

Diss. ETH Nr. 11'444

# **Schnelldrehendes Schwungrad aus faserverstärktem Kunststoff**

Peter von Burg



# **Schnelldrehendes Schwungrad aus faserverstärktem Kunststoff**

ABHANDLUNG  
zur Erlangung des Titels  
DOKTOR DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN  
der  
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH

vorgelegt von  
**Peter von Burg**  
Dipl. Masch.-Ing. ETH  
geboren am 25. März 1959  
von Selzach SO

Angenommen auf Antrag von:

Prof. Dr. U. Meier, Referent  
Prof. Dr. G. Schweitzer, Korreferent

Zürich 1996



## Kurzfassung

---

Moderne Schwungräder werden immer mehr zur kurzfristigen Energiespeicherung eingesetzt. Ein Projekt KIS (*K*inetischer-*K*urzzeit-Energie-*S*peicher) an der ETH beinhaltet Entwicklung und Bau eines solchen Speichers für einen Energieinhalt von 1kWh und einer Leistung von 250kW. Der Speicher besteht aus einem Schwungrad aus faserverstärktem Kunststoff, einem daran angeflanschten elektrischen Motor/Generator mit zugehörigem Umrichter und einer aktiven Magnetlagerung.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird der Schwungradrotor für diesen Energiespeicher näher untersucht. Die speziellen Anforderungen an einen solchen Rotor (hohe Energiedichte, Sicherheit im Versagensfall) werden detailliert betrachtet. Dazu müssen vor allem der Spannungszustand und das Bruchverhalten des Rotors genau bekannt sein. Der Spannungszustand von Bauteilen aus faserverstärkten Kunststoffen kann massgeblich durch herstellungsbedingte Eigenspannungen beeinflusst werden (Vorspannung, Schwund). Durch gezielt eingebrachte Vorspannungen können die für die Belastbarkeit eines Schwungradrotors massgebenden Betriebsspannungen reduziert werden.

Zur Berechnung der Spannungen in scheibenförmigen Rotoren aus faserverstärkten Kunststoffen wird eine geeignete Methode formuliert. Damit können neben der Belastung des Schwungrades durch Rotation vor allem auch alle herstellungsbedingten Eigenspannungen berücksichtigt werden. Zur Dimensionierung werden einerseits die heute üblichen, andererseits aber auch erweiterte Bruchspannungshypothesen für faserverstärkte Kunststoffe verwendet. Herstellungsbedingte Eigenspannungen werden mit ent-

sprechenden Versuchen und Messungen nachgewiesen und mit der Berechnung verglichen. Zur Messung werden sowohl konventionelle Dehnmessstreifen wie auch berührungsfreie optische Methoden eingesetzt.

Im Projekt KIS wurde die Auslegung und Optimierung eines scheibenförmigen Schwungradrotors bezüglich Energieinhalt, Drehzahl, Gasreibungsverluste, Geometrie, Materialaufwand und Form vorgenommen. Anschliessend wurde der Schwungradrotor gebaut und erfolgreich getestet.

## Abstract

---

Modern flywheels are becoming more widely used to store energy for short periods of time. The project KIS (Short Time *K*inetic Energy Storage System) at the ETH involves the development and construction of such a system with an energy content of 1kWh and a peak power capability of 250kW. The system consists of a flywheel made of fiber reinforced plastics, a flanged electrical motor/generator with the necessary power electronics and an active magnetic bearing.

Within the present work the flywheel for this particular energy storage system was investigated in detail. The specific needs for such a rotor (energy density, safety in case of failure) were analyzed in detail. The stress distribution and the failure behavior of the rotor must therefore be known exactly. The stress distribution of structural parts made of advanced composites is dependent to a great extent on the manufacture-related residual stresses (pre-stressing, shrinkage). Due to built-in pre-stresses the relevant structural loads under operation can be reduced.

For the stress calculation of disk-shaped rotors made of advanced composites, an adapted calculation method has been formulated. With this method the stresses in the flywheel due to rotational as well as the manufacture-related residual stresses can be taken into account. The usual failure criteria and additional criteria for advanced composites were used for the dimensioning. The residual stresses were confirmed with tests and measurements to be similar to the calculated values. The measurement methods made use of conventional strain gauges together with contactless optical sensors.

In the KIS project, the design and optimization of a disk shaped flywheel were conducted with respect to energy content, rotational speed, aerodynamic friction, geometry, material expenditure and shape. Subsequently, the flywheel was built and successfully tested.

