Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Institut für Elektrische Energiesysteme
Prof. Frank Palis,
Dr. Thomas Schallschmidt

Ramme-Elektro-Maschinen-Bau GmbH
Dr. André Ramme

Potentiale der Generator- und Steuerungstechnik für Fluss-Strom-Anwendungen

1. Generatorlösungen

1.1 Generatorlösungen mit Getriebe

1.1.1 Asynchrongenerator mit Kurzschlussläufer

1.1.2 Doppeltgespeister Asynchrongenerator

1.1.3 Permanenterregter Synchrongenerator

1.2 Getriebelose Generatorlösungen

1.2.1 Permanenterregter Synchrongenerator

1.2.2 Transversalflussgenerator

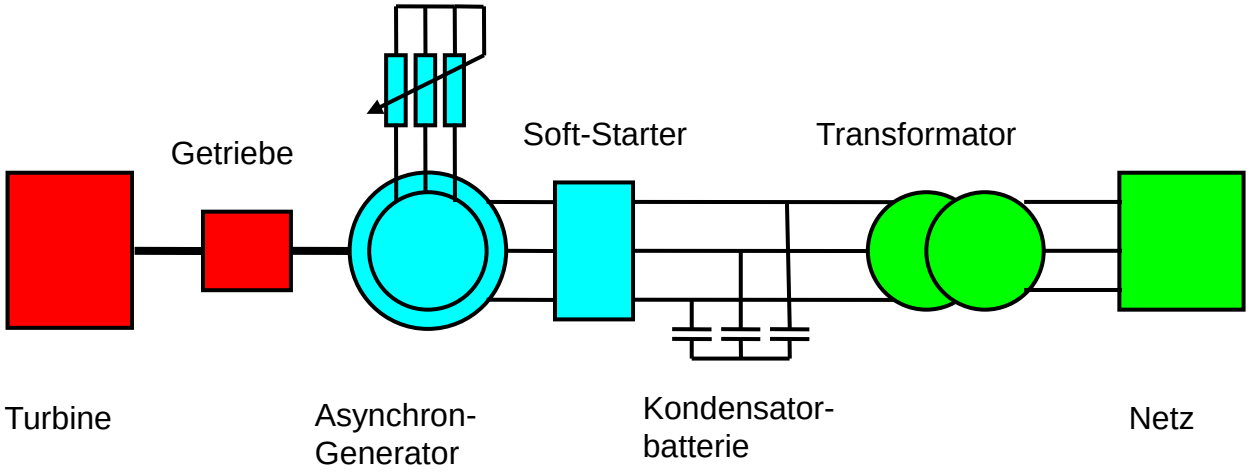
2. Wirkungsgradmaximierung

2.1 Verlustoptimierung durch Generatorregelung

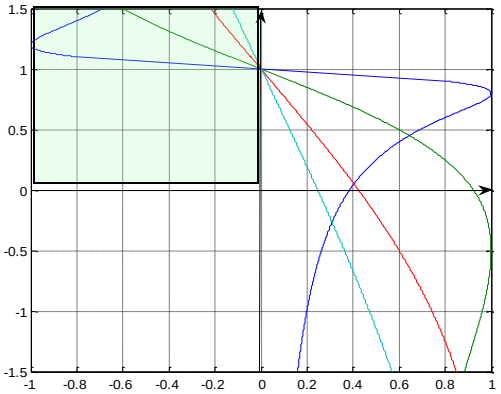
2.2 Maximum Power Point Tracking des Turbinenarbeitspunktes

Generatorlösungen mit Getriebe

Asynchrongenerator mit Kurzschlussläufer

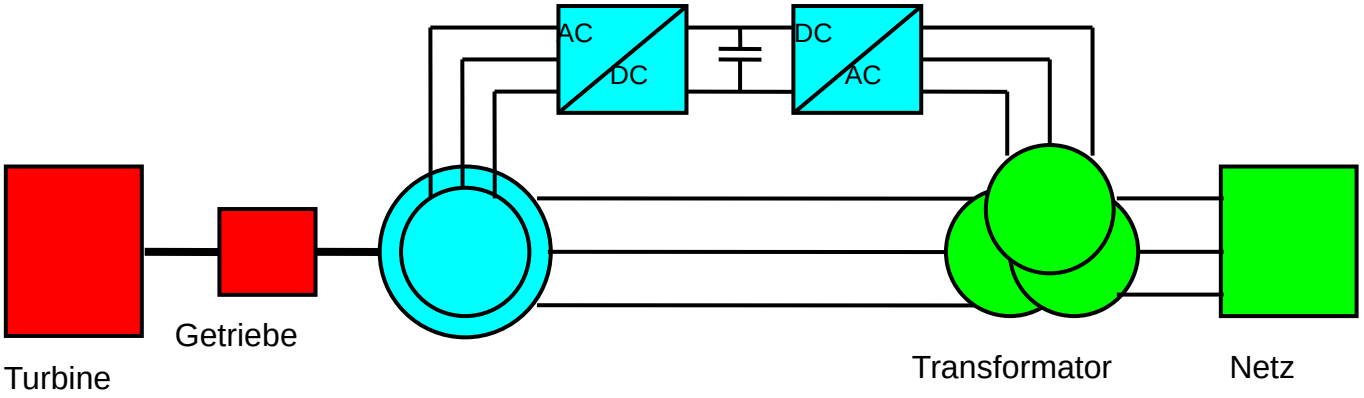


- Asynchronmaschine mit Schleifringläuferläufer
- Getriebe notwendig (Übersetzung ca. 100)
- geringer Generatordrehzahlstellbereich (ca 10%)
- Verluste in den Läuferwiderständen



