



Josef Lukas Jansen

# Die fremderregte Synchronmaschine

---

*Grundlagen und Modellbildung mit Matlab Simulink*

**disserta**  

---

**Verlag**

**Jansen, Josef Lukas: Die fremderregte Synchronmaschine. Grundlagen und Modellbildung mit Matlab Simulink, Hamburg, disserta Verlag, 2016**

Buch-ISBN: 978-3-95935-298-7

PDF-eBook-ISBN: 978-3-95935-299-4

Druck/Herstellung: disserta Verlag, Hamburg, 2016

Covergestaltung: © Annelie Lamers

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

---

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Bearbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Die Informationen in diesem Werk wurden mit Sorgfalt erarbeitet. Dennoch können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden und die Diplomica Verlag GmbH, die Autoren oder Übersetzer übernehmen keine juristische Verantwortung oder irgendeine Haftung für evtl. verbliebene fehlerhafte Angaben und deren Folgen.

Alle Rechte vorbehalten

© disserta Verlag, Imprint der Diplomica Verlag GmbH  
Hermannstal 119k, 22119 Hamburg  
<http://www.disserta-verlag.de>, Hamburg 2016  
Printed in Germany

# Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	3
2. Die Synchronmaschine.....	5
2.1 Aufbau und Einsatz von Synchronmaschinen.....	5
2.2 Theoretische Grundlagen.....	7
2.3. Die Vollpolmaschine.....	9
2.4 Die Schenkelpolmaschine.....	16
3. Herleitung des Modells der Synchronmaschine.....	24
3.1 Modellanforderungen und Modellgrenzen.....	24
3.2 Die Felder der Synchronmaschine.....	27
3.3 Die abc-dq Darstellung.....	28
3.4 Das mathematische Modell der Synchronmaschine.....	35
3.5 Die Modellgleichungen.....	42
3.6 Die Anpassung des Modells.....	55
3.6.1 Bestimmung der Maschinenparameter.....	55
3.6.2 Normierung des Modells.....	58
3.6.3 Die Abstimmung des Modells auf verschiedene Simulationsfälle.....	59
3.7 Die Simulationsergebnisse.....	64
4. Die Windkraftanlage.....	77
4.1 Die Energieflüsse der Windkraftanlage und deren Entstehung.....	78
4.2 Die Aerodynamik des Rotors.....	81
4.3 Der mechanisch-elektrische Energiewandler.....	86
4.4 Topologien und Ansteuerungen der Leistungselektronik.....	89
4.4.1 Lastgeführte Konzepte und deren Ansteuerung.....	89
4.4.2 Selbstgeführte Konzepte und deren Ansteuerung.....	92
4.5 Die Betriebsführung von Windkraftanlagen.....	100
4.6 Das Modell der Windkraftanlage.....	104
4.7 Die Simulationsergebnisse.....	111
5. Fazit.....	125
Formelverzeichnis.....	127
Abkürzungsverzeichnis.....	132
Literaturverzeichnis.....	133
Abbildungsverzeichnis.....	137



# 1. Einleitung

In den letzten Jahrzehnten ist die Nennleistung neu installierter Windenergiekonverter kontinuierlich gestiegen, dabei dominierte die Bestrebung das Betriebsverhalten und den Wirkungsgrad des Energieumwandlungsstrangs zu verbessern. Bei Windenergieanlagen der Multimegawattklasse werden die Anforderungen an die eingesetzte Technik immer anspruchsvoller, dabei gerät die Identifikation eines geeigneten Generatorsystems in den Fokus der Betrachtung.

Ein erprobtes System, aus der konventionellen Kraftwerkstechnik, ist die fremderregte Synchronmaschine, die sich durch ihr Betriebsverhalten und ihre große Leistungsdichte auszeichnet. Die Wechselwirkungen der unterschiedlichen Teilsysteme sind von besonderer Bedeutung für das dynamische Betriebsverhalten des Energieumwandlungssystems, wobei der Einfluss des Zwischenkreisumrichters exponiert ist. Die eingesetzte Schaltungstopologie und die verwendeten Ansteuerverfahren wirken entscheidend auf das Betriebsverhalten der Synchronmaschine und somit auf den gesamten Energieumwandlungsstrang ein. Zu diesem Zweck wird innerhalb dieser Studie ein Modell der fremderregten Synchronmaschine erarbeitet und das Maschinenverhalten untersucht.

