

# 1 Einleitung und Zielsetzung der Arbeit

Ein hier betrachteter Antriebsstrang hat die Aufgabe, die Leistung der elektrischen Antriebsmaschine aufzunehmen und an eine Arbeitsmaschine weiterzuleiten. Dabei kommt es neben einem stationären Leistungsfluss zu instationären Wechselwirkung zwischen den einzelnen Komponenten eines Antriebsstranges. Diese werden hervorgerufen durch Anfahrvorgänge, Ausfall des Antriebs bzw. der angetriebenen Maschine, Blockieren oder Freilauf von Lastmaschinen und Resonanzerscheinungen. Dies alles führt zu einer hohen Beanspruchung aller Bauteile und einem großen Strombedarf des elektrischen Antriebs.

Hydrodynamische Kupplungen werden häufig als stoß- und schwingungsdämpfende Übertragungselemente in Antriebssträngen eingesetzt, um Anfahr- und Drehschwingungsprobleme zu vermindern. Der Einsatz hydrodynamischer Kupplungen in Antriebssträngen ermöglicht unter anderem das sanfte Beschleunigen schwerster Massen durch preiswerte, unregelmäßige Asynchronmotoren. Dabei sorgt die spezielle Charakteristik der Kupplung während des Hochlaufs zunächst für ein rasches, entlastetes Beschleunigen des Motors im Bereich geringer Stromaufnahme unterhalb seines Kippschlupfes. Beim Beschleunigen der lastseitigen Massen mit großem Trägheitsmoment arbeitet der Asynchronmotor somit in der Nähe seines Nennbetriebspunkts.

Zur Auslegung eines Antriebsstranges und zur Beurteilung des gesamten Antriebssystems ist das stationäre sowie dynamische Verhalten aller Komponenten, speziell auch das der hydrodynamischen Kupplung, zu berücksichtigen.

Forderungen an Vorausberechnungen und Simulationsrechnungen eventueller Lastfälle in der Planungs- und Konstruktionsphase einer Anlage oder Maschine führen zu einem erhöhten Anspruch an die Güte der mathematischen Abbildung. Da reale Systeme in der Regel komplexe nichtlineare Zusammenhänge aufweisen und daher nur für kleine Änderungen um einen bestimmten Betriebspunkt oder innerhalb eines beschränkten Betriebs- bzw. Arbeitsbereichs linear betrachtet werden können, gestaltet sich eine genaue mathematische Formulierung der physikalischen Gesetzmäßigkeiten als besonders schwierig. Oft können aber bei stationär betriebenen Anlagen die beschreibenden nichtlinearen Gleichungen auf kleine Betriebsbereiche oder Veränderungen um einen speziellen Betriebspunkt angewendet und dort linearisiert werden.

Die systemrelevanten Größen jeder Einheit sowie deren Einfluss auf andere Einheiten müssen ermittelt werden. Sind die inneren physikalischen Zusammenhänge der Teilsysteme nicht oder nur zum Teil bekannt, können keine hinreichenden physikalischen Berechnungsmodelle zur Simulation bestimmter Last- und Anwendungsfälle des Gesamtsystems aufgestellt werden. Sollen in diesem Fall die statischen und dynamischen Eigenschaften eines Bauteils oder einer Baugruppe ermittelt werden, kann z. B. eine Identifikation durchgeführt werden. Hierfür werden die Ein- und Ausgangsgrößen an der Systemgrenze des jeweiligen Bauteils berücksichtigt und über mathematische Beziehungsgleichungen verbunden.

Zur Simulation des dynamischen Verhaltens von Antriebssträngen in denen hydrodynamische Kupplungen eingebaut werden, sind auch mathematische Modelle zur Beschrei-

bung hydrodynamischer Kupplungen erforderlich. Die Füllmengenänderung wirkt sich in unterschiedlicher Weise auf die Hochlaufzeit, die auftretenden Wellenbelastungen und die Amplitude sowie die Dauer der Torsionsschwingungsbelastung aus /Bec95/.

## **Zielsetzung der Arbeit**

In dieser Arbeit ist die Modellierung des dynamischen Kupplungsverhaltens mit Berücksichtigung des Kupplungsschlupfes und der Füllmenge erforderlich. Für diese nichtlinearen Systeme, über deren instationäres Übertragungsverhalten sehr wenige physikalische a-priori Informationen vorliegen, lassen sich für Berechnungen außerhalb des Nennbetriebspunkts oder über größere Betriebsbereichende physikalische Modelle aufstellen. In diesem Fall ist die Anwendung der Parameteridentifikation eine Möglichkeit.