Generatorlösungen mit Getriebe

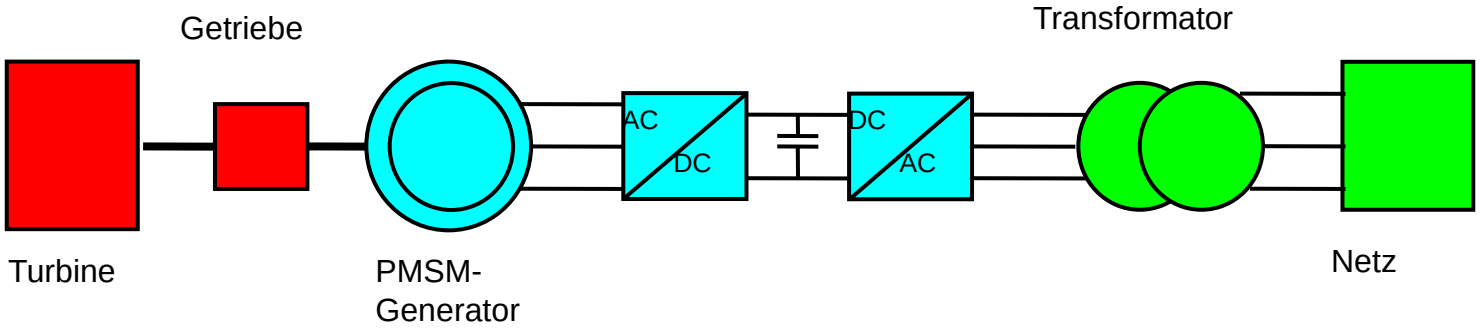
Doppeltgespeister Asynchrongenerator



- Asynchronmaschine mit Schleifringläufer
- Getriebe notwendig
- Generatordrehzahlstellbereich bis zu 40% über synchrone Drehzahl
- Stellgliedauslegung nur für Teillast notwendig (bis zu 40 % der Nennleistung)

Generatorlösungen mit Getriebe

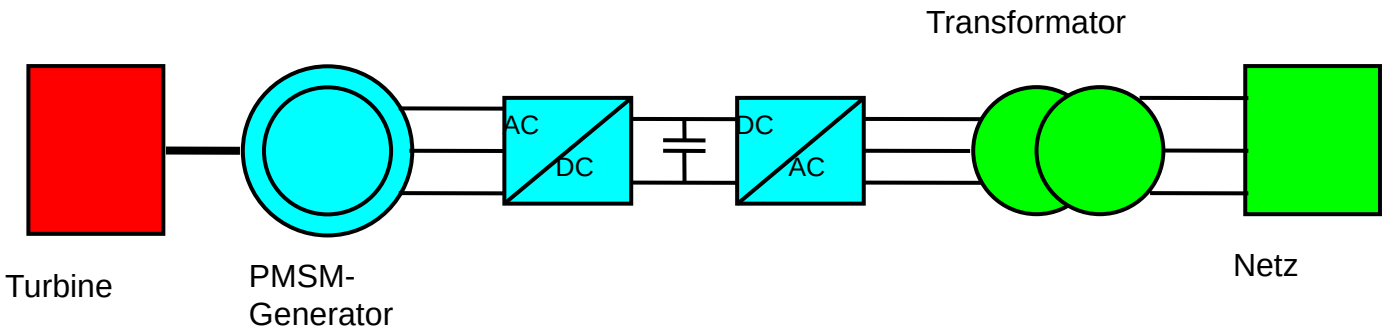
Permanenterregter Synchrongenerator mit Getriebe (PMSG)



- Permanenterregter Synchrongenerator
- Getriebe notwendig (Übersetzung ca. 10)
- variable Generatordrehzahl
- umfassende Möglichkeiten der Wirkungsgradoptimierung

Getriebelose Generatorlösungen

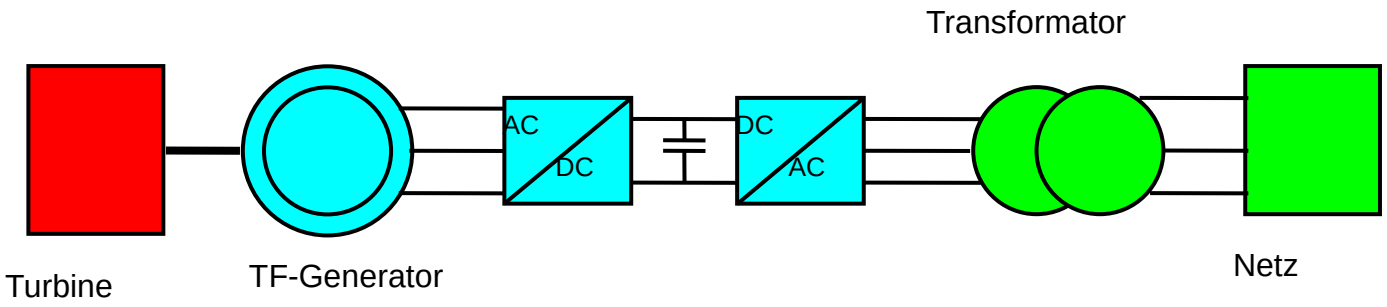
Permanenterregter Synchrongenerator ohne Getriebe (PMSG)