Das Buch beginnt mit der Erläuterung der Synchronmaschine und ihrem stationären Verhalten, dabei werden die Unterschiede zwischen den beiden grundlegenden fremderregten Maschinentypen herausgearbeitet.

Als Nächstes folgt die Herleitung der Grundgleichungen und der Notwendigkeit, diese in  $dq0$  Koordinaten aufzustellen.

Um einen passenden Ansatz zur Simulation des mathematischen Modells in Matlab zu finden, wurden im Rahmen der Literaturrecherche verschiedene Modellansätze gegenübergestellt.

Als Ergebnis wird in der vorliegenden Studie der Ansatz hergeleitet, der die Anforderungen bezüglich Anpassungsfähigkeit, Modulationstiefe, Detailgenauigkeit und Parametrierbarkeit am besten erfüllt.

Das Modell wird daraufhin so aufgestellt, dass die Spannungen die Eingangsgrößen und die Ströme die Ausgangsgrößen sind. Die Berechnungen finden in  $dq0$ -rotorfesten Koordinaten statt. Das Maschinenmodell wird im Folgenden mit Simulationsuntersuchungen validiert und so angepasst, dass es zusammen mit dem Windkonvertermodell verwendet werden kann.

Dazu wird in diesem Buch ein Modell einer Windkraftanlage eingeführt. Die Grundlagen aller

an der Energiekonvertierung beteiligten Komponenten und deren Regelungen werden erläutert und die Implementierung in Matlab erklärt. Abschließend werden Sprungantworten der Windkraftanlage untersucht und die sich ergebenden Drehmomente mit einer schnellen Fourier Transformation (FFT) auf Oberwellenfreiheit überprüft, sich ergebende Drehmomentoberwellen werden ihrer Ursache zugeordnet.

Abschließend werden die Ergebnisse diskutiert und mögliche Folgen dargelegt, schließlich werden mögliche Weiterentwicklungsschritte aufgezeigt.

## 2. Die Synchronmaschine

### 2.1 Aufbau und Einsatz von Synchronmaschinen

Der Großteil weltweit erzeugter elektrischer Energie wird von konstant rotierenden Synchrongeneratoren in Großkraftwerken bereitgestellt. Die Synchrongeneratoren der einzelnen Erzeugungseinheiten sind elektrisch über das Energieverteilnetz gekoppelt. Das Verteilnetz hat die Aufgabe Energie zu distribuieren, Energiefluktuationen auszugleichen und eine möglichst große Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Die Versorgungssicherheit ist ein Bedürfnis der Konsumenten, das Qualitätsansprüche an das Übertragungsnetz impliziert. Die Netzqualität setzt sich aus den Ansprüchen an die Spannungsamplitude, die Frequenzstabilität, die Spannungssymmetrie, die Spannungsstabilität, das Wirkleistungsangebot, das Blindleistungsangebot und die Freiheit von Oberschwingungen und Zwischenharmonischen zusammen [Schwab1]. Diese Anforderungen werden optimal von Synchronmaschinen erfüllt, die imstande sind dreiphasige sinusförmige Wechselspannungen im Leistungsbereich von wenigen Kilowatt (kVA) bis mehr als tausend Megawatt (MVA) zu erzeugen. Die Bezeichnung „Synchronmaschine“ rührt aus der Tatsache, dass das Polrad synchron mit der Drehzahl umläuft.

Die fremderregte Synchronmaschine besitzt ein mit Gleichstrom erregtes Polrad. Mit der Polradspannung kann auf den Polradwinkel Einfluss genommen werden, der direkt mit der erzeugten oder verbrauchten Blindleistung korrespondiert. Die Synchronmaschinendrehzahl ist stationär fest an die Netzfrequenz gebunden, die synchrone Leerlaufdrehzahl ergibt sich aus Formel 5.

$$n_0 = \frac{f * 60}{p} \quad (1)$$

Synchronmaschinen sind dadurch in der Lage Frequenzschwankungen im Netz durch Speichern oder Abgeben von Rotationsenergie auszugleichen.