Es wird ein Verfahren vorgestellt, dass die Systemgleichungen unter Berücksichtigung der Variation des Reibungsbeiwertes zur Identifikation des Übertragungsverhaltens der hydrodynamischen Kupplung verwendet und an das reale Systemverhalten mittels Parameterschätzverfahren angepasst werden. Damit stellt sich die Zielsetzung dieser Arbeit wie folgt dar:

- Mit der Methode der genetischen Algorithmen sollen die Parameter eines neuen mathematischen Modells und das Übertragungsverhalten der hydrodynamischen Kupplung mit einem linearen dynamischen und einem nichtlinearen statischen Teil als System abgebildet werden. Es soll ein Verfahren angegeben werden, mit dem eine Modellbildung über große Betriebsbereiche möglich ist.
- Ausgehend von der Variation des Flüssigkeits-Reibungsbeiwertes wird das Kupplungsmodell ermittelt.
- Das neue Modell des Antriebsstrangs soll erprobt und seine Gültigkeit mittels Simulations- bzw. Experimentesrechnungen weisen werden.

## **Zum Inhalt der Arbeit**

Zu Beginn eines jeden Kapitels wird ein kurzer Überblick über dessen Inhalt und Ablauf gegeben. Dies soll zur besseren Orientierung dienen und dem Leser eine schnelle Einarbeitung in die Thematik ermöglichen.

In Kapitel 2 wird die mathematische Modellbildung des Antriebssystems dargestellt, dessen der Aufbau der vereinfachten hydrodynamischen Kupplung erläutert und der Stand der Kenntnisse über das dynamische Verhalten dargelegt wird. Es handelt sich dabei im wesentlichen um einen theoretischen Gleichungsansatz, der aus der eindimensionalen Stromfadentheorie für die Kreislaufströmung der Kupplung hergeleitet wird. Es wird weiterhin die Kupplung vorgestellt, an der die experimentellen Untersuchungen in dieser Arbeit vorgenommen wurden. Es handelt sich um eine serienmäßige Voith - Turbokupplung 422T. Ausgehend der Typenschilddaten wird das Modell des Drehstrom-Asynchronmotors ermittelt, dann wird das Antriebsstrangmodell als Feder-Massen-Systeme durch gekoppeltes nichtparametrische Kupplungsmodell (Kupplungskennlinie)

---

präsentiert. Eine Analytische Untersuchung des kupplungsabtriebsseitigen Systems wird durchgeführt.

In Kapitel 3 wird die füllmengenabhängige Modellierung der hydrodynamischen Kupplung beschrieben, in denen statische und dynamische lineare sowie nichtlineare Modellierung präsentiert werden. Die Beschreibung geht von Ein- und Mehrgrößensystemen aus. Dazu wird eine Modellberechnung der hydrodynamischen Kupplungskennlinien mit Berücksichtigung des Kupplungsschlupfes sowie der Füllmenge präsentiert, die das Übertragungsverhalten der hydrodynamischen Kupplung innerhalb eines großen Betriebsbereichs auch bei schnellen Änderungen der Betriebszustände beschreibt. Die nichtlinearen Modelle der hydrodynamischen Kupplung werden zur Simulation dynamischer Vorgänge in ein Antriebsstrangkonzept für Drehschwingungsberechnungen eingebaut.

In Kapitel 4 werden die Grundlagen der Identifikation angegeben. Es erfolgt nach einer Einleitung in die allgemeine Identifikationsaufgabe die Beschreibung der Verarbeitung und Anwendung diskreter Signale. Die Modellparameter gehen linear in dieses Modell ein und können mit Parameterschätzverfahren bestimmt werden. Es erfolgt eine kurze Darstellung der Methode der Kleinsten Quadrate (LS), der instrumentellen Variable (IV) und der Genetischen Algorithmen.

Nach diesen theoretischen Ausführungen zur Identifikation und parametrischen Modellierung nichtlinearer Systeme wird in Kapitel 5 die für praktische Untersuchungen am Antriebsstrang mit der hydrodynamischen Kupplung notwendige Aufbau des Versuchsstands vorgestellt. Von besonderem Interesse ist dabei die realisierte Regelung des Versuchsstands, die für die Identifikation nichtlinearer Systeme ermöglicht.

Nachfolgend werden in Kapitel 6 experimentelle Untersuchungen des stationären und instationären Übertragungsverhaltens der hydrodynamischen Kupplung bei Teil- und Vollfüllung bzw. beim Hochlauf und rechteckförmiger Erregung der Kupplungsabtriebsseite vorgestellt. Die wichtigsten Ergebnisse und Auswertungen der durchgeführten Versuche sind dargestellt.

In Kapitel 7 wird der Vergleich von Messungen mit Simulationsrechnungen des Modells des Antriebsstrangs mit hydrodynamischer Kupplung verifiziert. Eine Verallgemeinerung des neuen Modells der hydrodynamischen Kupplung wird präsentiert.

