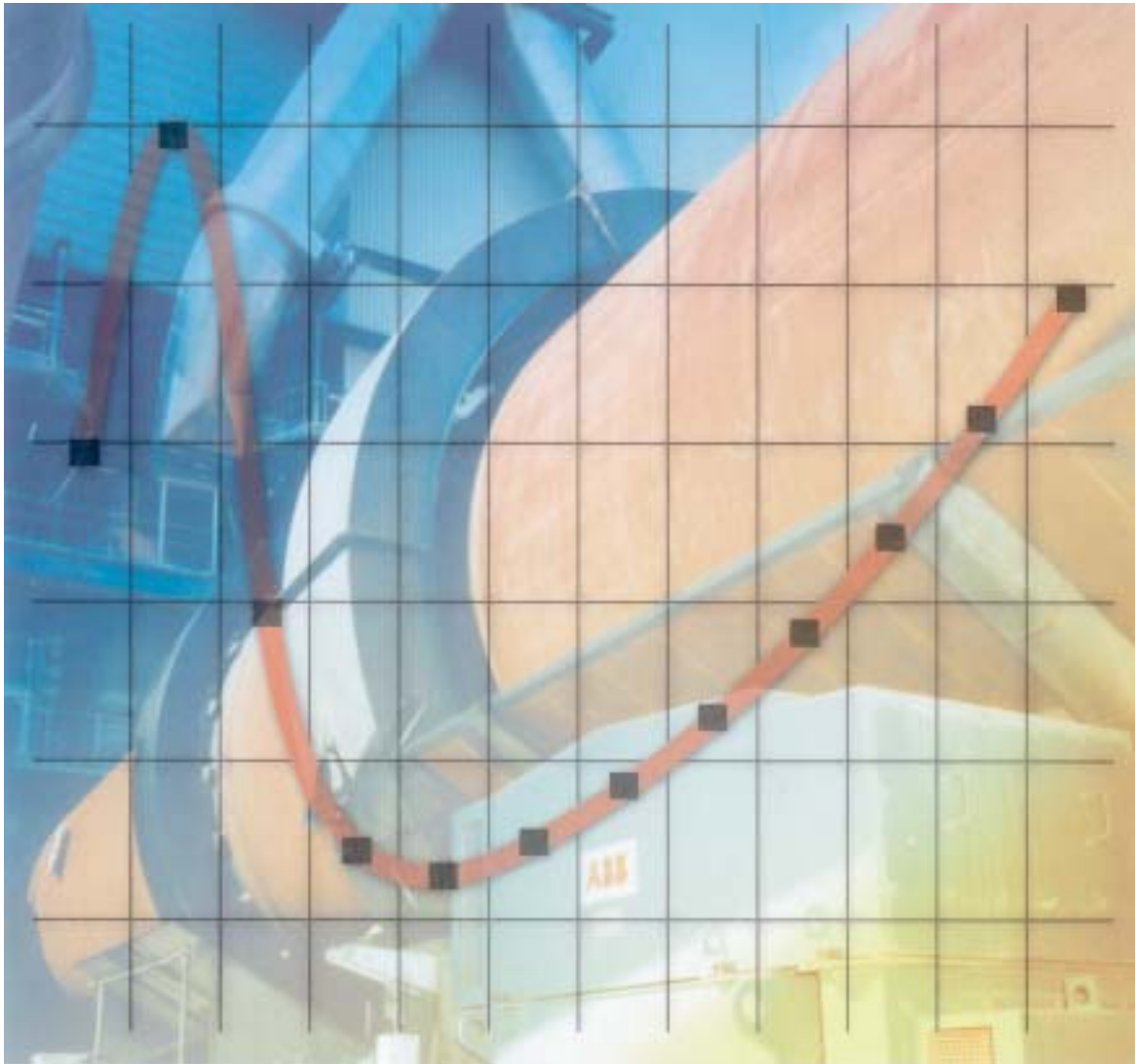


# Starting of drives in the cement industry – requirements, methods and solutions

## Das Starten von Antrieben in der Zementindustrie – Anforderungen, Methoden und Lösungen

Reprint from ZKG INTERNATIONAL 2003/10



**ABB**



# Das Starten von Antrieben in der Zementindustrie – Anforderungen, Methoden und Lösungen

**Zusammenfassung:** Dieser Beitrag soll das Bewusstsein für die Anforderungen beim Starten von Antrieben verschiedener Applikationen in Zementwerken sensibilisieren. Er soll auch aufzeigen, welche Startmethoden mit unterschiedlichen Technologien heutzutage verfügbar sind und er stellt für alle genannten Applikationen erprobte Lösungen vor.

# Starting of drives in the cement industry – requirements, methods and solutions

**Summary:** The intention of this paper is to raise the awareness for the requirements of starting drives for different uses in cement factories. It will also show which kinds of starting methods with different technologies are available today. It presents approved solutions for all applications mentioned.

# Démarrage des commandes dans l'industrie du ciment – Exigences, méthodes et solutions

**Résumé:** L'objectif du présent article est de sensibiliser aux exigences du démarrage des commandes pour différentes applications dans les cimenteries. Il renseigne également sur les méthodes de démarrage actuellement disponibles avec différentes technologies et présente des solutions éprouvées pour toutes les applications citées.

# Arranque de accionamientos en la industria del cemento – exigencias, métodos y soluciones

**Resumen:** Este artículo pretende concienciar a cerca de los requisitos a seguir en el arranque de accionamientos en diferentes aplicaciones de las fábricas de cemento. Aclara los métodos de arranque mediante diferentes tecnologías disponibles hoy en día y describe para todas las aplicaciones arriba mencionadas soluciones probadas.

## 1 Einleitung

Die Anforderungen, eine Maschine unter Last zu starten, sind aufgrund der kontinuierlich wachsenden Anlagengrößen und der daraus resultierenden Komplexität gestiegen. Das Startdrehmoment des Motors, das Trägheitsmoment der Lastmaschine, die Startzeit und die Netzbedingungen müssen als Gesamtheit betrachtet und sorgfältig einzeln überprüft werden. Nur dann sind problemlose und risikofreie Starts möglich. Aber nicht nur der Startprozess, auch Auswahl und Dimensionierung sind eine Herausforderung. Falls die Notwendigkeit der Integration eines Bypasses besteht, rückt die Antriebsauslegung in Dimensionen vor, in denen man alle Komponenten und deren Funktion genauestens kennen muss.

## 2 Maßgebliche Kriterien bei der Auswahl von Antrieben

- Einsatzbereich
  - Auslegung der Antriebe
  - Umgebungsbedingungen
- 
- welche Applikation
  - welche Technologie
  - Stromversorgungsnetze

## 1 Introduction

The requirements for starting a machine on-load have grown due to the continuously increasing sizes of plants and their resulting complexity. The starting torque, the inertia moment of the load machine, the starting time and the network conditions have to be regarded as a whole and have to be checked carefully one by one. Only if these prerequisites have been fulfilled it will be possible to start the machine unproblematically and free of risk. Not only the starting process but also the selection and dimensioning are a challenge. If it will be necessary to integrate a bypass, the design of the drives will reach dimensions where really all components and their functions must be known exactly.

## 2 Decisive criteria for the selection of drives

- Operational area
  - Design of drives
  - Ambient conditions
- 
- what kind of application
  - what kind of technology
  - power supply systems

## 2.1 Kriterien im Einsatzbereich

Das Wiederstarten mit hohen Drehmomentanforderungen nach einem Ausfall eines Antriebes bei Vertikalrollenmühlen, Brechern und Förderbändern ist ein wichtiges Kriterium. Sollte ein Antrieb der genannten Anwendungen im Betrieb ausfallen und auf dem Mahlteller oder dem Band Material liegen bleiben, ist beim Wiederaufahren ein enorm hohes Anfahr-drehmoment erforderlich. Gewöhnlich werden die Antriebe nicht für diese Betriebsbedingungen ausgelegt.

## 2.2 Kriterien für die Auslegung der Antriebe

2.2.1 Starten eines Käfigläufermotors mit langen Anschlussleitungen

Befindet sich der Einsatzbereich des Motors in größerer Entfernung von der Stromversorgungsstation, ist je nach aufzubringendem Startmoment mit erheblichen Spannungsabfällen in der speisenden Leitung zu rechnen. Der Spannungsabfall schadet dem Motor an sich nicht, aber er reduziert, abhängig auch vom Motortyp, das Drehmoment in einer quadratischen Funktion zum Spannungsabfall. Daraus resultieren inakzeptabel lange Startzeiten und es birgt zudem die Gefahr einer übermäßigen Erwärmung des Rotors.

2.2.2 Direktstart eines Käfigläufermotors bei hohem Trägheitsmoment der Last

Mit immer größer werdenden Anlagen wächst selbstverständlich auch die Größe aller Ausrüstungen. Besonders bei Ventilatoren ist eine deutliche Zunahme des Ventilator-Laufraddurchmessers und dessen Gewichts zu beobachten. Physikalisch spiegeln diese Trends zwei Fakten wider:

- Mit der Zunahme des Laufradgewichts muss der Antrieb linear dazu eine Drehmomenterhöhung liefern.
- Mit wachsendem Laufraddurchmesser muss der Antrieb eine Drehmomenterhöhung in quadratischer Funktion liefern.

2.2.3 Ofenantriebe

In der Startphase des Ofens und auch im Normalbetrieb benötigt der Ofenantrieb selten mehr als 100 % seines Drehmomentes. Nur in Sonderfällen beträgt das erforderliche Drehmoment 250 %. Ist es sinnvoll, die gesamte Ausrüstung wie Transformator, Antrieb und Motor nur für diese Eventualität überzudimensionieren? Hier stellt sich die Frage nach einer alternativen Lösung zur Überdimensionierung der Motoren.

## 2.3 Umgebungsbedingungen und Stromversorgungsnetze

2.3.1 Direktstart von großen Käfigläufermotoren – Spannungsabfall im Netz

Mit zunehmenden Durchsatzleistungen in Zementanlagen haben auch die Antriebseinheiten an Leistung zugenommen. Ein Direktstart eines großen Motors mit Startströmen um 600 % des Motor-Nennstromes wird die zugelassenen Standards in Bezug auf die Netzqualität nicht mehr erfüllen. Bevor Alternativen und Lösungen definiert werden können, muss das physikalische Verhalten in Bezug auf die Anforderungen an das vom Motor abgegebene Drehmoment sowie das Trägheitsmoment der Lastmaschine in den verschiedenen Anwendungsfällen bekannt sein.

## 3 Typische Anfahrtsdrehmomentlasten bei verschiedenen Anwendungen

Jede Anwendung zeichnet sich durch ihre charakteristischen Drehmomentanforderungen sowohl für den Start als auch für

## 2.1 Operational area criteria

The important criteria include the restart with high torque requirements after a breakdown of a drive of vertical roller mills, crushers and conveyor belts. If a drive of the above systems should fail during operation and material is still resting on the grinding bowl or on the belt, a very high starting torque will be required for the restart. Usually the drives are not designed for these operating conditions.

## 2.2 Design criteria for drives

2.2.1 Starting of squirrel-cage motors with long connecting cables

If the operational area is far away from the power supply station, a severe voltage drop in the feeder should be expected depending on the starting torque to be provided. The voltage drop does not actually harm the motor, but it reduces the torque, also depending on the type of motor, with the square factor of the voltage drop. Unacceptable long starting times and the danger of overheating of the rotor will result from it.

2.2.2 DOL starting of a squirrel-cage motor with high load inertia moment

It goes without saying that the size of equipment is growing with ever-increasing plants. Especially fans are increasing significantly as regards the impeller diameter and weight. These trends reflect two facts from the physical point of view:

- With an increased weight of the impeller, the drive has to provide a torque increase linear to it.
- With growing impeller diameter, the drive has to provide an increased torque in a square function.

2.2.3 Kiln drives

The kiln drive will rarely need more than 100 % of its torque during start-up and also during normal operation. Only in special cases the required torque will amount to 250 %. Is it reasonable to oversize the whole equipment, such as transformer, drive and motor, only for this eventuality? The question is whether there is another solution than oversizing the motors.

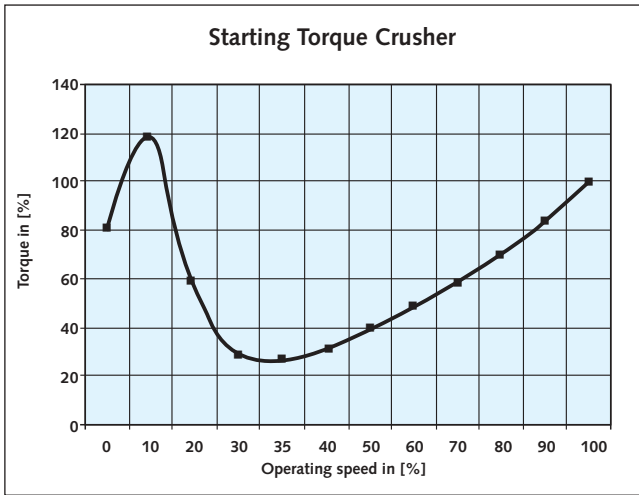
## 2.3 Ambient conditions and power supply systems

2.3.1 DOL starting of large squirrel-cage motors – voltage drop in the network

With increasing throughputs in cement plants, the power of drive units was increased, too. A DOL start of a big motor with starting currents amounting to around 600 % of the rated current of the motor will no longer meet the requirements of the relevant network quality standards. The physical behaviour concerning the demands on the torque delivered by the motor as well as the inertia moment of the load machine must be known for the various applications before alternatives and solutions may be defined.