Fremderregte Synchronmaschinen können in zwei typische Bauformen unterteilt werden: die Vollpolmaschine und die Schenkelpolmaschine. Permanenterregte Maschinen werden in diesem Buch nicht behandelt. In diesem Kapitel werden zunächst die theoretischen Grundlagen hergeleitet, dann wird das statische Verhalten der Vollpol- und der Schenkelpolmaschine am Netz erläutert, diese Vorgehensweise soll das Verständnis der späteren Simulationsergebnisse erleichtern.



## 2.2 Theoretische Grundlagen

Um die Vorgänge in elektrischen Maschinen zu verstehen, müssen die theoretischen Grundlagen der Feldtheorie bekannt sein, welche im Folgenden dargestellt werden. Nach James Clerk Maxwell erzeugt jedes Magnetfeld einen Oberflächenstrom in ferromagnetischen Materialien und jeder Stromfluss ruft ein Magnetfeld hervor [Schröder, D.1], vergleiche Formel 2.

$$\oint_{\partial A_1} \underline{H} \cdot d\underline{s} = \iint_{A_2} \underline{j} \cdot d\underline{a} = \underline{I} \quad (2) \quad \text{mit } \underline{D} = 0$$

Folgerichtig ist die magnetische Feldstärke das Resultat der Stromverteilung und hängt von der Geometrie und Anordnung des Leiters ab.

Aus der magnetischen Feldstärke und der Permeabilität lässt sich die magnetische Flussdichte, wie in Formel 3 gezeigt, bestimmen.

$$\underline{B} = \mu \cdot \underline{H} \quad (3)$$

Daraus wird nach Formel 4 der magnetische Fluss errechnet.

$$\phi = \iint \underline{B} \cdot d\underline{a} \quad (4)$$

Aus dem Fluss lässt sich mit Hilfe der Anzahl der Wicklungen die Flussverkettung nach Formel 5 bestimmen.

$$\psi = n \cdot \phi \quad (5)$$

Mit dem Fluss oder der Flussverkettung lässt sich nach dem Induktionsgesetz (Formel 6) die induzierte Spannung ermitteln [Kopfmüller]. Die Induktionswirkung entsteht, weil ein sich zeitlich ändernder magnetischer Fluss stets von einem elektrischen Wirbelfeld mit geschlossenen Feldlinien umgeben ist, vergleichbar mit einem Stromfluss, der von einem magnetischen Wirbelfeld umgeben ist [Schwab2]. Das negative Vorzeichen in den Gleichungen 6 und 7 ergibt sich aus der Lenzschen Regel.

Die induzierte Feldstärke ist immer so gerichtet, dass eine von ihr bewirkte Stromänderung der verursachenden Magnetfeldänderung entgegenwirkt und umgekehrt.

$$u_i = \oint \underline{E}_i \cdot d\underline{s} = -n \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (6) \quad \text{oder} \quad u_i = -\frac{d\psi}{dt} \quad (7)$$

Die für elektrische Maschinen so wichtige Induktivität kann aus der Flussverketzung und dem Strom nach Gleichung 8 berechnet werden, wenn die Induktivität eine Funktion der magnetischen Feldstärke ist. Wenn die magnetische Feldstärke allerdings als konstant angenommen wird, vereinfacht sich die Gleichung zu Formel 9, Hystereseeffekte werden dabei vernachlässigt.

$$L_{dyn} = \frac{d\psi}{dI} \quad (8) \quad L = \frac{\psi}{I} \quad (9)$$

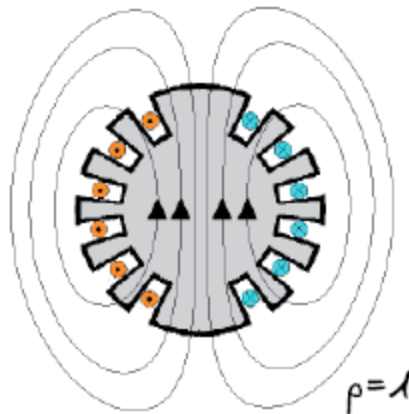
Aus der Flussdichte, der Anzahl der Ladungsträger und der Relativgeschwindigkeit lässt sich nach Formel 10 die Lorentzkraft bestimmen.