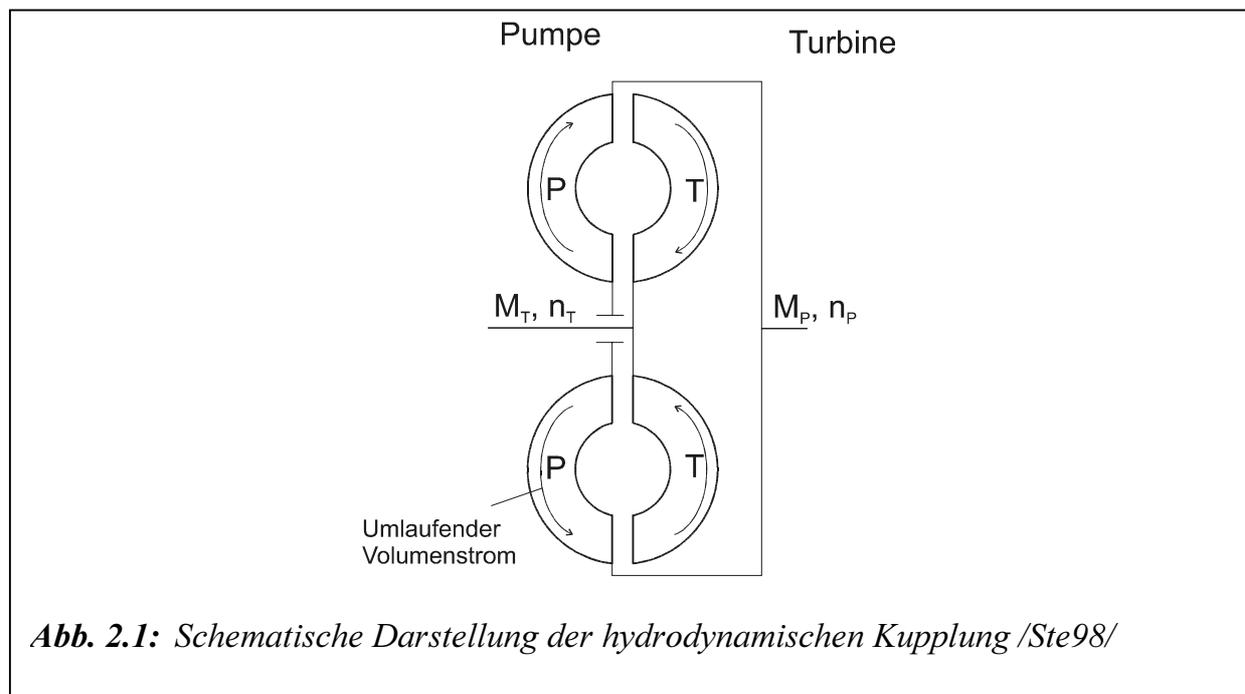


## 2 Mathematische Modellbildung des Antriebssystems

### 2.1 Vereinfachte hydrodynamische Kupplung

#### 2.1.1 Allgemeine Grundlagen

Die hydrodynamische Kupplung ist ein Element eines Antriebsstrangs und dient zur Übertragung eines Antriebsmomentes auf eine Arbeitsmaschine. Die Hauptbestandteile der hydrodynamischen Kupplung sind das Außenrad, das Innenrad und die Gehäuseschale, wie in der **Abbildung 2.1** dargestellt ist. Die Gehäuseschale ist mit dem Außenrad verbunden und bildet mit diesem einen torusförmigen Arbeitsraum, der mit der Betriebsflüssigkeit, meist Öle geringer Viskosität oder Wasser, gefüllt ist. Üblicherweise wird das Außenrad als Pumpenrad und das Innenrad als Turbinenrad verwendet.



Bei der hydrodynamischen Kupplung nimmt ein Pumpenlaufrad (P) über die Eingangswelle die mechanische Leistung  $M_p \omega_p$  auf und überträgt sie an das umlaufende Fluid (meist dünnflüssiges Mineralöl, aber auch Wasser oder andere nichtbrennbare Flüssigkeit). Ein Turbinenlaufrad (T) entzieht dem Fluidstrom Energie und gibt an der Ausgangswelle die Leistung  $M_T \omega_T$  ab. Vernachlässigt man das sehr kleine Luftreibungsmoment an der Außenfläche des mitrotierenden Gehäuses der hydrodynamischen Kupplung, so ergibt sich aus dem Momentengleichgewicht  $M_T = M_p$ . Das Drehzahlverhältnis kann unabhängig davon alle Werte im Bereich  $0 \leq \omega_T / \omega_p < 1$  annehmen. Es stellt sich selbsttätig und stufenlos nach der Höhe des zu übertragenden Momentes ein. Für alle Beharrungszustände gilt die Leistungsbilanzgleichung: