

# Von Forschungsergebnissen zum industriellen Produkt

>> Hohe Drehzahlen von 200 000 U/min bis zum Weltrekord von 1 Million U/min erlauben, in diversen Anwendungen wie Turbokompressoren, Medizinalbohrern, optischen Systemen und Materialbearbeitungsspindeln, Baugröße, Gewicht und Verluste einzusparen. In 2006 berichtete der SMM erstmals über das damals junge Forschungsprojekt am Power Electronic Systems Laboratory der ETH Zürich. Mittlerweile ist daraus die Spin-off-Firma Celeroton entstanden, welche die Technologie in industrielle Produkte umsetzt.

Früher war das Erreichen hoher Drehzahlen stark limitiert. Höchste Drehzahlen wurden nur aus Labors von Universitäten gemeldet, so zum Beispiel die schnell rotierende Kugel von Jesse Beams. In 2006 wurden im damals zwei Jahre dauernden Forschungsprojekt der ETH Zürich die ersten Resultate erzielt: Ein hochdrehendes elektrisches Antriebssystem, bestehend aus Motor und Umrichter mit einer halben Million Umdrehungen pro Minute (U/min), das ausgelegt war, um Anwendungen wie Kompressoren oder Bohrer anzutreiben. In der Zwischenzeit hat sich einiges getan. So wurde im Forschungsprojekt der eigene Weltrekord im Jahr 2008 gleich auf eine Million U/min verdoppelt. Zudem wurde im August des gleichen Jahres die Spin-off-Firma Celeroton gegründet,

die direkteste Art, Forschungsergebnisse in die Industrie umzusetzen. Bereits im ersten Jahr nach der Gründung wurde der Umrichter CC-75-500 lanciert und Motoren von Celeroton in Kompressoren und Medizinalgeräten bei Kunden getestet. Mittlerweile wurde das Produktportfolio um zwei Standardmotoren, zwei weitere Umrichter und zwei hochkompakte, hochdrehende Turbokompressoren erweitert.

## Bedarf nach Kompaktheit, Gewichtsreduktion und Effizienz

Der anhaltende Trend zu immer kompakteren, leichteren und effizienteren Geräten und Anwendungen in industriellen High-tech-Anwendungen, Medizintechnik und

Haushaltsgeräten wirkt sich auch auf die elektrische Antriebstechnik aus. So benötigen kleinste Turboverdichter für die Brennstoffzellenbelüftung, Kompressoren für dezentrale, kompakte und effiziente Wärmepumpen und Klimaanlage, Bohrspindeln für die Materialbearbeitung oder Medizintechnik und schnelldrehende, optische Spiegel immer kleinere, effizientere elektrische Antriebe mit hohen Drehzahlen. Die Leistung eines Elektromotors ist ungefähr proportional zur Baugröße, welche das Drehmoment definiert, und der Drehzahl. Entsprechend kann mit einer Drehzahlsteigerung die gleiche Leistung viel kompakter realisiert werden.

## Drehzahlen bis eine Million U/min

Bisher waren typische elektrische Antriebe auf ein paar Zehntausend U/min begrenzt, spezielle elektrische Antriebselemente sind erhältlich bis maximal zirka 250 000 U/min. Durch neue Technologien können diese



Bild: Celeroton

*Mikro-Materialbearbeitungsspindel (180'000 U/min/150 W) angetrieben durch einen Motor von Celeroton zusammen mit einer Elektronik CC-75-400. Die Spindel wurde in Zusammenarbeit mit der Firma DAIYA SEIKI realisiert.*

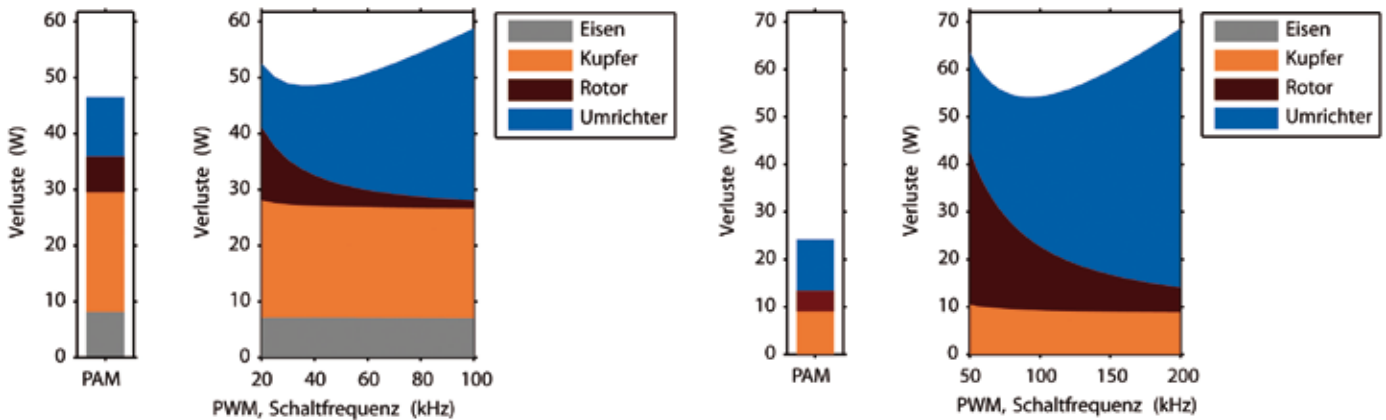


Bild: Celeroton

Verluste in einem Antriebssystem mit 100 000 U/min und 30 mNm mit einem genuteten Stator (links) und einer Luftspaltwicklung (rechts) als Funktion der Modulationsart und -frequenz des Umrichters.

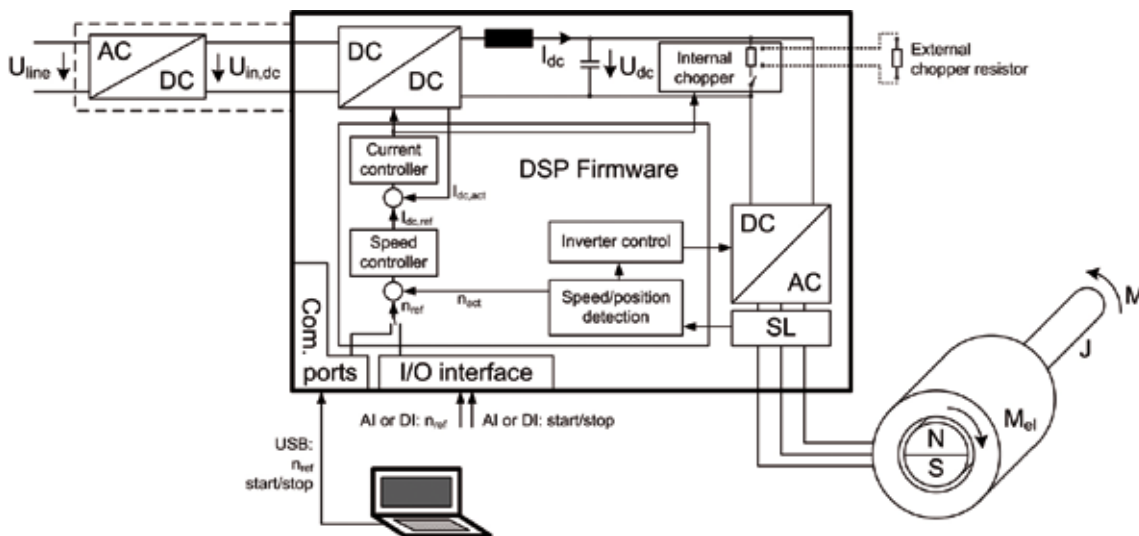


Bild: Celeroton

PAM-Umrichter mit variablem Zwischenkreis, sensorloser Drehzahlregelung, diversen Ansteuer-Schnittstellen und je nach Ausführung mit DC- oder AC-Spannungsversorgung, internem oder externem Bremswiderstand.

Limiten allerdings gesprengt und Drehzahlen von bis zu einer Million U/min erreicht werden. Dies erlaubt, Anwendungen um Faktoren kleiner zu bauen als bisher, noch kleinere Strukturen noch produktiver zu bearbeiten und bisherige Turbinenantriebe durch elektrische Antriebe zu ersetzen und damit die Effizienz zu steigern.

Die Herausforderungen in der Auslegung und dem Aufbau solcher hochdrehender Antriebssysteme sind vielfältig und vor allem interdisziplinär. Eine Abstimmung der Technologiebereiche Mechanik, Elektromagnetismus, Leistungs- und Signalelektronik, digitale Regelung und Software ist unabdingbar. Auch muss die Anwendung in der Auslegung eines hochdrehenden Antriebssystems mitberücksichtigt werden, da sie beispielsweise die Rotordynamik oder die thermische Auslegung stark beeinflusst.

### Mechanische Auslegung u. Reduktion der HF-Motor-Verluste

Die zwei hauptsächlichen Herausforderungen auf Seite des elektrischen Motors sind

eine mechanische Rotorkonstruktion, welche den extremen Zentrifugalkräften widersteht und tiefe Vibrationen im Betrieb aufweist sowie die Reduktion der mit höheren Drehzahlen zunehmenden Verluste im Motor. Für diese Herausforderungen kommen folgende Lösungen zum Zug:

- Ein Permanentmagnet-Synchronmotor (PMSM), in leicht anderer Ausführung oder Betriebsweise, auch BLDC- oder EC-Motor genannt, garantiert höchste Wirkungsgrade. Dank der hochkompakten Bauweise reduzieren sich die Kosten für die Permanentmagnete signifikant, ein angenehmer Nebeneffekt der hohen Drehzahlen.
- Durch eine geometrisch und mechanisch einfache Rotorkonstruktion sowie einer Metallbandage können die mechanischen Belastungen in brüchigen Permanentmagneten limitiert werden.
- Eine Rotordynamikanalyse und hochgenaues Wuchten garantieren auch bei höchsten Drehzahlen den sicheren Betrieb mit tiefen Vibrationen.
- Eine Luftspaltwicklung sowie dünne

Kupferdrähte und Eisenbleche reduzieren die Wirbelstromverluste, die andernfalls quadratisch mit der Drehzahl ansteigen.

- Durch eine Multiparameter-Optimierung, welche alle Verluste, inklusive Luftreibungsverluste und Wirbelstromverluste in Stator und Rotor, miteinbezieht, können auch bei Drehzahlen zwischen 200 000 U/min und 1 000 000 U/min Motorwirkungsgrade von über 90% erreicht werden.

### Abstimmung des Umrichters auf den Motor

Motoren für hohe Drehzahlen und/oder Motoren mit Luftspaltwicklungen weisen tiefe Induktivitätswerte auf. Dies führt bei Standardumrichtern zu Problemen. Entweder muss die Schaltfrequenz sehr hoch gewählt werden, was zu hohen Verlusten in der Leistungselektronik und daher einem tiefen Wirkungsgrad und einem grossen Kühlkörper führt, oder es muss ein AC-Filter zwischen Maschine und Umrichter geschal-

## Fragen an Dr. Christof Zwyszig, Geschäftsführer der Celeroton AG

**SMM: Können Sie für unsere Leser kurz zusammenfassen, worin die Innovation Ihrer Technologie besteht?**

**Dr. Christof Zwyszig:** Die Innovation unserer Technologie besteht in der interdisziplinären Auslegung des Antriebssystems. Um ein paar Beispiele zu nennen: Der PAM-Umrichter ist ideal abgestimmt auf den Luftspaltwicklungsmotor, für die sensorlose Regelung braucht es genaue Kenntnisse der elektrischen und magnetischen Vorgänge im Motor. Weiter beeinflussen sowohl die mechanische Auslegung wie auch die Modulationsart im Umrichter die Motorverluste.

**Wie hat die Celeroton AG den Markteintritt erfahren? Und die ersten 4 Jahre ihrer Marktaktivitäten?**

**Ch. Zwyszig:** Mit Celerotons hochdrehenden Antriebssystemen eröffnen sich ganz neue Möglichkeiten, auch für unsere Kunden. Zu Beginn war und ist deshalb Überzeugungsarbeit zu leisten. In den letzten 4 Jahren haben wir zusammen mit unseren Kunden Prototypen von neuen, hochspannenden Anwendungen entwickelt und realisiert und dabei extrem viel gelernt. Die nächsten 4 Jahre werden ebenfalls spannend. Es steht nun die Transformation von der Prototypenherstellung zur Serienproduktion an.

**Erfordert die Herstellung der Motoren spezielle Fertigungsverfahren? Halten Sie das Fertigungs-Know-how inhouse oder fertigen Sie extern?**

**Ch. Zwyszig:** Ja, die Fertigungsverfahren sind ebenfalls sehr wichtig, und zudem



Bild: Celeroton

beeinflussen sich die Auslegung und die Fertigung stark. Dies ist also ein weiterer interdisziplinärer Bereich. Wir arbeiten sowohl inhouse wie mit externen Zulieferern.

**Die Vorreiterrolle der Technologie von Celeroton (Drehzahl-Weltrekord!) dürfte wohl Nachahmer auf den Plan rufen – wie gedenken Sie gegebenenfalls dieser Problematik zu begegnen?**

**Ch. Zwyszig:** Dies ist für uns eher positiv als ein Problem. Hochdrehende Antriebssysteme sind ein wachsender Markt, und mehrere Anbieter beleben diesen Markt noch mehr. Natürlich melden wir auch Schutzrechte an, aber vor allem planen wir weitere Innovationen und Verbesserungen, um auch in Zukunft Technologieführer zu sein im Bereich hoher Drehzahlen.

**Sind die Grenzen des Machbaren bei hochdrehenden elektrischen Antriebssystemen jetzt erreicht oder se-**

**hen Sie weitere Entwicklungsmöglichkeiten?**

**Ch. Zwyszig:** Unsere Firma basiert auf neuer Technologie und Innovation, und dies wird auch in Zukunft so sein. Wir sehen noch diverse Entwicklungsmöglichkeiten und werden darüber informieren, zum Beispiel auch im SMM.

**Der Werkplatz Schweiz leidet massiv unter den Währungsverwerfungen – inwiefern ist Celeroton betroffen? Wie meistern Sie diese Herausforderung?**

**Ch. Zwyszig:** Wir versuchen soweit wie möglich unsere Projekte in Schweizer Franken zu fakturieren und entsprechend das Währungsrisiko mit den Projektpartnern zu teilen. Dies hilft aber nicht über den Fakt hinweg, dass auch wir mit dem Wechselkurs zu kämpfen haben und entsprechend schauen müssen, dass wir durch konstante Innovation technologisch an der Spitze bleiben und für unsere potentiellen Kunden entsprechend attraktiv bleiben.

**Wagen Sie einen Blick in die Zukunft des Werkplatzes Schweiz im Allgemeinen?**

**Ch. Zwyszig:** Der Schweizer Werkplatz hat hervorragende Voraussetzungen, vor allem im Bereich High-Tech, in dem auch wir uns bewegen: Hochqualifizierte und motivierte Arbeitskräfte, erfahrene und innovative Zulieferer im Bereich Hochpräzisionsfertigung und eine sehr gute Infrastruktur. Daher sehen wir die Zukunft für uns speziell, aber auch für den Werkplatz im Allgemeinen sehr positiv.

tet werden, was ebenfalls gross, schwer und teuer ist.

Mit einem Umrichter mit Pulsamplitudenmodulation (PAM) können diese Probleme jedoch gelöst werden. Diese Modulation ist ideal auf die Motoren mit Luftspaltwicklung abgestimmt. Die Vorteile sind:

- Tiefe Verluste in Umrichter und Motor.
- Bestens geeignet für den Betrieb ohne AC-Filter, auch mit niederinduktiven Motoren.
- Eine sensorlose Drehzahlregelung, ganz ohne Hall-Sensoren oder Encoder im Motor.

Als Beispiel werden im Folgenden in zwei typischen Motoren für hohe Drehzahlen die

Motorverluste und die Gesamt-Antriebssystemverluste analysiert:

- 1: PMSM mit zweipoligem Rotormagnet und genutetem Stator mit Dreiphasen-Durchmesserwicklung. Dieser Motortyp ist der Industriestandard für Drehzahlen bis 100 000 oder z.T. auch bis 200 000 U/min.
- 2: PMSM mit zweipoligem Rotormagnet und eisenloser Schrägwicklung im Luftspalt. Dieser Motortyp kann auf sehr tiefe Verluste bei hohen Drehzahlen optimiert werden. Celeroton setzt ihn deshalb standardmässig ein für Drehzahlen ab 200 000 U/min. Für den Vergleich werden beide Motoren

auf eine Nenndrehzahl 100 000 U/min und ein Nennmoment von 30 mNm ausgelegt. Beide werden mit einem CC-230-3000-Umrichter von Celeroton betrieben.

Im genuteten Antriebssystem können die Gesamt-Antriebsverluste (Umrichter und Motor) von optimalen 49 W, die bei PWM mit 40 kHz erreicht werden, auf 46 W mit PAM reduziert werden. Sollen nur die Motorverluste minimiert werden und die Umrichterverluste sind sekundär, kann mit dem gleichen Umrichter und PWM mit höherer Schaltfrequenz ein besseres Ergebnis erzielt werden. Im Antriebssystem mit Luftspaltwicklung führt kein Weg an PAM vorbei, die Gesamt-Antriebssystemverluste sind bis

Bild: Celeroton



Hochdrehende Motoren (Statoren und Rotoren), Umrichter für deren Ansteuerung und hochdrehende Kompressoren. Die Antriebskomponenten sind für Drehzahlen zwischen 200 000 U/min und 1 000 000 U/min und Leistungen zwischen 50 W und 3 kW ausgelegt.

zweimal kleiner als mit PWM, um die Motorverluste mit PWM zu reduzieren, müssten Schaltfrequenzen von unrealistischen 250 kHz oder höher gefahren werden.

### Sensorlose Regelung von Stillstand bis 1 000 000 U/min

Die sensorlose Regelung ist bei hochkompakten Motoren entscheidend, da typischerweise kein Platz für Sensoren besteht. Bei hochdrehenden Motoren umso mehr, als ein zusätzlicher Sensormagnet auf dem Rotor die mechanische Auslegung und die Rotordynamik stark verschlechtert. Die sensorlose Technologie in Celerotons Umrichtern basiert auf Spannungs- und Strommesswerten in den Motorphasen. Aus der Schätzung der induzierten Spannung, welche das Positionssignal enthält, wird der Rotorwinkel bestimmt. Dies erlaubt die sensorlose Regelung bis 1 Million U/min, und dies mit optimaler feldorientierter Regelung mit tiefstem Strom und damit tiefsten Verlusten pro benötigtem Drehmoment. Damit können Materialbearbeitungsspindeln und Kompressoren mit hohem Wirkungsgrad betrieben werden, das Design des Motors vereinfacht sich und die Zuverlässigkeit der Systeme wird erhöht.

Ende 2011 hat Celeroton zudem eine neue Version des CC-75-500-Umrichters lanciert, welcher neu ohne Winkelsensor im Motor auch bei langsamen Drehzahlen und sogar bei Stillstand die Winkelposition von PMSM-, BLDC- und EC-Motoren erkennt. Dies erlaubt, ab Stillstand volles Moment zu fahren und nicht wie üblich im gesteuerten Betrieb (auch open loop genannt) auf etwa 5% der Nenndrehzahl hochzufahren, um dann in den geregelten Betrieb zu wechseln. Auf den Einsatz von Hallsensoren oder Encodern kann demzufolge über den gesamten Bereich von Stillstand bis 1 000 000 U/min komplett verzichtet werden. Damit können weitere Anwendungen sensorlos

betrieben werden, die früher zwingend einen Sensor zur Positionierung oder zum Anfahren benötigten, wie beispielsweise Medizinalbohrer, automatischer Werkzeugwechsel bei Materialbearbeitungsspindeln oder schnelles Anfahren und Drehzahlwechsel von Servomotoren mit vollem Moment.

### Miniatur-Turbokompressoren

Das Produktspektrum von Celeroton umfasst Motoren, Umrichter und Anwendungen wie hochkompakte Turbokompressoren. Dies bei Leistungen von 50 W bis 3 kW und Drehzahlen von Stillstand bis eine Million U/min, mit Fokus auf Drehzahlen über 100 000 U/min. Miniaturisierte Turbokompressoren können für diverse Fluide realisiert werden, beispielsweise zur Wasserdampfverdichtung mit einem Druckverhältnis von 2 und einer Nennleistung von 150 W, oder in einem Luftkompressor mit 1 kW Nennleistung für Drücke bis 1,7 bar und Volumenströme bis 1000 l/min. Mit der Technologie und den Produkten von Celeroton sind Drehzahlen von mehreren Hunderttausend U/min industriell umsetzbar und ersetzen dabei Gewicht und Volumen in verschiedensten Märkten. <<

Autor:  
Dr. Christof Zwysig,  
Geschäftsführer, Celeroton AG

Information:  
Celeroton AG  
Technoparkstrasse 1  
CH-8005 Zürich  
Tel. +41 44 250 52 20  
Fax +41 44 250 52 29  
info@celeron.com  
www.celeroton.com

## Mehrfach-Taumelnietmaschinen SO 1000–SO 6000 Sondermaschinen und Automationen



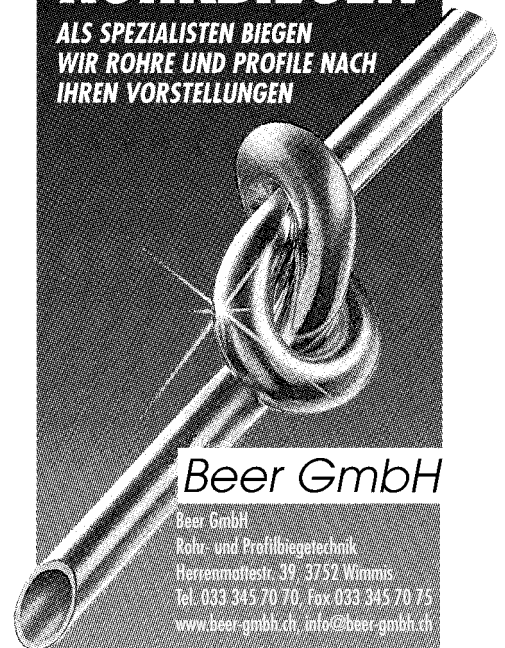
EHRO Ehrensberger GmbH  
Hauptstr. 108  
CH-2552 Orpund  
T +41 (0)32 355 14 54  
F +41 (0)32 355 26 09  
info@ehro.ch

[www.ehro.ch](http://www.ehro.ch)



## ROHRBIEGEN

ALS SPEZIALISTEN BIEGEN  
WIR ROHRE UND PROFILE NACH  
IHREN VORSTELLUNGEN



Beer GmbH

Beer GmbH  
Rohr- und Profildiehtechnik  
Herrenmattestr. 39, 3752 Wimmis  
Tel. 033 345 70 70, Fax 033 345 70 75  
[www.beer-gmbh.ch](http://www.beer-gmbh.ch), [info@beer-gmbh.ch](mailto:info@beer-gmbh.ch)

## mefro Räder, Rollen, Felgen in Norm- und Spezialausführungen



Katalog  
anfordern!

EROBA AG, 4001 Basel

Sattelgasse 2, Tel. (061) 261 46 22, Fax (061) 261 20 14,  
E-Mail: [info@eroba.ch](mailto:info@eroba.ch), [www.eroba.ch](http://www.eroba.ch)