## 3 Typical starting torque loads of different applications

Any of the applications has typical torque requirements both for starting and the operational phase. The torque requirements can roughly be defined by the requirements for plant start-up and operation. The inertia moment is more a physical parameter, which influences the running-up time until the specified speed has been reached. The characteristics of the ten most important applications have been summarized in the paragraphs 3.1 through 3.10.



1 Anfahr- und Betriebsdrehmoment für Brecher  
1 Starting torque of crushers

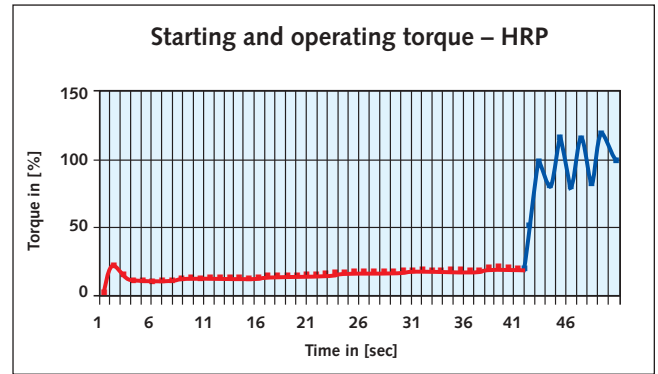
die operative Phase aus. Die Anforderungen an das Drehmoment können ganz grob durch die Erfordernisse, die Anlage zu starten und zu betreiben, definiert werden. Das Trägheitsmoment stellt somit einen eher physikalischen Parameter dar, der die Anfahrzeit bis zur Erreichung der vorgegebenen Drehzahl beeinflusst. In den Kapiteln 3.1 bis 3.10 sind die Charakteristika der zehn wichtigsten Anwendungen zusammengefasst.

### 3.1 Brecher

Brecher starten immer im Leerlauf, das heißt ohne Material. Als Antriebssystem wird meist ein Schleifringmotor mit Anlasswiderstand eingesetzt. Der Anlasswiderstand ist derart konzipiert, dass im Rotorkreis immer ein Schlupf Widerstand bestehen bleibt, der das Antriebsverhalten weich macht. Die Schlupfenergie (normalerweise 5 % bis 10 % der Nennleistung) wird im Schlupf Widerstand vernichtet. Ökonomisch gesehen ist das keine optimale Betriebsweise. Der Antrieb ist normalerweise für eine Belastung von 250 % für 10 bis 15 Sekunden (bis zu 10-mal pro Stunde) ausgelegt. Die erforderliche Motorleistung für diese Anwendung liegt bei 500 kW bis 4 MW. **Bild 1** zeigt den Verlauf eines Anfangsdrehmoments für einen Brecher im Leerlauf. In **Tabelle 1** sind Lösungen für das Starten von Brechern zusammengestellt.

### 3.2 Hydraulische Rollenpresse (HRP)

Normalerweise werden hydraulische Rollenpressen mit zwei Motoren betrieben. Abhängig von den Anforderungen können



2 Anfahr- und Betriebsdrehmoment einer hydraulischen Rollenpresse  
2 Starting and operation torque of a hydraulic roller press

### 3.1 Crushers

Crushers are always be started without load, i.e. without material. The drive system used is mostly a wound-rotor motor with starting resistor. The starting resistor is designed in such a way that there will always remain a slip resistance in the rotor circuit making the drive behaviour smooth. The slip power (usually 5 up to 10 % of the nominal power) is eradicated in the slip resistance. From the economic point of view, this is not an optimal operating mode. Normally, the drive is designed to cover an overload of 250 % for 10 to 15 seconds (up to 10 times per hour). The motor output required for this application amounts to 500 kW up to 4 MW. **Figure 1** shows the starting torque curve of a crusher without load. **Table 1** shows solutions for crusher starting.

### 3.2 Hydraulic roller press (HRP)

Usually two motors drive the hydraulic roller press. Depending on the requirements, the system can either be run at constant speed with squirrel-cage motors and DOL start, or with adjustable speed. The HRP will always be started with open pressing rollers, i.e. without load. It is not necessary to overdimension a squirrel-cage motor for rapid load changes on an HRP. The load changes are between 160 % and 40 % of the rated load and have a short duration (1 Hz). When dimensioning a squirrel-cage motor it has to be ensured that the maximum torque required for an HRP will be less than 60 % of the pull-out torque of the motor. In case of variable-speed drives, the power has to be designed to cover torque variations of up to 160 %. The motor output required for this application amounts to 300 kW up to 4.5 MW. **Figure 2** shows the starting and the operation torque of a hydraulic roller press, e. g. a Polycom mill.

**Tabelle 1** Startmöglichkeiten für Brecher  
**Table 1** Starting solutions for crushers

Lösung <i>Solution</i>	Bemerkung <i>Remarks</i>	Netzwerk <i>Network</i>	anwendbar <i>Applicable</i>
Käfigläufer-Motor Direktstart bis zu 400 kW <i>Squirrel-cage motor DOL starting up to 400 kW</i>	Unter beiden Bedingungen möglich, 80 und 100 % der Nennspannung. Überprüfung des Trägheitsmoments <i>Possible under both conditions, 80 and 100 % of rated voltage. Check moment of inertia</i>	Kein Problem (Bild 18 und 19) <i>No problem (Fig. 18 and 19)</i>	Ja <i>Yes</i>
Käfigläufer-Motor Direktstart über 400 kW <i>Squirrel-cage motor DOL starting above 400 kW</i>	Unter beiden Bedingungen möglich, 80 und 100 % der Nennspannung <i>Possible under both conditions, 80 and 100 % of the rated voltage</i>	Obergrenze 1 in Gefahr (Bild 18) <i>Upper limit 1 in danger (Fig. 18)</i>	Teilweise <i>Partly</i>
Käfigläufer-Motor betrieben mit Frequenzumrichter <i>Squirrel-cage motor operated with frequency converter</i>	Unter beiden Bedingungen möglich, 80 und 100 % der Nennspannung <i>Possible under both conditions, 80 and 100 % of the rated voltage</i>	Kein Problem <i>No problem</i>	Ja <i>Yes</i>
Schleifringläufer-Motor <i>Wound-rotor induction motor</i>	Unter beiden Bedingungen möglich, 80 und 100 % der Nennspannung <i>Possible under both conditions, 80 and 100 % of the rated voltage</i>	Kein Problem <i>No problem</i>	Ja <i>Yes</i>

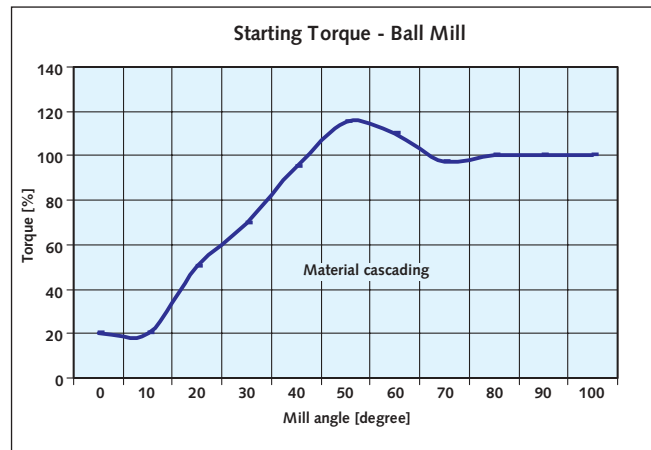
die Motoren entweder mit konstanter Drehzahl mit Käfigläufer-Motoren und Direktstart oder mit regelbarer Drehzahl betrieben werden. Die HRP wird immer mit offenen Pressrollen, das heißt ohne Last, gestartet. Für schnelle Lastwechsel an einer HRP muss ein Käfigläufer-Motor nicht überdimensioniert werden. Die Lastwechsel sind von kurzer Dauer (1 Hz) und liegen zwischen 160 % und 40 % der Nennlast. Bei der Dimensionierung eines Käfigläufer-Motors muss sichergestellt werden, dass das maximal bei einer HRP erforderliche Drehmoment niedriger als 60 % des Motorkippmoments ist. Bei drehzahlvariablen Antrieben muss die Leistung so konzipiert sein, dass dynamische Drehmomentänderungen von bis zu 160 % abgedeckt werden können. Die erforderliche Motorleistung für diese Anwendung liegt bei 300 kW bis 4,5 MW. **Bild 2** zeigt das Anfangs- und das Betriebsdrehmoment einer hydraulischen Rollenpresse, z.B. einer Polycom-Mühle. Das Anfangsdrehmoment ist eher gering, daher kann mit der Materialzufuhr gestartet werden, sobald die Rollen in Betrieb sind. In **Tabelle 2** sind Lösungsmöglichkeiten für den Start von hydraulischen Rollenpressen zusammengestellt.

### 3.3 Kugelmühlen

Eine Kugelmühle wird über einen bzw. zwei Motoren angetrieben. Das Antriebssystem kann sowohl ein Konstantdrehzahlantrieb (Schleifringläufermotor) als auch ein drehzahlvariabler Antrieb (getriebeloser Mühlenantrieb) sein. Die erforderliche Motorleistung liegt zwischen 1 MW und 8 MW. **Bild 3** zeigt den Drehmomentbedarf einer Kugelmühle. In **Tabelle 3** sind Lösungen für den Start von Kugelmühlenantrieben zusammengestellt.

### 3.4 Vertikalrollenmühlen

Das Arbeitsprinzip einer Rollenmühle basiert auf 2 bis 4 Mahlrollen mit Wellen auf drehbaren Armen, die sich auf einem horizontalen Mahlteller bewegen. Die Rollenpressung wird hydropneumatisch übertragen. Das Anfahren erfolgt normalerweise mit abgehobenen Rollen. Sollte die Anlage infolge einer Störung ausfallen, bleibt das Mahlgut auf dem Mahlteller liegen. Dieser Fall stellt selbst mit angehobenen Rollen eine erhöhte Belastung des Antriebes dar und muss bei der Dimensionierung des Antriebssystems ebenfalls berücksichtigt werden. Die erforderliche Motorleistung liegt zwischen 1 MW und 5 MW. **Bild 4** zeigt das Anfahrtdrehmoment einer Vertikalrollenmühle (MPS) in drei verschiedenen Belastungsfällen. In



**3** Anfahrtdrehmoment einer Kugelmühle mit 1 rpm (ohne Beschleunigungskomponenten)

**3** Starting torque of a ball mill with 1 rpm (without acceleration components)

The starting torque is rather low. Consequently, material feed can be started as soon as the rollers are in operation. **Table 2** shows the solutions for the start of hydraulic roller presses.

### 3.3 Ball mills

A ball mill is driven by one or two motors. The drive system can be a constant-speed drive (wound-rotor motors) or a variable-speed drive (gearless mill drive). The required motor output is between 1 MW and 8 MW. **Figure 3** shows the torque requirement of a ball mill. **Table 3** shows solutions for the start of ball mill drives.

### 3.4 Vertical roller mills

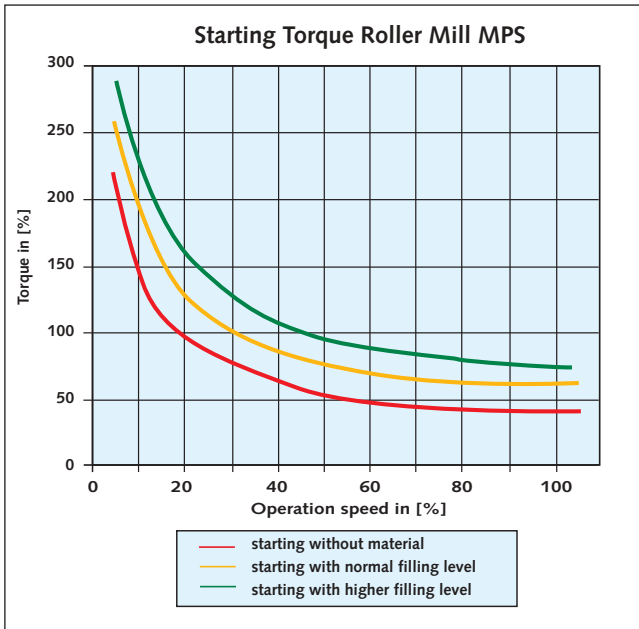
The operating principle of a roller mill is based on 2 to 4 grinding rollers, with shafts carried on hinged arms riding on a horizontal grinding table. The pressure to the rollers is transmitted hydropneumatically. The mills are usually started with lifted rollers. If there should be a plant breakdown, the material to be ground will remain on the grinding table. This case, even with lifted rollers, represents an increased load of the drive and has also to be taken into account when dimensioning the drive system. The required motor output is between 1 MW and 5 MW. **Figure 4** shows the starting torque of a vertical roller mill (MPS) in three different load cases. **Table 4** shows solutions for the start of vertical roller mills.

**Tabelle 2** Startmöglichkeiten für hydraulische Rollenpressen

**Table 2** Starting solutions for hydraulic roller presses

Lösung Solution	Bemerkung Remarks	Netzwerk Network	anwendbar Applicable
Käfigläufer-Motor Direktstart bis zu 400 kW <i>Squirrel-cage motor DOL starting up to 400 kW</i>	Unter beiden Bedingungen möglich, 80 und 100 % der Nennspannung. Überprüfung des Trägheitsmoments <i>Possible under both conditions, 80 and 100 % of the rated voltage. Check moment of inertia</i>	Kein Problem (Bild 18 und 19) <i>No problem (Fig. 18 and 19)</i>	Ja <i>Yes</i>
Käfigläufer-Motor Direktstart über 400 kW <i>Squirrel-cage motor DOL starting above 400 kW</i>	Unter beiden Bedingungen möglich, 80 und 100 % der Nennspannung <i>Possible under both conditions, 80 and 100% of the rated voltage</i>	Obergrenze 1 in Gefahr (Bild 18) <i>Upper limit 1 in danger (Fig. 18)</i>	Teilweise <i>Partly</i>
Käfigläufer-Motor mit Softstarter <i>Squirrel-cage motor with soft starter</i>	Unter beiden Bedingungen möglich, 80 und 100 % der Nennspannung <i>Possible under both conditions, 80 and 100 % of the rated voltage</i>	Bis über 1 MW möglich <i>Possible up to above 1 MW</i>	Ja <i>Yes</i>
Käfigläufer-Motor betrieben mit Frequenzumrichter <i>Squirrel-cage motor operated with frequency converter</i>	Unter beiden Bedingungen möglich, 80 und 100 % der Nennspannung. Ausrüstung dimensionieren für Lastwechsel von 160 % <i>Possible under both conditions, 80 and 100 % of the rated voltage. Equipment must be sized to cover 160 % of load changes</i>	Kein Problem <i>No problem</i>	Ja <i>Yes</i>
Schleifringläufer-Motor <i>Wound-rotor motor</i>	Unter beiden Bedingungen möglich, 80 und 100 % der Nennspannung <i>Possible under both conditions, 80 and 100 % of the rated voltage</i>	Kein Problem <i>No problem</i>	Ja <i>Yes</i>



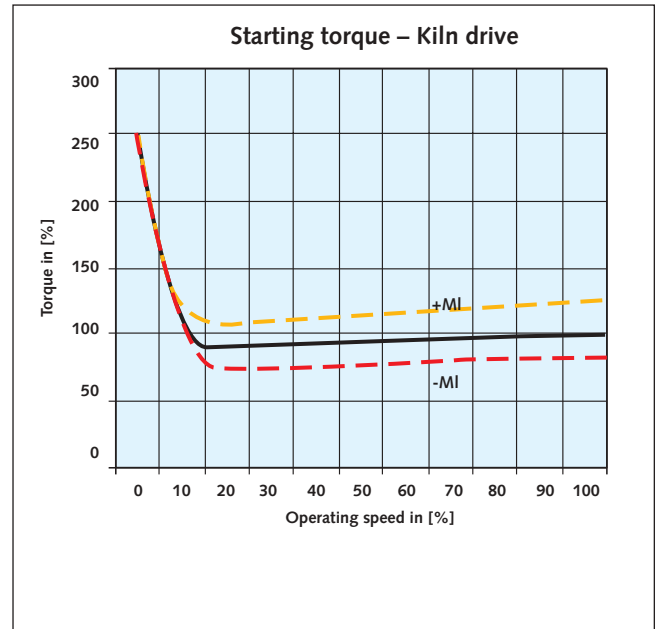


4 Anfahrtdrehmoment einer Vertikalrollenmühle (MPS) in drei verschiedenen Belastungsfällen  
 4 Starting torque of a vertical roller mill (MPS) in three different load cases

Tabelle 4 sind Lösungen für das Starten von Vertikalrollenmühlen zusammengestellt.

### 3.5 Ofen

Der Ofen wird immer mit einem drehzahlvariablen Antrieb für ein konstantes Lastmoment ausgerüstet. Die Anforderungen an das Anfahrtdrehmoment liegen üblicherweise bei 250% des Nenn Drehmoments in den ersten 30 Sekunden. Im oberen Betriebsbereich kann der Antrieb im Feldschwächebereich betrieben werden. Die Überlasten sind von kurzer Dauer. Die erforderliche Motorleistung liegt zwischen 100 kW bis zu 2 x 1000 kW. Bild 5 zeigt das typische Anfahrtdrehmoment eines Ofenantriebes. Lastwechsel in einer Größenordnung von ± 20% können als normal betrachtet werden, so dass Kurve A zwischen +Mi und -Mi schwanken kann. Ein Drehmoment von 250% während der Startphase erfordert eine Überdimensionierung sowohl des Motors als auch des Umrichters. Um der Überdimensionierung von Motor und Umrichter entgegenzuwirken und trotzdem ein 250%iges Drehmoment während der Anfahrphase zu gewährleisten, kann auch eine andere Konfiguration gewählt werden. An Stelle eines vierpoligen Motors kann ein sechspoliger Motor eingesetzt werden, der beim Starten das



5 Anfahrtdrehmoment eines Ofenantriebes  
 5 Starting torque of a kiln drive

### 3.5 Kiln

The kiln will always be equipped with a variable-speed drive for a constant torque load. The starting torque requirements are usually 250% of the rated torque for the first 30 seconds. Field-weakening can be applied in the upper operating range of the drive. The overloads are of short duration. The required motor output is between 100 kW and 2 x 1000 kW. Figure 5 shows the typical starting torque of a kiln drive. Load changes of ± 20% can be regarded as normal so that curve A may oscillate between +Mi and -Mi. A torque of 250% during the starting phase requires an overdimensioning both of the motor and the converter. To counteract overdimensioning of the motor and converter and simultaneously ensuring a torque of 250% during the starting phase, another configuration can be chosen. A six-pole motor can be used instead of a four-pole motor providing the higher torque required during starting. In the upper speed range the motor will operate in the field-weakening range and still provides enough torque.

- Motor:
- four-pole, 596 kW, with a rated torque of 3800 Nm
  - six-pole, 398 kW, with a rated torque of 3800 Nm

Tabelle 3 Startmöglichkeiten für Kugelmühlengantriebe  
 Table 3 Starting solutions for ball mills

Lösung Solution	Bemerkung Remarks	Netzwerk Network	Anwendbar Applicable
Käfigläufer-Motor Direktstart bis zu 400 kW Squirrel-cage motor DOL starting up to 400 kW	Unter beiden Bedingungen möglich, 80 und 100 % der Nennspannung Possible under both conditions, 80 and 100 % of the rated voltage	Kein Problem (Bild 18 und 19) No problem (Fig. 18 and 19)	Ja Yes
Käfigläufer-Motor betrieben mit Frequenzumrichter Squirrel-cage motor operated with frequency converter	Unter beiden Bedingungen möglich, 80 und 100 % der Nennspannung Possible under both conditions, 80 and 100 % of the rated voltage	Kein Problem No problem	Ja Yes
Getriebeloser Mühlengantrieb Gearless mill drive	Unter beiden Bedingungen möglich, 80 und 100 % der Nennspannung Possible under both conditions, 80 and 100 % of the rated voltage	Kein Problem No Problem	Ja Yes
Schleifringläufer-Motor Wound-rotor motor	Unter beiden Bedingungen möglich, 80 und 100 % der Nennspannung Possible under both conditions, 80 and 100 % of the rated voltage	Kein Problem No problem	Ja Yes

erforderliche höhere Drehmoment aufbringt. Im oberen Drehzahlbereich operiert der Motor im Feldschwähebereich, stellt aber dennoch genug Drehmoment zur Verfügung. Beispiel:

- Motor:
- vierpolig, 596 kW, mit einem Nenndrehmoment von 3 800 Nm
  - sechspolig, 398 kW, mit einem Nenndrehmoment von 3 800 Nm
- Umrichter:
- vierpoliger Motor, 596 kW, 618 A
  - sechspoliger Motor, 398 kW, 412 A

In **Tabelle 5** sind Lösungen für das Starten von Ofenantrieben zusammengestellt.

### 3.6 Ventilator

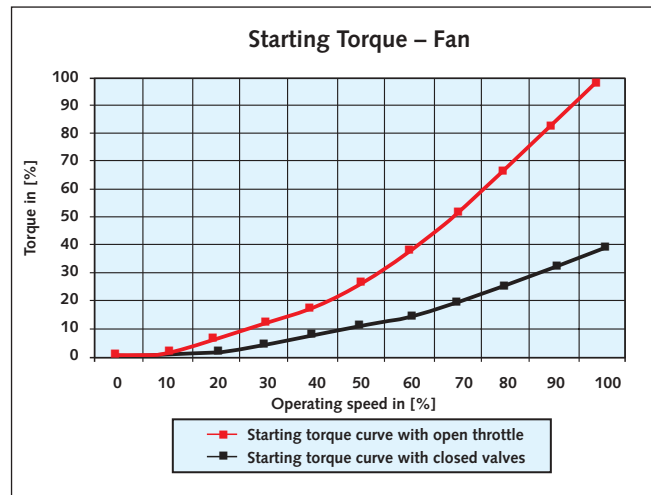
Der Ventilator weist eine quadratische Lastcharakteristik auf und ist üblicherweise mit verstellbaren Drosselklappen ausgerüstet, die beim Anfahren geschlossen bleiben. Auf die Antriebsdimensionierung beim Starten ist der Einfluss des Trägheitsmomentes des Ventilators dominanter als das Lastdrehmoment. Typische erforderliche Motorleistungen liegen zwischen einigen kW bis zu 5 MW. **Bild 6** zeigt das charakteristische Anfahrtdrehmoment eines Ventilators unter quadratischer Last. In **Tabelle 6** sind Lösungen für das Starten von Ventilatoren zusammengestellt.

### 3.7 Förderbänder

Die Förderbandlast ist charakteristischerweise eine konstante Drehmomentlast. Die Anforderungen an das Anfahrtdrehmoment liegen bei bis zu 160 % des Nenndrehmoments. Das Trägheitsmoment ist aufgrund des relativ großen Übersetzungsverhältnisses des Getriebes zwischen Motor und Förderband und des sehr kleinen Durchmessers der Rollen relativ gering. Die erforderlichen Motorleistungen liegen zwischen 2 kW und 3 MW. **Bild 7** zeigt das Anfahrtdrehmoment eines Förderbandes unter den beiden Betriebszuständen: leer und beladen. Wenn das Band einmal in Bewegung und gespannt ist und die maximale Geschwindigkeit erreicht hat, sollte das Drehmoment konstant bleiben. In **Tabelle 7** sind Lösungen für das Starten von Förderbändern zusammengestellt.

### 3.8 Plattenband

Die Plattenbandlast besitzt charakteristischerweise ein konstantes Drehmoment. Plattenbänder laufen auch unter rauen Be-



**6** Anfahrtdrehmoment eines Ventilators (quadratische Last)  
**6** Starting torque of a fan under quadratic load

- Converter:
- four-pole motor, 596 kW, 618 A
  - six-pole motor, 398 kW, 412 A

**Table 5** shows solutions for the start of kiln drives.

### 3.6 Fans

The fan has a quadratic load characteristic and is usually equipped with adjustable throttle valves, which are closed during start-up. The inertia moment of the fan has a greater influence on drive dimensioning than the load torque during starting. Typical motor output requirements are between a few kW up to 5 MW. **Figure 6** shows the typical starting torque of a fan with quadratic load. **Table 6** shows solutions for the start of fans.

### 3.7 Belt conveyors

The load of a belt conveyor is typically a constant torque load. The starting torque requirements are up to 160 % of the rated torque. The inertia load is relatively small due to the relatively large transmission ratio between motor and conveyor belt and the very small diameter of the idlers. The required motor output is between 2 kW and 3 MW. **Figure 7** shows the starting

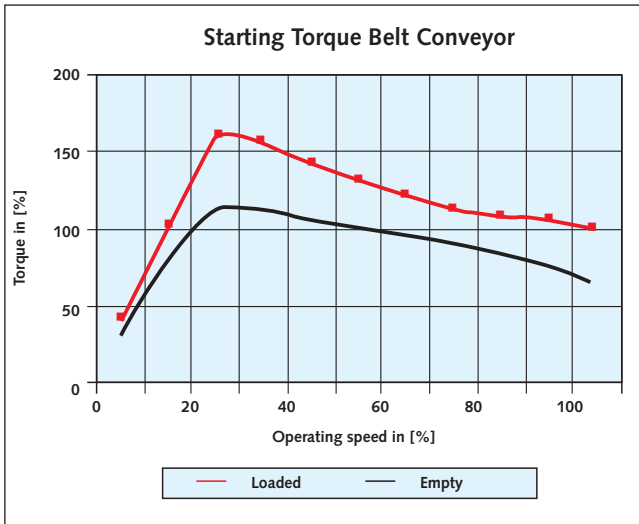
**Tabelle 4** Lösungen für das Starten von Vertikalrollermühlengantrieben  
**Table 4** Starting solutions for vertical roller mill drives

Lösung <i>Solution</i>	Bemerkung <i>Remarks</i>	Netzwerk <i>Network</i>	anwendbar <i>Applicable</i>
Käfigläufer-Motor Direktstart über 400 kW <i>Squirrel-cage motor DOL starting above 400 kW</i>	Praktisch nicht möglich <i>Practically not possible</i>	Obergrenze 1 in Gefahr (Bild 18) <i>Upper limit 1 in danger (Fig. 18)</i>	Teilweise <i>Partly</i>
Käfigläufer-Motor betrieben mit Frequenzumrichter <i>Squirrel-cage motor operated with frequency converter</i>	Unter beiden Bedingungen möglich, 80 und 100 % der Nennspannung <i>Possible under both conditions, 80 and 100 % of the rated voltage</i>	Kein Problem <i>No problem</i>	Ja <i>Yes</i>
Schleifringläufer-Motor <i>Wound-rotor motor</i>	Unter beiden Bedingungen möglich, 80 und 100 % der Nennspannung <i>Possible under both conditions, 80 and 100 % of the rated voltage</i>	Kein Problem <i>No problem</i>	Ja <i>Yes</i>

**Tabelle 5** Lösungen für das Starten von Ofenantrieben  
**Table 5** Starting solutions for kiln drives

Lösung <i>Solution</i>	Bemerkung <i>Remarks</i>	Netzwerk <i>Network</i>	anwendbar <i>Applicable</i>
Käfigläufer-Motor betrieben mit Frequenzumrichter <i>Squirrel-cage motor operated with frequency converter</i>	Antrieb muss drehzahlvariabel sein. Unter beiden Bedingungen möglich, 80 und 100 % der Nennspannung <i>Drive must be variable-speed type. Possible under both conditions, 80 and 100 % of the rated voltage</i>	Kein Problem <i>No problem</i>	Ja <i>Yes</i>



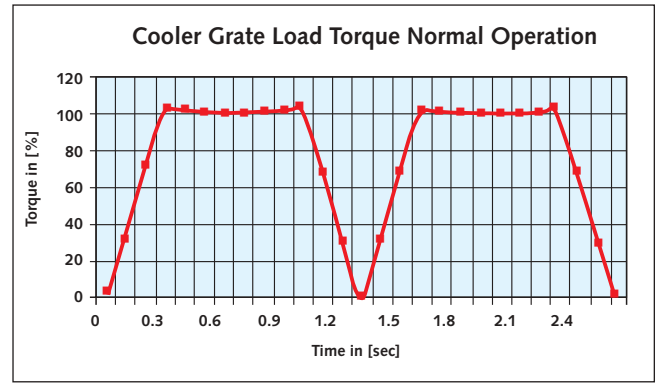


7 Anfahr Drehmoment eines Förderbandes  
7 Starting torque of a belt conveyor

dingungen. Die Reibung kann sehr hoch sein, wodurch entsprechend hohe Drehmomente beim Starten auftreten. Die Anforderungen an das Anfahr Drehmoment liegen bei bis zu 180% des Nenndrehmoments für eine Zeit von 30 Sekunden. Das Trägheitsmoment und der Verlauf des Anfahr Drehmoments verhalten sich ähnlich wie bei den Förderbändern. Typische erforderliche Motorleistungen liegen zwischen 5 und 50 kW. In **Tabelle 8** sind Lösungen für das Starten von Plattenbändern zusammengestellt.

### 3.9 Kühlerrostantriebe

Typische erforderliche Motorleistungen liegen zwischen 5 und 50 kW. **Bild 8** zeigt das Anfahr Drehmoment im Normalbetrieb. Das erste Trapez stellt die Bewegung der Schubrostplattenträger in Vorwärtsrichtung und das zweite in Rückwärtsrichtung dar. In einer Minute erfolgen bis zu 23 Bewegungszyklen. Die Ge-



8 Anfahr Drehmoment eines Kühlerrostantriebs im Normalbetrieb  
8 Starting torque of a cooler grate drive during normal operation

torque of a belt conveyor under the two operating conditions: empty and loaded. Once the belt is moving, tensioned and has reached the maximum speed, the torque should remain constant. **Table 7** shows solutions for the start of belt conveyors.

### 3.8 Apron conveyors

The load of the apron conveyor is typically a constant torque load. Apron conveyors also operate under rough conditions and the friction may be very high which results in high torques during starting. The starting torque requirements are up to 180% of the rated torque for 30 seconds. The inertia moment and the course of the starting torque are similar to that of belt conveyors. Typical motor output requirements are between 5 and 50 kW. **Table 8** shows solutions for the start of apron conveyors.

### 3.9 Cooler grate drives

Typical motor output requirements are between 5 and 50 kW. **Figure 8** shows the starting torque during normal operation. The first trapezium represents the movement of the plate beams

**Tabelle 6** Lösungen für das Starten von Ventilatoren  
**Table 6** Starting solutions for fans

Lösung <i>Solution</i>	Bemerkung <i>Remarks</i>	Netzwerk <i>Network</i>	Anwendbar <i>Applicable</i>
Käfigläufer-Motor Direktstart bis zu 400 kW <i>Squirrel-cage motor DOL starting up to 400 kW</i>	Unter beiden Bedingungen möglich, 80 und 100 % der Nennspannung. Überprüfung des Trägheitsmoments <i>Possible under both conditions, 80 and 100 % of the rated voltage. Check moment of inertia</i>	Kein Problem (Bild 18 und 19) <i>No problem (Fig. 18 and 19)</i>	Ja <i>Yes</i>
Käfigläufer-Motor Direktstart über 400 kW <i>Squirrel-cage motor DOL starting above 400 kW</i>	Unter beiden Bedingungen möglich, 80 und 100 % der Nennspannung <i>Possible under both conditions, 80 and 100 % of the rated voltage</i>	Obergrenze 1 in Gefahr (Bild 18) <i>Upper limit 1 in danger (Fig. 18)</i>	Teilweise <i>Partly</i>
Käfigläufer-Motor mit Softstarter <i>Squirrel-cage motor with soft starter</i>	Möglich, aber Überprüfung des Trägheitsmoments <i>Possible, but check inertia moment</i>	Obergrenze 1 in Gefahr (Bild 18) <i>Upper limit 1 in danger (Fig. 18)</i>	Teilweise <i>Partly</i>
Käfigläufer-Motor betrieben mit Frequenzumrichter <i>Squirrel-cage motor operated with frequency converter</i>	Unter beiden Bedingungen möglich, 80 und 100 % der Nennspannung <i>Possible under both conditions, 80 and 100 % of the rated voltage</i>	Kein Problem <i>No problem</i>	Ja <i>Yes</i>
Schleifringläufer-Motor <i>Wound-rotor motor</i>	Unter beiden Bedingungen möglich, 80 und 100 % der Nennspannung <i>Possible under both conditions, 80 and 100 % of the rated voltage</i>	Kein Problem <i>No problem</i>	Ja <i>Yes</i>
Synchronmotor mit reduzierter Anfahrspannung und Kupplung <i>Synchronous motor with reduced starting voltage and clutch</i>	Unter beiden Bedingungen möglich, 80 und 100 % der Nennspannung <i>Possible under both conditions, 80 and 100 % of the rated voltage</i>	Obergrenze 1 in Gefahr (Bild 18) <i>Upper limit 1 in danger (Fig. 18)</i>	Ja <i>Yes</i>

schwindigkeit des Antriebs ist durch den Drehzahlswert festgelegt, nur die Belastung verändert sich. Bei Überlast erfolgen in einer Minute bis zu 26 Bewegungszyklen mit einem Drehmoment von bis zu 160% des Nenn Drehmoments. Wird ein konstanter Drehzahlantrieb mit einem Käfigläufer-Motor eingesetzt, muss der Motor gewährleisten, dass das maximale Drehmoment, das vom Rostkühler gefordert wird, nur 70 bis 80% des Kippdrehmoments des Motors beträgt. In **Tabelle 9** sind Lösungen für das Starten von Kühlerrostantrieben zusammengestellt.

### 3.10 Pumpen

Die Pumpenantriebslast ist charakteristischerweise eine quadratische Last. Normalerweise sind Pumpen mit einem Ventil ausgestattet. Beim Anfahren der Pumpe ist das Ventil geschlossen. Neuere Installationen werden auch ventilfrei betrieben; hier startet der Antrieb unter einer quadratischen Last. Normalerweise ist das Trägheitsmoment einer Pumpe sehr klein, so dass keine langen Beschleunigungszeiten erwartet werden können. Die erforderlichen Motorleistungen liegen zwischen 1 und 500 kW. In **Tabelle 10** sind Lösungen für das Starten von Pumpenantrieben zusammengestellt.

## 4 Charakteristika verschiedener Motortypen

### 4.1 Kurzschlussläufer

Die allgemeine Drehmoment- und Stromcharakteristik eines Kurzschlussläufer-Motors ist in den **Bildern 9 und 10** dargestellt. Käfigläufer-Motoren sind derart konzipiert, dass sie das Nenn Drehmoment bei Nennfrequenz und bei einer Spannungsversorgung von 95 bis 105% des Nennspannungswertes zur Verfügung stellen können. Dabei variieren das Losbrechmoment sowie das Anlaufdrehmoment in einer quadratischen Funktion zur Spannungsänderung. Das bedeutet, dass hauptsächlich in der Beschleunigungsphase die Veränderung der Motorspannung maßgebliche Auswirkungen in Bezug auf das bereitgestellte Drehmoment hat. Dieser Effekt muss bei der Dimensionierung des Antriebssystems beachtet werden. Besondere Aufmerksamkeit muss der Tatsache geschenkt werden, dass ein relativ hoher Strom für die Anfahrphase zur Verfügung gestellt wird (400–800% des Nennstroms) und dies einen entsprechenden Spannungsabfall im speisenden Netz bewirkt. Daraus leiten sich folgende Konsequenzen ab:

of the reciprocating grate in forward direction, the second one in backward direction. Up to 23 movement cycles are carried out in one minute. The speed of the drive is determined by the set value of the speed, only the load is changing. In case of overload, up to 26 movement cycles are carried out in one minute with a torque of up to 160% of the rated torque. If a constant-speed drive is used with a squirrel-cage motor, the motor has to ensure that the maximum torque required by the grate cooler will amount to only 70 to 80% of the breakdown torque of the motor. **Table 9** shows solutions for the start of cooler grate drives.

### 3.10 Pumps

The load of pump drives is typically a quadratic load. Usually pumps are equipped with a valve. The valve is closed when starting the pump. Modern installations are operating without valve as well. In this case the drive starts with quadratic load. Usually the inertia moment of a pump is very small so that no long acceleration times can be expected. The required motor outputs are between 1 and 500 kW. **Table 10** shows solutions for the start of pump drives.

## 4 Characteristics of various types of motors

### 4.1 Squirrel-cage induction motors

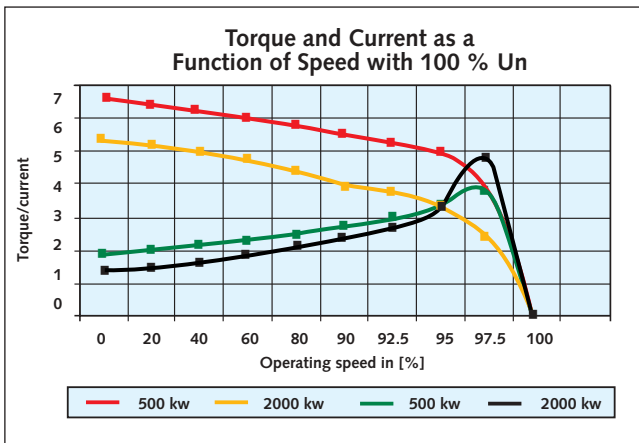
The **Figures 9 and 10** show the general torque and current characteristics of a squirrel-cage motor. Squirrel-cage motors are designed in such a way that they are able to provide the rated torque at rated frequency and with a voltage supply of 95 to 105% of the rated voltage value. The breakaway torque as well as the starting torque vary in a square function of the voltage variation. It means that the variation of the voltage, mainly during the acceleration phase, has decisive effects on the torque provided. This effect has to be taken into account when dimensioning the drive system. Special attention must be paid to the fact that a relatively high current is supplied for the starting phase (400–800% of the rated current) causing a corresponding voltage drop in the feeding network. The following consequences are derived:

- If the feeding network is not strong enough, there will be consequences for other consumers.
- The starting time will be correspondingly longer due to the “torque reduced in the square” provided by the motor. This

**Tabelle 7** Lösungen für das Starten von Förderbändern

**Table 7** Starting solutions for belt conveyors

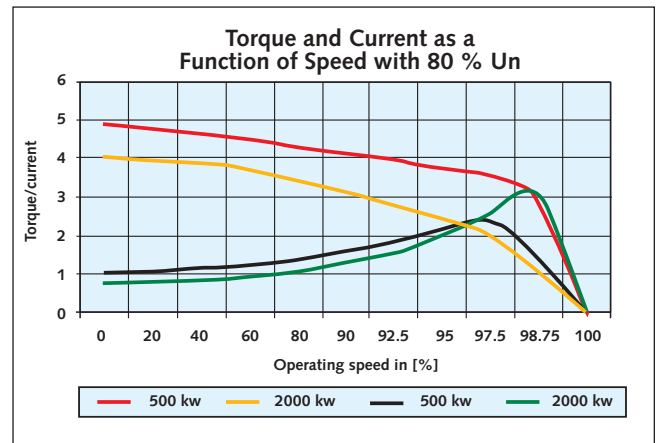
Lösung Solution	Bemerkung Remarks	Netzwerk Network	Anwendbar Applicable
Käfigläufer-Motor Direktstart bis zu 400 kW Squirrel-cage motor DOL starting up to 400 kW	Unter beiden Bedingungen möglich, 80 und 100 % der Nennspannung. Trägheitsmoment klein. Maximales Drehmoment des Förderers muss kleiner als 80 % des Kippmomentes sein Possible under both conditions, 80 and 100 % of the rated voltage. Small moment of inertia. Maximum torque of the conveyor must be smaller than 80 % of the pull-out torque	Kein Problem (Bild 18 und 19) No problem (Fig. 18 and 19)	Ja Yes
Käfigläufer-Motor Direktstart über 400 kW Squirrel-cage motor DOL starting above 400 kW	Unter beiden Bedingungen möglich, 80 und 100 % der Nennspannung. Sonst gleich wie oben Possible under both conditions, 80 and 100 % of the rated voltage. For the rest same as above	Obergrenze 1 und vielleicht Obergrenze 2 ist gefährdet (Bild 18) Upper limit 1 and maybe upper limit 2 is in danger (Fig. 18)	Teilweise Partly
Käfigläufer-Motor betrieben mit Frequenzumrichter Squirrel-cage motor operated with frequency converter	Unter beiden Bedingungen möglich, 80 und 100 % der Nennspannung Possible under both conditions, 80 and 100 % of the rated voltage	Kein Problem No problem	Ja Yes
Schleifringläufer-Motor Wound-rotor motor	Unter beiden Bedingungen möglich, 80 und 100 % der Nennspannung Possible under both conditions, 80 and 100 % of the rated voltage	Kein Problem No problem	Ja Yes



9 Drehmoment und Stromaufnahme eines Käfigläufer-Motors als Funktion der Drehzahl unter idealen Netzbedingungen  
 9 Torque and current consumption of a squirrel-cage motor as a function of speed under ideal network conditions

- Ist das speisende Netz nicht stark genug, hat es Auswirkungen auf andere Verbraucher.
- Aufgrund des „im Quadrat reduzierten Drehmoments“, welches vom Motor bereitgestellt wird, ergibt sich dementsprechend eine größere Anlaufzeit. Das ist insofern gefährlich, als dass sich der Rotor infolge der Schlupfverluste, die im Rotor in Wärme umgesetzt werden, überhitzt. Im Rotor ist jedoch kein Überlastschutz vorhanden.

Bild 9 zeigt Drehmoment und Stromaufnahme als Funktion der Drehzahl beim Aufstarten mit idealen Netzwerkbedingungen. Verglichen werden zwei verschieden große Motoren (ein 500-kW-Motor und ein 2000-kW-Motor). Bild 10 zeigt Drehmoment und Stromaufnahme als Funktion der Drehzahl beim Aufstarten mit 80 % der Netzspannung. Verglichen werden hier ebenfalls ein 500-kW-Motor und ein 2000-kW-Motor. Des Weiteren kann man erkennen, dass infolge der reduzierten Spannung die Drehmomententwicklung des Motors während der Anfahrphase unterhalb von 100 % des Nenn Drehmoments liegt.



10 Drehmoment und Stromaufnahme eines Käfigläufer-Motors als Funktion der Drehzahl mit 80 % der Netzspannung  
 10 Torque and current consumption of a squirrel-cage motor as a function of speed with 80 % of the network voltage

is dangerous in so far as the rotor will be overheated due to slip losses converted into heat in the rotor. However, there is no overload protector in the rotor.

Figure 9 shows the torque and current as a function of speed when starting with ideal network conditions. A comparison is made between two motors of different size (one of 500 kW and the other of 2000 kW). Figure 10 shows the torque and the current as a function of the speed when starting with 80 % of the network voltage. Also in this case, a 500-kW motor and a 2000-kW motor are compared. Furthermore, it can be seen that the torque development of the motor is below 100 % of the rated torque during the starting phase due to the reduced voltage.

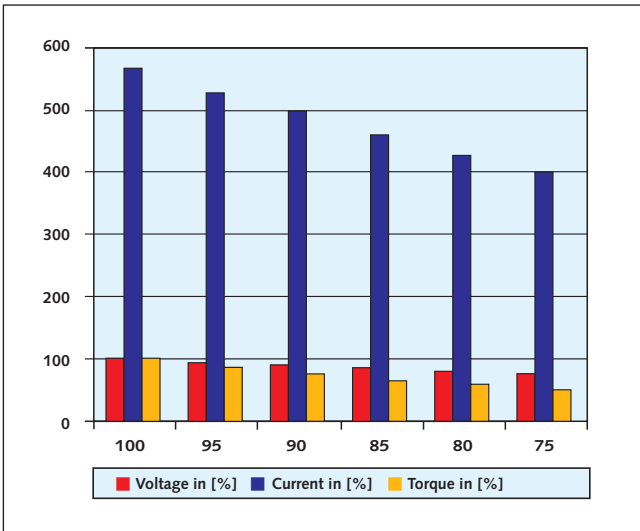
4.1.1 DOL starting of a fan drive – behaviour of the motor  
 Direct on-line starting is a generally common starting procedure. However, the power consumption in larger drives is limited in many respects during DOL starting. Because of this limitation the DOL start cannot be used frequently. The physi-

Tabelle 8 Lösungen für das Starten von Plattenbändern  
 Table 8 Starting solutions for apron conveyors

Lösung Solution	Bemerkung Remarks	Netzwerk Network	Anwendbar Applicable
Käfigläufer-Motor Direktstart Squirrel-cage motor DOL starting	Unter beiden Bedingungen möglich, 80 und 100 % der Nennspannung Possible under both conditions, 80 and 100 % of the rated voltage	Kein Problem (Bild 18 und 19) No problem (Fig. 18 and 19)	Ja Yes
Käfigläufer-Motor betrieben mit Frequenzumrichter Squirrel-cage motor operated with frequency converter	Unter beiden Bedingungen möglich, 80 und 100 % der Nennspannung Possible under both conditions, 80 and 100 % of the rated voltage	Kein Problem No problem	Ja Yes

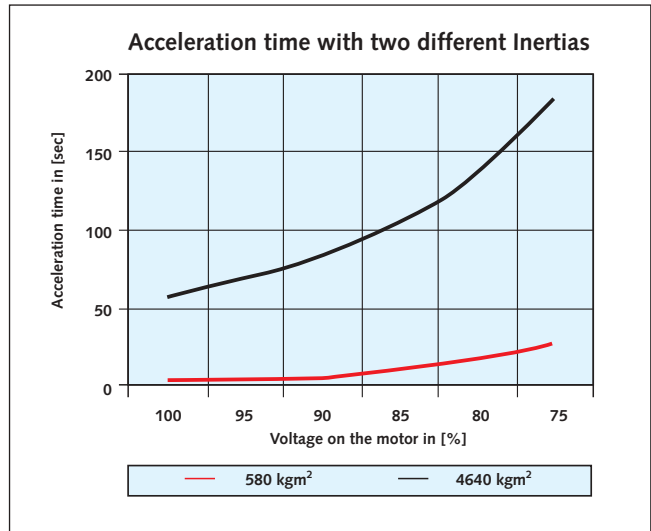
Tabelle 9 Lösungen für das Starten von Kühlerrostantrieben  
 Table 9 Starting solutions for cooler grate drives

Lösung Solution	Bemerkung Remarks	Netzwerk Network	Anwendbar Applicable
Käfigläufer-Motor Direktstart Squirrel-cage motor DOL starting	Unter beiden Bedingungen möglich, 80 und 100 % der Nennspannung. Trägheitsmoment klein. Maximales Drehmoment des Kühlerrostantriebes muss kleiner als 80 % des Kippmomentes sein Possible under both conditions, 80 and 100 % of the rated voltage. Small moment of inertia. Maximum torque of the cooler grate drive must be smaller than 80 % of the pull-out torque	Kein Problem (Bild 18 und 19) No problem (Fig. 18 and 19)	Ja Yes
Käfigläufer-Motor betrieben mit Frequenzumrichter Squirrel-cage motor operated with frequency converter	Unter beiden Bedingungen möglich, 80 und 100 % der Nennspannung. Possible under both conditions, 80 and 100 % of the rated voltage	Kein Problem No problem	Ja Yes



11 Spannung, Strom und Drehmoment eines Käfigläufer-Motors in Abhängigkeit von der Netzspannung (Ventilatorantrieb)  
 11 Voltage, current and torque of a squirrel-cage motor depending on the mains voltage (fan drive)

4.1.1 Direktstart eines Ventilatorantriebs – Verhalten des Motors  
 Der Direktstart ist eine allgemein gängige Anfahrprozedur, wobei in größeren Antrieben die Stromaufnahme beim Direktstart in vielerlei Hinsicht begrenzt ist und aufgrund dieser Begrenzung der Direktstart nicht häufig angewendet werden kann. Der physikalische Hintergrund ist aus den Kurvenverläufen in **Bild 11** abzuleiten. Bild 11 zeigt das physikalische Verhalten des Motors beim Direktstart mit unterschiedlichen Spannungen von 100 bis 75 % der Nennspannung. Wenn die Spannung von 100 auf 75 % herabgesetzt wird, reduziert sich die Stromaufnahme von 550 % auf 400 %. Aber es ist auch erkennbar, dass das verfügbare Drehmoment sich von 100 auf etwa 50 % verringert. Für die Auswirkungen auf den Motor ist es nicht erheblich, inwieweit die eingespeiste Spannung reduziert ist, zum Beispiel durch ein schwaches Netz oder durch eine verminderte Spannung beim Aufstarten mit einem Softstarter. Die Auswirkungen einer reduzierten Spannung haben aber einen entscheidenden Einfluss auf die Anfahrzeit des Motors. Das Anfahrverhalten verschlechtert sich drastisch, wenn das zu startende Trägheitsmoment ebenfalls sehr groß ist (**Bild 12**). Weitere Untersuchungen über die Abnahme des Motordrehmoments, hervorgerufen durch Spannungsabfall, ergeben ein erstaunliches Bild. Alle Berechnungen wurden mit einem 1000-kW-Motor (Nennzahl 1000 UPM) mit einer Ventilatorlast (quadratisch) durchgeführt. Reduziert man die Versorgungsspannung von 100 % auf 75 % mit einem Ventila-

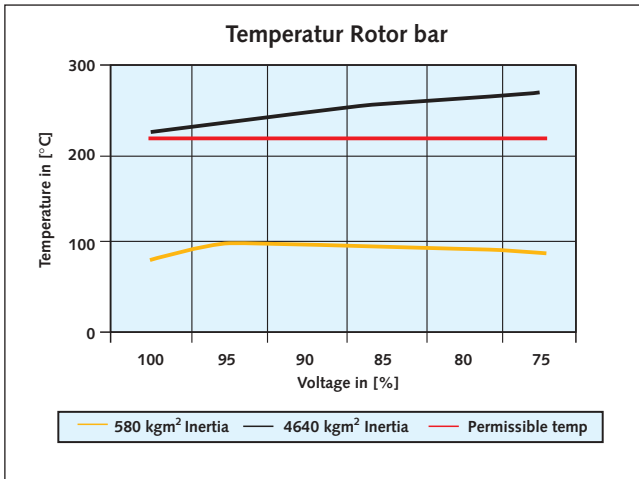


12 Beschleunigungszeit eines Käfigläufer-Motors in Abhängigkeit von der Spannung (für zwei Ventilatoren mit unterschiedlichen Trägheitsmomenten)  
 12 Acceleration time of a squirrel-cage motor depending on the voltage (for two fans with different inertia moments)

cal background is shown in the curves in **Figure 11**. Figure 11 shows the physical behaviour of the motor during DOL start with different voltages ranging from 100 to 75 % of the rated voltage. If the voltage is reduced from 100 to 75 %, the power consumption is reduced from 550 to 400 %. However, it can also be seen that the available torque is reduced from 100 to approximately 50 %. For the effect on the motor itself it does not matter how the feeding voltage is reduced, e.g. by a weak network or a reduced voltage starting using a soft starter. However, the effects of a reduced voltage have a decisive influence on the starting time of the motor. The starting behaviour deteriorates drastically when the inertia moment to be started is also very large (**Fig. 12**). Further investigations into the reduction of the motor torque, caused by the voltage drop, lead to a surprising result. All calculations were made with a motor of 1000 kW (rated speed 1000 rpm) with one fan load (quadratic). If the supply voltage is reduced from 100 % to 75 % with a fan inertia moment of 580 kgm<sup>2</sup>, the acceleration time is increased from 5 to 34 seconds. Fig. 12 shows the relationship between the voltage reduction from 100 % to 75 % with defined inertia moments of 580 kgm<sup>2</sup> and 4 640 kgm<sup>2</sup>. The acceleration time is increased from 55 to 180 seconds if the fan inertia moment is large. With such a long acceleration phase of up to 180 seconds and a current which is 300 to 600 % above the rated current, the rotor will be overheated anyway because all slip losses are converted into heat in the rotor (**Fig. 13**).

**Tabelle 10** Lösungen für das Starten von Pumpenantrieben  
**Table 10** Starting solutions for pump drives

Lösung Solution	Bemerkung Remarks	Netzwerk Network	Anwendbar Applicable
Käfigläufer-Motor Direktstart Squirrel-cage motor DOL starting	Unter beiden Bedingungen möglich, 80 und 100 % der Nennspannung. Possible under both conditions, 80 and 100 % of the rated voltage	Kein Problem (Bild 18 und 19) No problem (Fig. 18 and 19)	Ja Yes
Käfigläufer-Motor mit Softstarter Squirrel-cage motor with soft starter	Möglich, Überprüfung der Anforderungen an das Anfahrerdrehmoment Possible, check starting torque requirements	Kein Problem (Bild 18 und 19) No problem (Fig. 18 and 19)	Ja Yes
Käfigläufer-Motor betrieben mit Frequenzumrichter Squirrel-cage motor operated with frequency converter	Unter beiden Bedingungen möglich, 80 und 100 % der Nennspannung. Possible under both conditions, 80 and 100 % of the rated voltage	Kein Problem No problem	Ja Yes

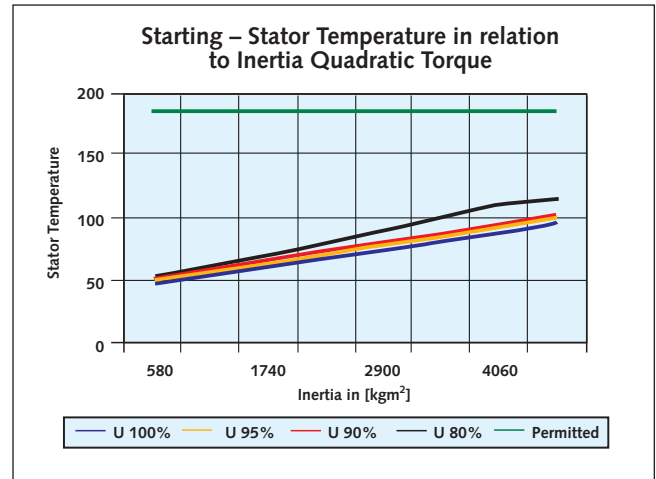


- 13 Rotortemperatur eines Käfigläufer-Motors während des Startens in Abhängigkeit von der Spannung (für zwei Ventilatoren mit unterschiedlichen Trägheitsmomenten)
- 13 Rotor temperature of a squirrel-cage motor during the starting phase as a function of the voltage (for two fans with different inertia moments)

torträgheitsmoment von  $580 \text{ kgm}^2$ , erhöht sich die Beschleunigungszeit von 5 Sekunden auf 34 Sekunden. Bild 12 zeigt den Zusammenhang zwischen der Spannungsreduzierung von 100% auf 75% mit einem definierten Trägheitsmoment von  $580 \text{ kgm}^2$  und  $4640 \text{ kgm}^2$ . Bei großem Ventilatorträgheitsmoment erhöht sich die Beschleunigungszeit von 55 Sekunden auf 180 Sekunden. Bei einer solch langen Beschleunigungsphase von bis zu 180 Sekunden mit einem 300% bis 600% über dem Nennstrom liegenden Strom wird der Rotor auf jeden Fall überhitzt, denn alle Schlupfverluste werden im Rotor in Wärme umgesetzt (**Bild 13**).

Bild 13 zeigt die Rotortemperatur während der Anfahrphase bei unterschiedlichen Trägheitsmomenten mit Berücksichtigung der speisenden Spannung. Die rote Kurve zeigt die erlaubte Temperatur des Rotors. Daraus ist erkennbar, dass die Beschleunigung mit reduzierter Spannung nicht schädigend ist, solange das Trägheitsmoment klein ist. Das kleine Trägheitsmoment bewirkt eine relativ kurze Beschleunigungszeit. Die Temperatur wird in einem Zeitintervall von 34 Sekunden nicht signifikant ansteigen. Der Anfahrstrom ist in beiden Fällen identisch, nur die Trägheitsmomente sind unterschiedlich. Andererseits, bei großem Trägheitsmoment, selbst bei 100% der speisenden Spannung, bleibt die Temperatur niemals innerhalb eines akzeptablen Limits von  $200 \text{ °C}$ . Das bedeutet, dass dieser Bereich für das Anfahren verboten ist, da der Rotor durch zu hohe Temperaturen Schaden nehmen würde. Wie zuvor erwähnt, werden alle Schlupfverluste am Rotor des Motors in Wärme umgesetzt. Aber wie groß sind diese Schlupfverluste wirklich?

Im Falle eines Trägheitsmoments von  $4640 \text{ kgm}^2$  mit einer Spannung von 100% beträgt der Wärmeverlust über  $25 \text{ MWsec}$ . Im Fall von 75% der eingespeisten Spannung beträgt der Wärmeverlust mehr als  $35 \text{ MWsec}$ . Die Energiemenge, die in Wärme umgesetzt wird, ist derart hoch, dass der Rotor einen zweiten Start thermisch nicht aushalten würde. Wie oben ausgeführt, belasten die gesamten Schlupfverluste hauptsächlich den Rotor. Es stellt sich jedoch die Frage, was im Stator passiert. **Bild 14** zeigt die Statortemperatur während des Anfahrens mit



- 14 Statortemperatur eines Käfigläufer-Motors während des Startens in Abhängigkeit vom Trägheitsmoment für verschiedene Spannungen (Ventilatorantrieb)
- 14 Stator temperature of a squirrel-cage motor during starting as a function of the inertia moment for various voltages

Figure 13 shows the rotor temperature during the starting phase with different inertia moments taking into account the feeding voltage. The red curve shows the permissible temperature of the rotor. It can be seen that the acceleration with reduced voltage does no harm as long as the inertia moment remains small. The small inertia moment effects a relatively short acceleration time. The temperature will not rise significantly in a time period of 34 seconds. The starting current is identical in both cases, only the inertia moments are different. On the other hand, the temperature never remains within an acceptable limit of  $200 \text{ °C}$  with a large inertia moment, even with 100% of the feeding voltage. That means, this range is forbidden for starting since the rotor would be damaged by too high temperatures. As already mentioned, all slip losses will be converted into heat in the motor rotor. But how big are these slip losses really?

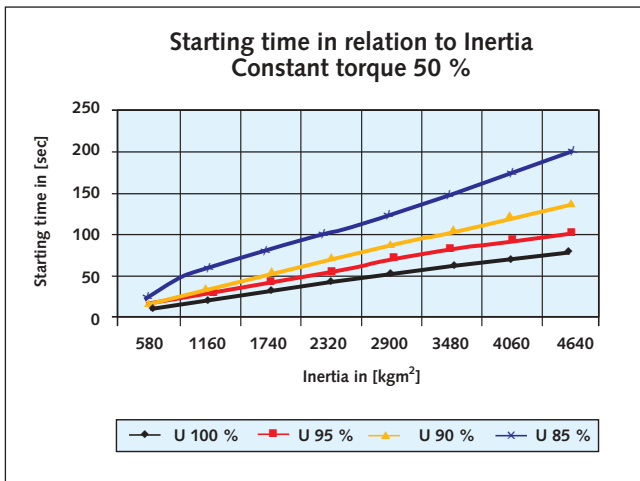
The heat loss amounts to more than  $25 \text{ MWsec}$  with an inertia moment of  $4640 \text{ kgm}^2$  and a voltage of 100%. In case of 75% of feeding voltage, the heat loss amounts to more than  $35 \text{ MWsec}$ . The amount of energy converted into heat is so high that the rotor would not thermally withstand a second start. As already mentioned, all slip losses are mainly loading the rotor. The question is, however, what happens in the stator? **Figure 14** shows the stator temperature during start-up with different inertia moments taking into account the feeding voltage. The bar "Permitted" shows the admissible temperature in the stator windings. It can be seen that the stator is not damaged by the acceleration with reduced voltage, neither due to the inertia moment nor due to a voltage drop of 80%. The conclusion is that the stator is not exposed to the same load as the rotor.

As a rule of thumb the following conclusion can be drawn for the use of fans:

- The acceleration time with DOL starting should not exceed 30 to 50 seconds.
- High moments of inertia cannot be started DOL or with reduced voltage.

4.1.2 Starting at constant torque load and the motor behaviour  
The same physical behaviour as in Figure 11 (quadratic load) can be observed, related to the torque development of a motor





- 15 Beschleunigungszeit eines Käfigläufer-Motors in Abhängigkeit vom Trägheitsmoment für verschiedene Spannungen (Belastung mit konstantem Drehmoment)
- 15 Acceleration time of a squirrel-cage motor depending on the inertia moment for different voltages (load with constant torque)

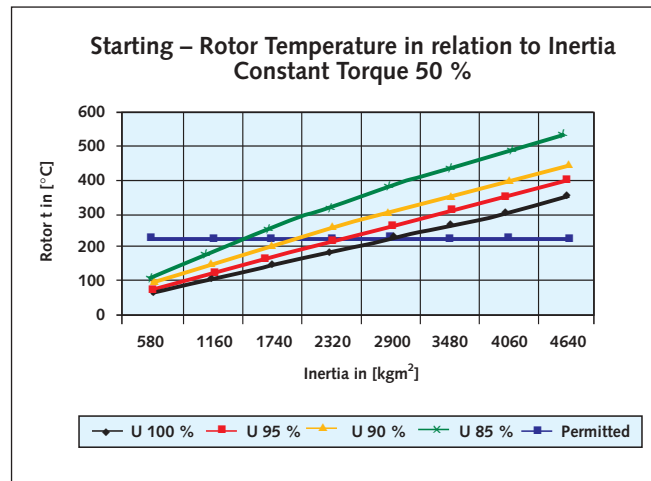
unterschiedlichen Trägheitsmomenten unter Berücksichtigung der speisenden Spannung. Der Verlauf „zulässig“ zeigt die zulässige Temperatur in den Statorwicklungen. Man kann erkennen, dass die Beschleunigung mit einer herabgesetzten Spannung den Stator keineswegs infolge des vorliegenden Trägheitsmoments und keineswegs infolge eines 80%igen Spannungsabfalls schädigt. Daraus lässt sich ableiten, dass der Stator nicht derselben Beanspruchung ausgesetzt ist wie der Rotor.

Schlussfolgernd kann man folgende Faustregel für die Ventilatoranwendung formulieren:

- Die Beschleunigungszeit bei einem Direktstart sollte 30 bis 50 Sekunden nicht überschreiten.
- Hohe Massenträgheitsmomente können nicht direkt gestartet oder mit einer reduzierten Spannung gestartet werden.

#### 4.1.2 Anfahren bei konstanter Drehmomentlast und das Verhalten des Motors

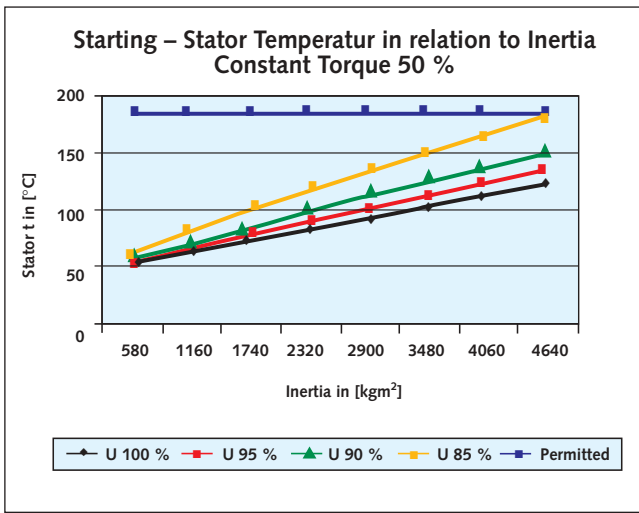
Bezogen auf die Drehmomententwicklung eines Motors, der mit einer konstanten Last unter verschiedenen Netzbedingungen beschleunigt wird, kann das gleiche physikalische Verhalten wie in Bild 11 (quadratische Last) beobachtet werden. In **Bild 15** ist die Situation einer konstanten Drehmomentlast in Bezug auf die Anfahrzeit dargestellt. Es zeigt den Zusammenhang zwischen dem Spannungsabfall von 100 auf 75% mit konstanten Trägheitsmomenten von 580 kgm<sup>2</sup> bis 4640 kgm<sup>2</sup>. Hierbei ist anzumerken, dass die Beschleunigungszeit mit bis zu 200 Sekunden in allen Fällen sehr lang ist. Selbst bei Nennspannung beträgt die Beschleunigungszeit mehr als 80 Sekunden. Die größte Differenz zwischen der Ventilatorbelastung und der konstanten Drehmomentlast kann bei 100%igem Spannungseinsatz festgestellt werden. Die Konfiguration mit der Ventilatorlast wird fast dreimal schneller beschleunigt (Bild 12). Das bedeutet, dass der Dimensionierung mit konstantem Drehmoment mehr Beachtung zukommen muss im Vergleich zur der Dimensionierung der Ventilatorlast. Das Risiko einer falschen Auslegung ist bei konstanter Drehmomentlast wesentlich größer. **Bild 16** zeigt den Temperaturverlauf des Rotors bei unterschiedlich anliegenden Trägheitsmomenten und Spannungen. Bei der Last handelt es sich um eine 50%ige konstante Drehmomentlast. Es geht ganz deutlich



- 16 Rotortemperatur eines Käfigläufer-Motors während des Startens in Abhängigkeit vom Trägheitsmoment für verschiedene Spannungen (Belastung mit konstantem Drehmoment)
- 16 Rotor temperature of squirrel-cage motor during start-up as a function of the inertia moment for different voltages (load with constant torque)

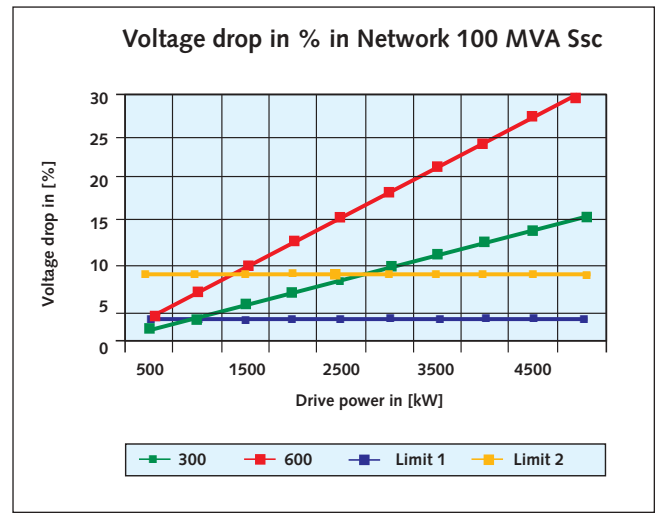
that is accelerated with a constant load under different network conditions. **Figure 15** shows the situation of a constant torque load related to the starting time and the relationship between the voltage drop from 100 to 75% with constant inertia moments of 580 kgm<sup>2</sup> up to 4640 kgm<sup>2</sup>. It should be mentioned that the acceleration time of up to 200 seconds is very long in all cases. Even at rated voltage the acceleration time amounts to more than 80 seconds. The greatest difference between the fan load and the constant torque load can be observed with a voltage application of 100%. The fan torque load configuration gets accelerated almost three times faster (Fig. 12). That means, the dimensioning with constant torque needs more attention than that of the fan load. The risk of a wrong design is much greater with a constant torque load. **Figure 16** shows the temperature development in the rotor with different inertia moments and voltages applied. The load is a constant torque load of 50%. The graph clearly shows the restrictions in terms of usability of this starting method. In the best case, i.e. 100% of the voltage available, the motor can only accelerate up to below 2500 kgm<sup>2</sup> before reaching the permitted maximum temperature. In the worst case, i.e. feeding voltage is only 85% of the rated voltage, the usability of the system amounts to 1200 kgm<sup>2</sup>. The rotor winding temperature could rise to more than 500 °C in the worst case (corresponds to 85% of the rated voltage) and reach approximately 350 °C in the best case (corresponds to 100% of the rated voltage) if the motor would be accelerated regardless of the rotor temperature. Under these circumstances the rotor would most probably not even survive one DOL start with reduced voltage. The problem is that there is no excess temperature monitoring on the rotor, only the stator is equipped with such a system. The question is if the protective system of the stator could also be used for the protection of the rotor, i.e. do both (stator and rotor) have the same thermal time constant? The answer is no, but it is not only the time constant which differs. The greatest difference between rotor and stator, as regards the temperature development, is the fact that the slip losses have a significant effect only on the rotor. The stator is not affected that much by the slip losses. **Figure 17** shows the temperature situation on the stator of the motor. It can be seen that the temperature remains more or less below the admissible value under





- 17 Statortemperatur eines Käfigläufer-Motors während des Startens in Abhängigkeit vom Trägheitsmoment für verschiedene Spannungen (Belastung mit konstantem Drehmoment)
- 17 Stator temperature of a squirrel-cage motor during start-up as a function of the inertia moment for different voltages (load with constant torque)

aus dem Verlauf hervor, welche Einschränkungen in Bezug auf die Nutzbarkeit dieser Anfahrmethode unter diesen Umständen vorliegt. Im günstigsten Fall, das heißt bei 100% der verfügbaren Spannung, kann der Motor nur bis unterhalb von 2500 kgm<sup>2</sup> beschleunigen, bevor die erlaubte maximale Temperatur erreicht wird. Im schlimmsten Fall einer eingespeisten Spannung von nur 85% der Nennspannung beläuft sich die Nutzbarkeit des Systems auf 1200 kgm<sup>2</sup>. Würde der Motor ohne Rücksicht auf die Rotortemperatur beschleunigt werden, könnte die Rotorwicklungstemperatur im ungünstigsten Fall (entspricht 85% der Nennspannung) auf über 500 °C steigen und im günstigsten Fall (entspricht 100% der Nennspannung) etwa 350 °C erreichen. Der Rotor übersteht unter diesen Umständen höchstwahrscheinlich nicht einmal einen Direktstart mit reduzierter Spannung. Das Problem besteht darin, dass es am Rotor keine Übertemperaturüberwachung gibt und nur der Stator damit ausgerüstet ist. Es stellt sich die Frage, ob die Schutzfunktion des Stators auch für den Schutz des Rotors genutzt werden kann, d. h., besitzen beide – Stator und Rotor – die gleiche thermische Zeitkonstante? Diese Frage muss mit nein beantwortet werden, aber es ist nicht nur die Zeitkonstante die sich unterscheidet. Der größte Unterschied zwischen Rotor und Stator in Bezug auf die Temperaturentwicklung liegt in der Tatsache begründet, dass sich die Schlupfverluste nur im Rotor signifikant auswirken. Der Stator ist nicht in gleicher Weise von den Schlupfverlusten betroffen. **Bild 17** zeigt die Temperatursituation am Stator des Motors. Hierbei ist zu beachten, dass die Temperatur unter allen Bedingungen mehr oder weniger unterhalb der zulässigen Temperatur bleibt. Wichtig ist die Erkenntnis, dass für den Start immer der kalte Zustand betrachtet wird. Im Fall eines bereits erwärmten Zustandes, beispielsweise nach einem zweiten Start, wären die Bedingungen anders, also noch ungünstiger. Die gleiche Aussage ist auch für den Rotor gültig. Aus dem Vergleich der Statortemperatur nach dem Anfahren mit der Ventilatorcharakteristik kann geschlossen werden, dass die maximalen Temperaturen in beiden Applikationen um fast 100 °C differieren oder dass die Temperatur des Stators bei der Beschleunigung einer konstanten



- 18 Spannungsabfall in Abhängigkeit von der Antriebsleistung bei Startströmen von 300% sowie 600% des Motornennstroms für ein Netz mit 100 MVA Kurzschlussleistung
- 18 Voltage drop as a function of the drive power with starting currents of 300% and 600% of the rated current of the motor for a network with a short-circuit capacity of 100 MVA

all conditions. It is important to recognize that always the cold condition is considered for starting. In case of an already heated state, e.g. after a second start, the conditions would be different, i.e. even more unfavourable. The same applies to the rotor. Based on the comparison between the stator temperature after starting and the fan characteristics, the conclusion can be drawn that the maximum temperatures in both applications have a difference of almost 100 °C, or that the temperature of the stator nearly reaches double the value in case of acceleration with constant torque load. The fact that the rotor temperature is not congruent with the stator temperature and that the rotor temperature cannot be measured by means of a PT 100 or PTC means that the rotor is not protected at all. These facts require a first-class design of the motor in the planning phase which, in most cases, will lead to an extreme overdimensioning of the motor for DOL starting or reduced voltage start with a soft starter. Summarizing, the following rule of thumb can be derived for a constant torque application: high torque loads cannot be started DOL or with reduced voltage.

#### 4.2 Wound-rotor induction motor

The starting torque of a wound-rotor induction motor can be defined well in fine steps or continuously without steps. The slip energy is not converted into heat in the rotor as with the squirrel-cage motor but outside the motor in the starting resistor of the rotor (starter). There is basically no difference in the design of a stator of a wound-rotor induction motor compared to that of a squirrel-cage motor. Only the rotor design is different. The rotor has a three-phase winding with the same number of poles as the stator. One side of the free ends is usually connected to star, and the other side of the free ends is connected to the slip rings. The starting current and the torque available on the motor can be determined by varying the rotor resistance by means of the rotor starting resistor. The current received from the network depends on the dimensioning of the starting resistor in all starting stages, it is around the rated current and has the same shape as the torque. The power drawn from the network also depends on the starter design in all starting stages. At the begin-

Drehmomentlast nahezu den doppelten Wert erreicht. Die Tatsache, dass die Rotortemperatur kein kongruentes Bild mit der Statortemperatur abgibt und dass die Rotortemperatur nicht mittels eines PT 100 oder PTC gemessen werden kann, bedeutet, dass der Rotor überhaupt nicht geschützt ist. Diese Fakten verlangen nach einer erstklassigen Auslegung des Motors in der Planungsphase, welche in den meisten Fällen zur extremen Überdimensionierung des Motors für den Fall eines Direktstarts oder eines reduzierten Spannungsstarts mit einem Softstarter führt. Zusammenfassend kann hier folgende Faustregel für eine konstante Drehmomentanwendung abgeleitet werden: Hohe Drehmomentlasten können nicht im Direktstart oder mit einer reduzierten Spannung angefahren werden.

#### 4.2 Schleifringläufermotor

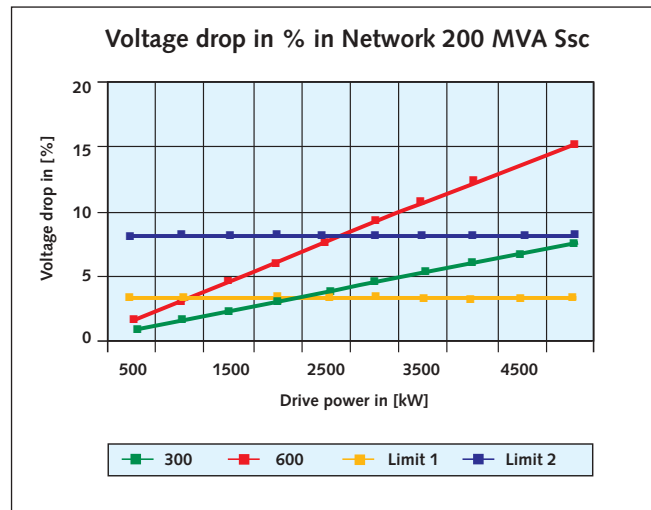
Beim Einsatz eines Schleifringmotors kann das Anfahr Drehmoment gut in feinen Stufen oder stufenlos definiert werden. Die Schlupfenergie wird nicht wie beim Käfigläufermotor im Rotor in Wärme umgesetzt, sondern außerhalb des Motors im Rotor-Anlasswiderstand (Starter). Der Aufbau des Stators eines Schleifringläufermotors ist grundsätzlich nicht anders als bei einem Käfigläufer-Motor, nur der Rotoraufbau ist unterschiedlich. Der Rotor hat eine Dreiphasenwicklung mit der gleichen Polzahl wie der Stator. Eine Seite der freien Enden wird üblicherweise im Stern geschaltet und die andere Seite der freien Enden wird mit den Schleifringen verbunden. Durch Verändern der Rotorwiderstände, mittels des Rotor-Anfahrwiderstandes, können der Anfahrstrom und das am Motor verfügbare Drehmoment bestimmt werden. Der aus dem Netz bezogene Strom hängt in allen Anfahrstufen von der Dimensionierung des Starters ab, liegt ungefähr bei Nennstrom und weist denselben Verlauf wie das Drehmoment auf. Die aus dem Netz gezogene Leistung hängt bei allen Anfahrstufen auch von der Starterauslegung ab, wobei zu Beginn der Anfahrphase der größte Teil der Energie im Starter anfällt. Die im Starter anfallende Energie fällt linear zur Geschwindigkeitserhöhung des Motors ab. Wenn der Motor seine Maximalgeschwindigkeit erreicht hat, beträgt die Schlupfleistung nahezu null.

#### 5 Netzverhalten während des Starts

Einer der limitierenden Faktoren, um ein großes Antriebssystem direkt zu starten, liegt im Verhalten des speisenden Netzes. In einem starken Netz können relativ große Motoren gestartet werden. Das Netzverhalten im Anfahrprozess hängt von seiner Kurzschlussleistung ab. Ein starkes Netz weist eine relativ hohe Kurzschlussleistung auf. Es ist wichtig festzulegen, wo die Auswirkungen der Starteinflüsse gemessen werden. Üblicherweise erfolgt dies an den 4,16- und 6,3-kV-Speisesammelschienen. Die Kurzschlussleistung dieser Speisesammelschienen liegt normalerweise im Bereich von 100 MVA. Der zulässige Spannungsabfall während eines Standardstarts liegt bei 3%, kann aber auch in Sonderfällen bis zu 8% betragen. Bis zu welcher Antriebsgröße kann ein Direktstart realisiert werden?

##### 5.1 Starten an einem Netz mit 100 MVA Kurzschlussleistung

**Bild 18** zeigt den Zusammenhang zwischen der Antriebsleistung und dem Spannungsabfall bei Startströmen von 300% und 600% des Motornennstroms für ein Netz mit 100 MVA Kurzschlussleistung. Bei einem Anfahrstrom von 300% liegt die Begrenzung bei über 3000 kW und mit 600% Anfahrstrom liegt die Begrenzung bei über 1500 kW, wobei als zulässige Grenze 8% Spannungsabfall berücksichtigt wurde.



19 Spannungsabfall in Abhängigkeit der Antriebsleistung bei Startströmen von 300% sowie 600% des Motornennstroms für ein Netz mit 200 MVA Kurzschlussleistung

19 Voltage drop as a function of the drive power with starting currents of 300% and 600% of the rated current of the motor for a network with a short-circuit capacity of 200 MVA

ning of the starting phase, the biggest part of the power is present in the starter. The power in the starter is decreased linearly to the speed increase of the motor. When the motor has reached its maximum speed, the slip power is almost zero.

#### 5 Network behaviour during starting

One of the limiting factors to start a large drive system DOL is the behaviour of the feeding network. Relatively big motors can be started in a strong network. The behaviour of the network during start-up depends on its short-circuit capacity. A strong network has a relatively high short-circuit capacity. It is important to define where the effects of the starting influences will be measured. Usually it takes place on the 4.16 and 6.3 kV feeder buses. The short-circuit capacity of these buses is usually around 100 MVA. The admissible voltage drop amounts to 3% during a standard start. In special cases, however, it may amount to 8%. Up to which drive size is DOL starting possible?

##### 5.1 Starting on a network with a short-circuit capacity of 100 MVA

**Figure 18** shows the relationship between the drive power and the voltage drop with starting currents of 300% and 600% of the rated current of the motor for a network with a short-circuit capacity of 100 MVA. With a starting current of 300% the limitation is above 3000 kW, and with a starting current of 600% the limitation is above 1500 kW taking into account a voltage drop of 8% as admissible limit.

##### 5.2 Starting on a network with a short-circuit capacity of 200 MVA

**Figure 19** shows the same situation as described under 5.1 but for a network with a short-circuit capacity of 200 MVA. With a starting current of 300% the limitation is above 5000 kW and with 600% above 2500 kW. Also in this case a voltage drop of 8% was taken into account as admissible limit. This clearly shows that the short-circuit level of the network plays an important role.

## 5.2 Starten an einem Netz mit 200 MVA Kurzschlussleistung

**Bild 19** zeigt dieselbe Situation wie unter 5.1 beschrieben, aber für ein Netz mit 200 MVA Kurzschlussleistung. Bei einem Anfahrstrom von 300% liegt die Begrenzung bei über 5 000 kW und mit 600% Anfahrstrom liegt die Begrenzung bei über 2 500 kW, wobei auch hier als zulässige Grenze 8% Spannungsabfall berücksichtigt wurde. Aus diesem Bild ist deutlich erkennbar, dass das Kurzschluss-Niveau des Netzes eine wichtige Rolle spielt.

## 6. Start mit Frequenzumrichter

Das Anfahrverhalten mit einem Frequenzumrichter unterscheidet sich in allen physikalischen Aspekten im Vergleich zu den oben beschriebenen Anfahrmethoden. Der signifikanteste Unterschied liegt im Anfahrstrom, der aus dem Netz bezogen wird. Bei einem Direktstart ist der Anfahrstrom des Motors, welcher das Netz belastet, in allen Fällen ein Vielfaches des Nennstromes und das Drehmoment ist ein Bruchteil des Motornennmomentes. Die Anfahrmethode mit Frequenzumrichter unterscheidet sich grundsätzlich von den anderen Methoden. Das vom Motor abgegebene Drehmoment ist über den gesamten Betriebsbereich das volle Drehmoment; der vom Netz bezogene Anfahrstrom beträgt je nach Betriebspunkt aber nur einen Bruchteil des Nennstromes. Infolge der gleichzeitigen kontinuierlichen Regelung von Frequenz und Spannung liegt der Betriebspunkt des Antriebs immer an der optimalen Stelle. Es entstehen keine Anfahr-Schlupfverlustleistungen wie beim Direktstart oder beim Start eines Schleifringmotors, bei welchem die Schlupfverluste im Rotor-Anlasswiderstand in Wärme umgesetzt werden. Folglich ist das volle Drehmoment jederzeit in allen Betriebspunkten verfügbar.

### 6.1 Funktion des Frequenzumrichters

Die Frequenz eines Motors verändert sich generell linear mit der Spannung. Das Drehfeld des Motors und mit ihm der magnetische Fluss wird sich in seinem Optimum gemäß der Formel verhalten:

$$M = \phi \cdot I$$

$I$  = Motorstrom  
 $M$  = Drehmoment des Motors  
 $\phi$  = magnetischer Fluss des Motors

**Motor:** Die Frequenz-/Spannungswechsel verursachen eine Parallelverschiebung der Drehmomentverläufe auf der Frequenzachse (Drehzahl). Das bedeutet, dass der Motor immer im optimalen Arbeitspunkt betrieben wird.

**Netz:** Der Frequenzumrichter besteht aus einer Gleichrichterbrücke am Eingang (Netzseite) des Umrichters. Die Wechselspannung wird in dieser Brücke zu einer Gleichspannung umgewandelt. Dem Gleichrichter nachgeschaltet ist eine Kondensatorbank. Diese Kondensatorbank agiert als Energiezwischenspeicher. Der nachgeschaltete Inverter formt die aus der Kondensatorbank bezogene Gleichspannung in eine Wechselspannung mit variabler Frequenz um, mit welcher der Motor gespeist wird. Das physikalische Verhalten der Eingangsbrücke in Bezug auf den Leistungsfaktor zum Netzwerk beträgt 0,95. Das bedeutet, dass ungefähr dieselbe Energiemenge, die der Motor für den Betrieb benötigt, auch aus dem Netzwerk entnommen wird.

## 6 Starting with frequency converter

When using a frequency converter, the starting behaviour is different in all physical aspects compared to the above-mentioned starting methods. The most significant difference is the starting current received from the network. During DOL starts the starting current of the motor loading the network is always a multiple of the rated current, and the torque is a fractional part of the rated motor torque. The starting method with frequency converter is completely different compared to other methods. The torque delivered by the motor is the full torque over the whole operating range. However, the starting current received from the network is only a fractional part of the rated current depending on the working point. Due to the simultaneous, continuous control of both frequency and voltage, the working point of the drive is always in optimum position. There is no starting slip dissipation like in DOL starting or the start of a wound-rotor motor where the slip losses are converted into heat in the starting resistor of the rotor. Consequently, the full torque is available in all working points.

### 6.1 Function of the frequency converter

The motor frequency is generally changed linearly with the voltage. The rotating field of the motor and the magnetic flux will behave in their optimum according to the formula:

$$M = \phi \cdot I$$

$I$  = motor current  
 $M$  = motor torque  
 $\phi$  = magnetic motor flux

**Motor:** The frequency/voltage changes cause a parallel shifting of the torque curves on the frequency axis (speed). It means that the motor is always run in its optimum working point.

**Network:** The frequency converter consists of a rectifier bridge at the input (network side) of the converter. The a.c. voltage is rectified to d.c. voltage in this bridge. A capacitor bank follows the rectifier. This capacitor bank is used for intermediate energy storage. The following inverter converts the d.c. voltage received from the capacitor bank into an a.c. voltage with variable frequency for motor feeding. The physical behaviour of the input bridge, related to the power factor to the network, is 0.95. It means that almost the same amount of energy the motor is demanding for operation will be taken out of the network.

### 6.2 Physical characteristics of the frequency converter

The motor output is a linear function to the speed, provided the torque load is constant.

It follows that:

$$P(\text{kW}) = \frac{T(\text{NM}) \cdot n(\text{rpm})}{9550}$$

$P$  = Power  
 $T$  = Torque  
 $N$  = Speed

$$T(\text{NM}) = 9550 \cdot \frac{P(\text{kW})}{n(\text{rpm})}$$

The Figures 18 and 19 show the influence of the network voltage drop as a function of the power applied during the acceleration phase. Since the starting current with frequency converter

## 6.2 Physikalische Charakteristika des Frequenzumrichter

Vorausgesetzt, die Drehmomentlast ist konstant, steht die Motorleistung im linearen Verhältnis zur Drehzahl.

Daraus folgt:

$$P(\text{kW}) = \frac{T(\text{NM}) \cdot n(\text{rpm})}{9550}$$

P = Leistung

T = Drehmoment

N = Drehzahl

$$T(\text{NM}) = 9550 \cdot \frac{P(\text{kW})}{n(\text{rpm})}$$

In den Bildern 18 und 19 ist der Einfluss des Abfalls der Netzspannung in Abhängigkeit zur aufgewendeten Leistung während der Beschleunigungsphase dargestellt. Da mit Frequenzumrichter der Anfahrstrom kleiner als der Nennstrom ist, liegt der Spannungsabfall an der Verteilschiene für die gleiche Motorleistung deutlich niedriger als beim Direktstart. Mit einem Spannungsabfall, der typischerweise unter 1 % liegt, zeigt sich ein sehr deutlicher Vorteil gegenüber allen anderen Anfahrmethoden.

## 7 Zusammenfassung

In diesem Artikel wurde aufgezeigt, wie die zehn wichtigsten Anwendungen der Zementindustrie am besten gestartet werden können. Es wurde darauf eingegangen, welche Anforderungen für unterschiedliche Anwendungen notwendig sind und was die besten Lösungen sind. Es hat sich gezeigt, dass reduzierende Startmethoden mit Softstartern, die in letzter Zeit aufgekommen sind, nur für wenige der Anwendungen sinnvoll sind. Auf der anderen Seite konnte auch festgestellt werden, dass die Anwendung von drehzahlvariablen Antrieben in fast allen Anwendungsfällen eine gute Lösung in vielerlei Hinsicht ist, einschließlich des Aspekts der Netzwerkbedingungen beim Start von schweren Lasten mit großem Trägheitsmoment. Letztlich soll der Beitrag einen guten Leitfaden geben, welches Antriebssystem für welche Anwendung beim Startprozess geeignet ist.

is smaller than the rated current, the voltage drop on the bus for the same motor output is clearly lower than during DOL starting. There is a very clear advantage over all other starting methods with a voltage drop of typically less than 1 %.

## 7 Conclusion

It has been described in this paper how the ten most important applications of the cement industry can best be started. Furthermore, it was shown what are the requirements for the different applications and what are the best solutions. It turned out that reducing starting methods with soft starters, which recently came into being, are only reasonable for a few applications. On the other hand it was shown that the use of variable-speed drives is a good solution in many respects for almost all applications also taking into account the aspects of the network conditions during the start of heavy loads with a large inertia moment. Finally this article should be used as a good guideline to select the proper drive system for the corresponding application during the starting procedure.





**ABB Switzerland Ltd**

CH-5405 Baden 5 Dättwil  
Switzerland

Phone +41 58 586 8444

Fax +41 58 586 7333

E-Mail [process.industries@ch.abb.com](mailto:process.industries@ch.abb.com)

[www.abb.com/cement](http://www.abb.com/cement)