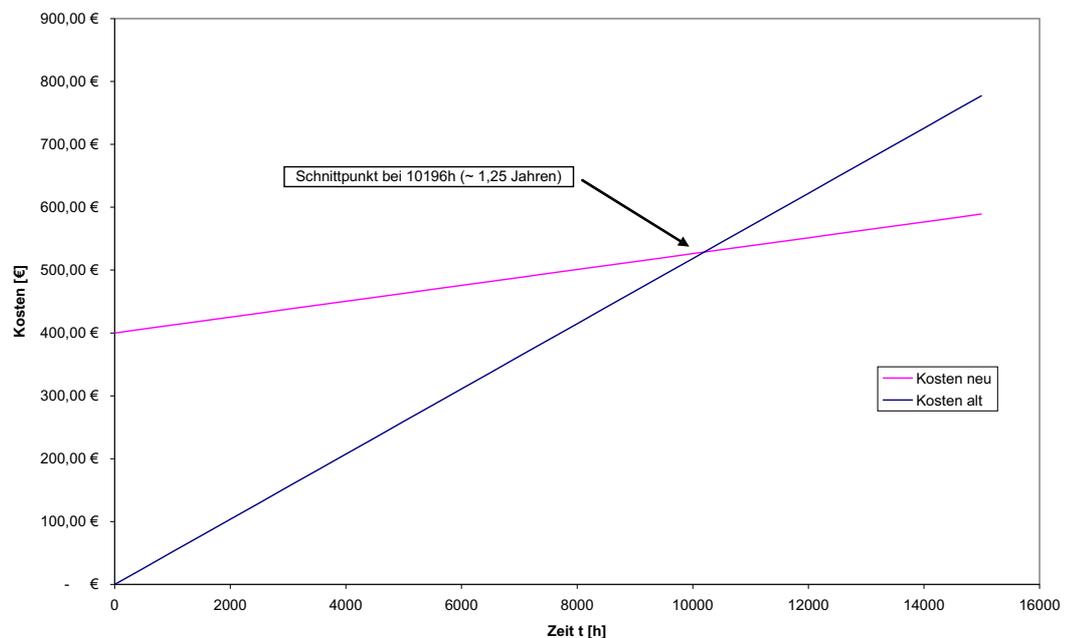


Abbildung 12: Kostenentwicklung für die Kreiselpumpe mit Drosselungsregelung

Die Daten sind aus Tabelle 2 entnommen.

Die neue Anlage weist deutliche höhere Investitionskosten auf, kann aber im Dauerbetrieb bereits nach etwa $1\frac{1}{4}$ Betriebsjahren einen Gesamtkostenvorteil erreichen.

3.4 Fehlerquellen

- Die Temperatur bleibt über den Versuchsablauf nicht konstant und wird zudem nicht im Pumpenkopf selbst, sondern im Vorratsbehälter gemessen. Eine Änderung der Temperatur bringt aber eine Änderung des Dampfdruckes mit sich, der in den NPSHA-Wert Eingang findet. Hinsichtlich der wohl weitaus größeren Fehler durch Druckschwankungen erscheint dieses Problem jedoch vernachlässigbar.
- Durch die turbulente Strömung bedingtes Schwanken der Manometer erschwert ein zuverlässiges Ablesen des Druckes.
- Bei auftretender Kavitation bricht auch der Förderstrom massiv ein, was eine exakte Einstellung des selbigen erschwert.

Anhang

A Symbolverzeichnis

| Formelzeichen | Bezeichnung | Einheit |
|---------------|------------------------|------------------|
| g | Erdbeschleunigung | $\frac{m}{s^2}$ |
| H | Förderhöhe | m |
| H_{VS} | Strömungsverlust | m |
| I | Stromstärke | A |
| I | Investitionskosten | € |
| k | Stromkosten | $\frac{€}{kWh}$ |
| K | Betriebskosten | € |
| p_{atm} | Athmosphärischer Druck | bar |
| p_D | Druck auf Druckseite | bar |
| p^{LV} | Dampfdruck | bar |
| p_S | Druck auf Saugseite | bar |
| P_{el} | Elektrische Leistung | W |
| P_F | Förderleistung | W |
| Q | Volumenstrom | $\frac{m^3}{h}$ |
| t | Zeit | h |
| U | Spannung | V |
| z_s | Zulaufhöhe | m |
| ρ | Dichte | $\frac{kg}{m^3}$ |
| η | Wirkungsgrad | - |

B Abbildungsverzeichnis

| | | |
|----|---|----|
| 1 | Schema der Versuchsanlage [1, Bild 4] | 1 |
| 2 | Wirkungsgrad und Leistungsaufnahme bei verringerter Drehzahl | 3 |
| 3 | Wirkungsgrad und Leistungsaufnahme bei Nenndrehzahl | 4 |
| 4 | Ermittlung des NPSHR für $1,2 \frac{m^3}{h}$ | 5 |
| 5 | Ermittlung des NPSHR für $1,0 \frac{m^3}{h}$ | 5 |
| 6 | Ermittlung des NPSHR für $0,8 \frac{m^3}{h}$ | 6 |
| 7 | Ermittlung des NPSHR für $0,6 \frac{m^3}{h}$ | 6 |
| 8 | Ermittlung des NPSHR für $0,4 \frac{m^3}{h}$ | 7 |
| 9 | Anlagenkennlinie (NPSHR) und Drosselkennlinien | 8 |
| 10 | Vergleich der Wirkungsgrade verschiedener Förderstromregulierungen | 10 |
| 11 | Vergleich der Leistungsaufnahmen verschiedener Förderstromregulierungen | 11 |
| 12 | Kostenentwicklung für die Kreiselpumpe mit Drosselungsregelung | 11 |

C Tabellenverzeichnis

| | | |
|---|---|---|
| 1 | NPSHR _{3%} -Werte für verschiedene Volumenströme | 7 |
| 2 | Ergebnisse der Förderstromregulierung | 9 |

D Literatur

- [1] BLENDINGER, Stefan: *Versuchsbeschreibung Betriebsverhalten und Kennlinien von Kreiselpumpen*. Erlangen: Lehrstuhl für Prozessmaschinen und Anlagentechnik, 2004
- [2] KAELIN, Peter: *Dampfdruck Wasser*. Version: Mai 2000.
<http://infosee.ethz.ch/kilo/tabellen/wasser.html>, Checked on: 02.06.2005
- [3] VETTER, Gerhard: *Prozessmaschinen und Apparatechnik (Kernfach)*. Erlangen: Lehrstuhl für Prozessmaschinen und Anlagentechnik, 1999