$$\underline{F}_{ei} = n_a \cdot Q \cdot \underline{v} \times \underline{B} \quad (10)$$

Solange der Geschwindigkeitsvektor und der Feldvektor nicht parallel sind, kann sich eine Kraft ungleich null ergeben. Das Kreuzprodukt paralleler Vektor ist null.

## 2.3. Die Vollpolmaschine

Die Vollpolsynchronmaschine, die auch Turbogenerator genannt wird, wird häufig in konventionellen Kraftwerken eingesetzt und von einer Turbine angetrieben. Der Name Vollpolläufer ergibt sich aus der Läuferform, siehe Abbildung 1.

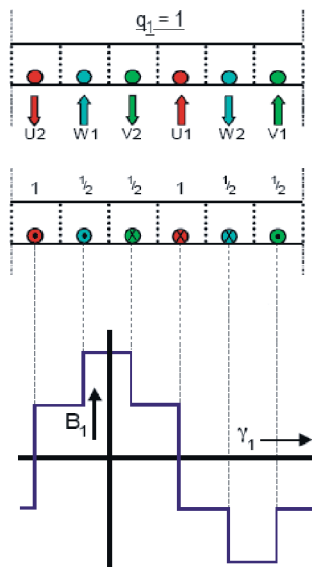


**Abbildung 1:** Vollpolmaschine  
[Schröder, R. 1 Kapitel 7.2]

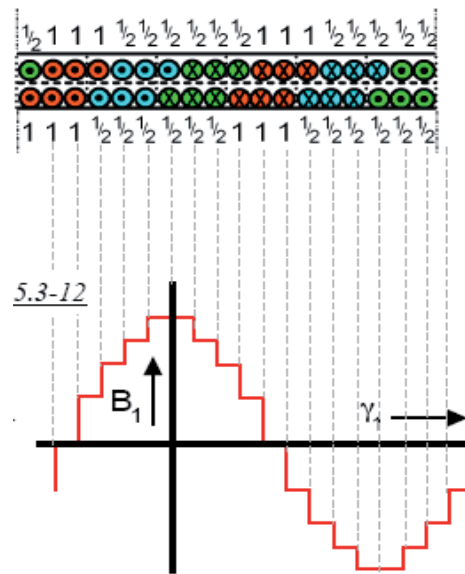
Die Läuferform ist der Tatsache geschuldet, dass sich zweipolige Synchronmaschinen am 50Hz Netz mit  $3000\text{min}^{-1}$  drehen und dass Dampfturbinen bei großen Drehzahlen den besten Wirkungsgrad aufweisen [Rangwala].

Um diesen vergleichsweise hohen Drehzahlen der Arbeitsmaschinen dauerhaft zu widerstehen, müssen die Läufer der Maschinen entsprechend mechanisch robust gefertigt sein.

Die runde Läuferform ist besonders geeignet um einen sinusförmigen Feldverlauf zu ermöglichen, siehe Abbildung 2. Mit konstruktiven Kunstgriffen, wie Sehnung, lässt sich dies noch erheblich verbessern.



**Abbildung 2:** Zonenplan Drehstromwicklung [Schröder, R. 1 Kapitel 5.3.2]

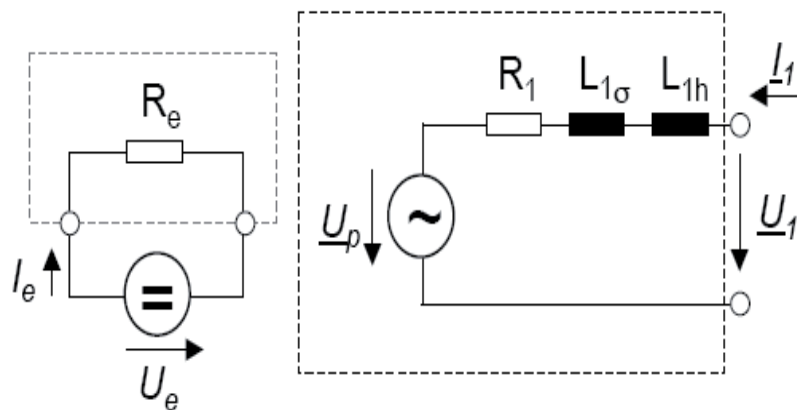


**Abbildung 3:** optimierter Zonenplan [Schröder, R. 1 Kapitel 5.3.2]

Die Abbildung 3 zeigt in der oberen Hälfte den Zonenplan einer zweischichtigen, gesehten, und gruppierten Drehstromwicklung. Die untere Abbildungshälfte zeigt die mit dem Sprungstellenverfahren ermittelte Feldkurve, aus der sich ein recht sinusförmiges Feld ergeben wird. Die Sehnung und andere konstruktive Maßnahmen verringern die von den Oberwellen induzierten Spannungen und können Oberwellen für bestimmte Ordnungszahlen auch ganz auslöschen [Schröder, R. 1].

Die resultierende Klemmenspannung ist somit sinusförmiger, weil die Oberwellen durch die niedrigen Oberwellen-Wicklungsfaktoren unterdrückt werden [Bödefeld].

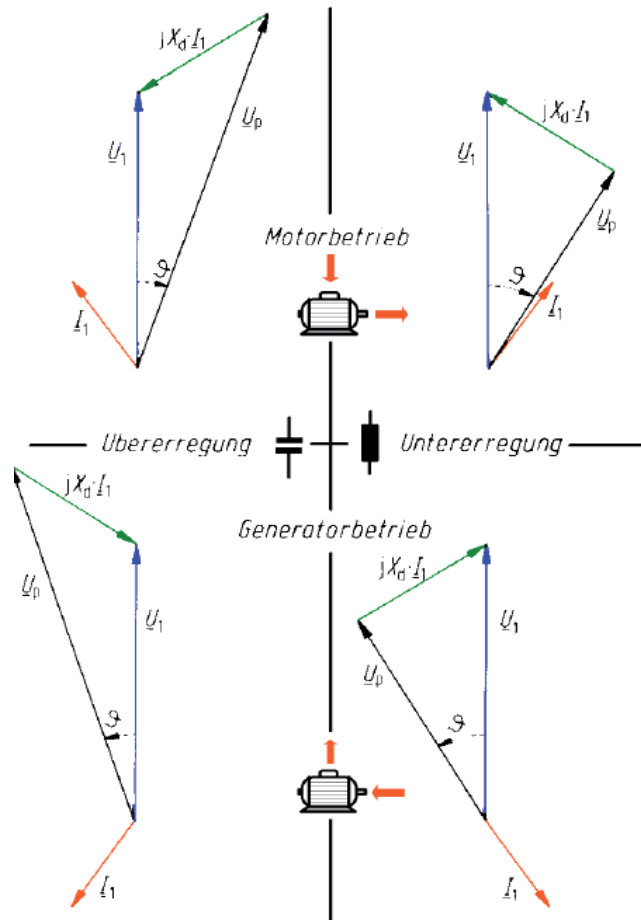
Die Abbildung 4 zeigt das Ersatzschaltbild der Synchronmaschine mit Rotor- und Statorkreis. In der linken Hälfte der Abbildung ist der Rotorkreis mit der Erregerspannungsquelle und dem Feldwiderstand dargestellt und rechts ist der Statorkreis abgebildet. Der Statorkreis wird durch die Elemente Hauptinduktivität, Streuinduktivität und Statorwiderstand sowie die Polradspannungsquelle nachgebildet.



**Abbildung 4:** Rotor- und Statorkreis der Sym. [Schröder, R. 1 Kapitel 7.7.2]

Entscheidend für das Verhalten der Synchronmaschine ist die Polradspannung, die an den Stator клемmen als Leerlaufspannung gemessen werden kann. Die Polradspannung hängt in Amplitude und Frequenz von der Rotordrehzahl und dem Erregerstrom, beziehungsweise dem magnetischen Fluss, ab und berechnet sich nach Formel 11 [Schröder, R. 1].

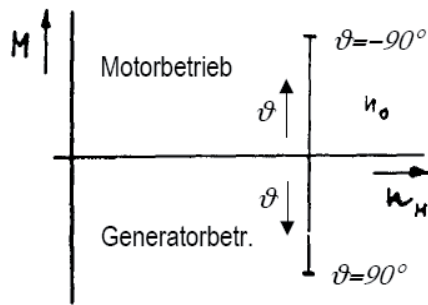
$$u_p(t) = -\sqrt{2} \cdot U_p \cdot \sin(p \cdot \omega_M t + p \cdot \beta_M) \quad (11)$$



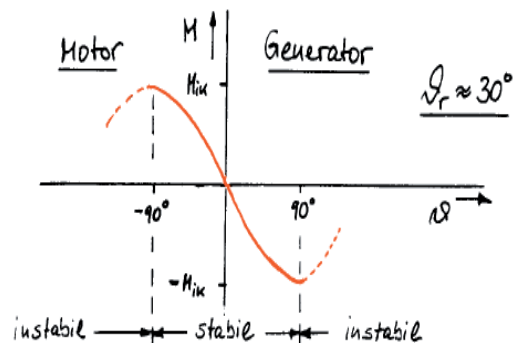
**Abbildung 5:** Zeigerdiagramme der Synchronmaschine [Schröder, R. 1 Kapitel 7.8.5]

Die Polradspannung ist sättigungsabhängig, meist wird jedoch ein lineares Verhältnis zwischen dem Erregerstrom und der Polradspannung angenommen.

Anhand von Abbildung 5 kann der Einfluss der Polradspannung nachvollzogen werden. Je nach Erregung ergibt sich ein kapazitives oder induktives Verhalten der Maschine, dies wird verwendet um im Netz die benötigte Blindleistung zu erzeugen oder zu dissipieren. „Übererregt“ bedeutet, dass die Polradspannung größer als die Spannung  $U_1$  ist und die Maschine induktive Blindleistung aufnimmt. An dieser Stelle sei auf den Vorzeichenwechsel des Polradwinkels zwischen Motor- und Generatorbetrieb hingewiesen, wenn das Polrad voreilt wird die Maschine generatorisch betrieben.



**Abbildung 6:** Drehmomentdrehzahlkennlinie der Symm. [Schröder, R. 1 Kapitel 7.8.7]



**Abbildung 7:** stationär stabiler Arbeitsbereich der Symm. [Schröder, R. 1 Kapitel 7.8.7]

Die elektrische Leistung der Maschine lässt sich mit Hilfe der Gleichungen 12 und 13 bestimmen.

$$Q = -m_1 \cdot \left[ \frac{U_p \cdot U_1}{X_d} \cdot \cos(\vartheta) - \frac{U_1^2}{X_d} \right] \quad (12) \quad P_d = -m_1 \cdot \frac{U_p \cdot U_1}{X_d} \cdot \sin(\vartheta) \quad (13)$$

Mit Gleichung 14 lässt sich das innere elektrische Moment der Maschine bestimmen. Inneres Moment bedeutet, dass Reibungsverluste, Stromwärmeverluste und Eisenverluste nicht berücksichtigt werden.

$$M_d = - \frac{p \cdot m_1}{\omega_N} \cdot \frac{U_p \cdot U_1}{X_d} \cdot \sin(\vartheta) \quad (14)$$

Das Kippmoment ist das maximal leistbare Drehmoment der Maschine, es wird mit Formel 15 errechnet.

$$M_{ik} = \frac{p \cdot m_1}{\omega_N} \cdot \frac{U_p \cdot U_1}{X_d} \quad (15)$$

Die Drehmoment-Drehzahlkennlinie der Synchronmaschine ist Abbildung 6 zu entnehmen. Zu beachten ist: wenn das externe Drehmoment größer ist als das Kippmoment, verliert die