## Vorwort

---

Die vorliegende Arbeit wurde durch den Doktorvater, Herrn Prof. Urs Meier angeregt und mit grossem persönlichem Engagement begleitet und gefördert. Sein breites fachliches Wissen und die ständige Bereitschaft, auf meine jeweiligen Probleme einzugehen, waren für mich eine grosse Hilfe und ich möchte ihm dafür danken.

Herrn Prof. Gerhard Schweitzer danke ich für die Übernahme des Korreferates, sowie für die Möglichkeit, das Projekt KIS im Rahmen seines Institutes durchführen zu können.

Ohne die Mitarbeit der EMPA Dübendorf wären wichtige Teile meiner Arbeit nicht machbar gewesen. Insbesondere beim Nachweis der theoretisch hergeleiteten Eigenspannungen durften die Messtechnikspezialisten ihr Können und ihre Erfahrung unter Beweis stellen. Ganz speziellen Dank gehört deshalb Peter Anderegg, Enzo Cattarin und Dr. Erwin Hack für ihren grossen Einsatz.

Allen Freunden, Kolleginnen und Kollegen die mich in meiner Arbeit in unzähligen Diskussionen, mit Hinweisen und kritischen Fragen unterstützt und motiviert haben, danke ich ebenfalls.

Zürich, im Februar 1996

Peter von Burg



## Inhaltsverzeichnis

---

<b>Kurzfassung</b>	<b>III</b>
<b>Abstract</b>	<b>V</b>
<b>Vorwort</b>	<b>VII</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>IX</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1. Kinetische Energiespeicherung mit Schwungrädern	1
1.2. Anwendungsbeispiel kinetischer Energie-Speicher	2
1.3. Konzept für Gesamtsystem und Komponenten	4
1.4. Spezielle Probleme von Hochgeschwindigkeits-Rotoren	5
1.5. Herstellung scheibenförmiger Schwungräder	5
1.6. Ziel der Arbeit	6
1.7. Vorgehensweise	7
<b>2. Spannungsberechnung faserverstärkter Rotoren</b>	<b>9</b>
2.1. Numerische Berechnungsmethoden	9
2.2. Belastung durch Rotation	10
2.3. Belastung durch Vorspannung der Fasern bei der Herstellung	13
2.4. Thermische Belastung	16
2.5. Belastung durch Schwundspannungen	17
2.6. Numerische Möglichkeit zur Spannungsberechnung scheibenförmiger Rotoren	18

<b>3.</b>	<b>Bruchspannungshypothesen</b>	<b>24</b>
3.1.	Heute übliche Bruchspannungshypothesen	24
3.2.	Erweiterte Bruchspannungshypothese	26
3.3.	Beispiel Spannungsberechnung eines Schwungrades	27
<b>4.</b>	<b>Nachweis der Eigenspannungsberechnungen</b>	<b>31</b>
4.1.	Mögliche Messmethoden	31
4.2.	Messung mit ESPI	33
4.3.	Messung mit DMS	36
<b>5.</b>	<b>Berechnung und Optimierung Bruchenergie</b>	<b>44</b>
5.1.	Anforderungen an das Bruchverhalten bezüglich Sicherheit	46
5.2.	Energie verschiedener Brucharten	50
5.3.	Risswachstum	52
5.4.	Zerstörungsgrad des Rotors	54
5.5.	Energieabschätzung	55
<b>6.</b>	<b>Berechnung der Temperaturbelastung</b>	<b>57</b>
6.1.	Definition typischer Temperaturbelastungen	57
6.2.	Temperaturverhalten faserverstärkter Kunststoffe	58
6.3.	Instationäre Wärmeverteilung	59
<b>7.</b>	<b>Auslegung von Schwungradrotoren</b>	<b>63</b>
7.1.	Energieinhalt und geometrische Form	63
7.2.	Gas-Reibungsverluste	66
7.3.	Ableitung von Wärme	72
7.4.	Kriterien zum optimalen Verhältnis Drehzahl zu Durchmesser	76
7.5.	Optimales Herstellungsverfahren	78
7.6.	Materialwahl	79
7.7.	Toxikologische Untersuchung Bruchreste	83
7.8.	Qualitätssicherung	84
7.9.	Auslegungsbeispiel eines optimierten Rotors	87
7.10.	Anordnung Systemkomponenten	90

7.11. Skalierbarkeit der Auslegung für kleinere bzw. grössere Rotoren	92
<b>8. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>94</b>
8.1. Zusammenfassung	94
8.2. Ausblick	95
<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>97</b>
<b>Index</b>	<b>99</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>101</b>
Abbildungen	103
Fotos	104
Tabellen	105
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>107</b>
<b>Lebenslauf</b>	<b>114</b>