- Permanenterregter Synchrongenerator
- kein Getriebe
- variable Generatordrehzahl
- umfassende Möglichkeiten der Wirkungsgradoptimierung
- Größere Baugröße als PMSG mit Getriebe

Getriebelose Generatorlösungen

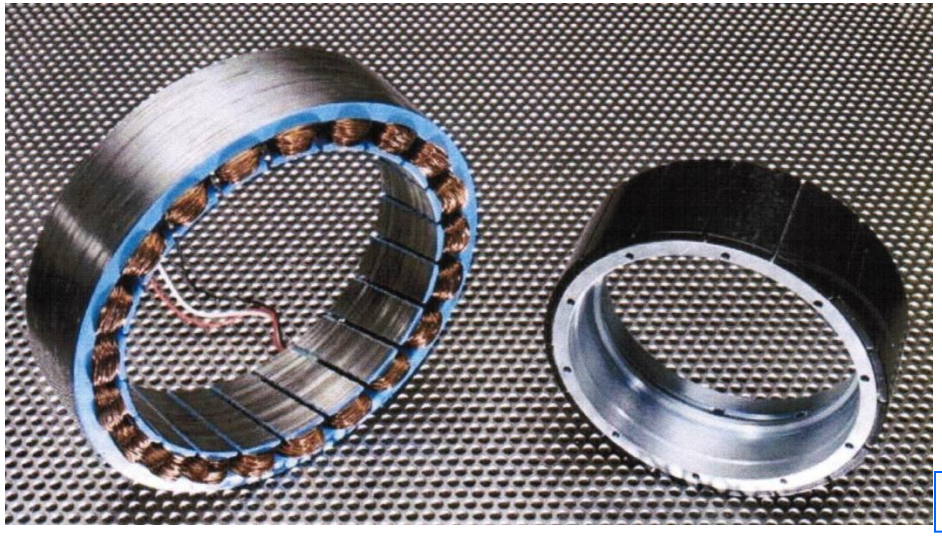
Transversalflussgenerator ohne Getriebe



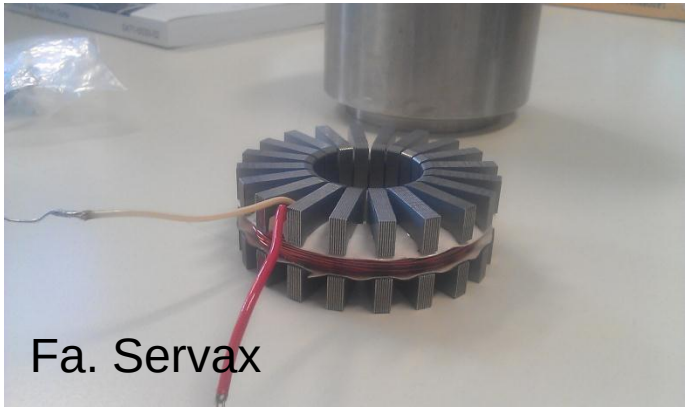
- Permanenterregter Synchrongenerator
- kein Getriebe
- variable Generatordrehzahl
- umfassende Möglichkeiten der Wirkungsgradoptimierung
- geringere Baugröße als der getriebelose PMSG

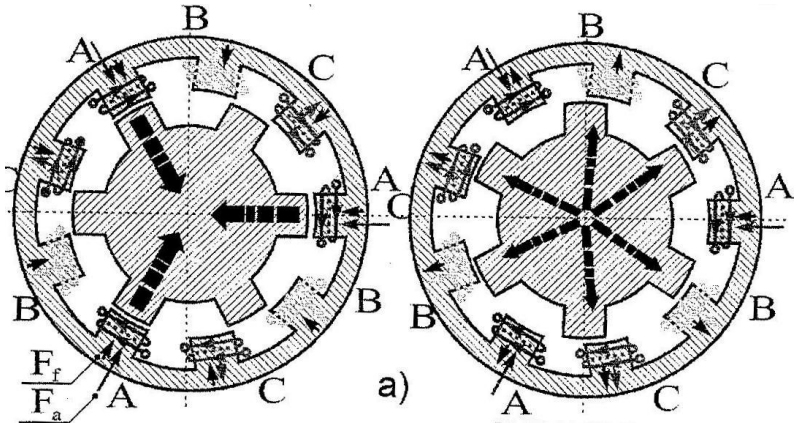
Längsflussprinzip versus Querflussprinzip

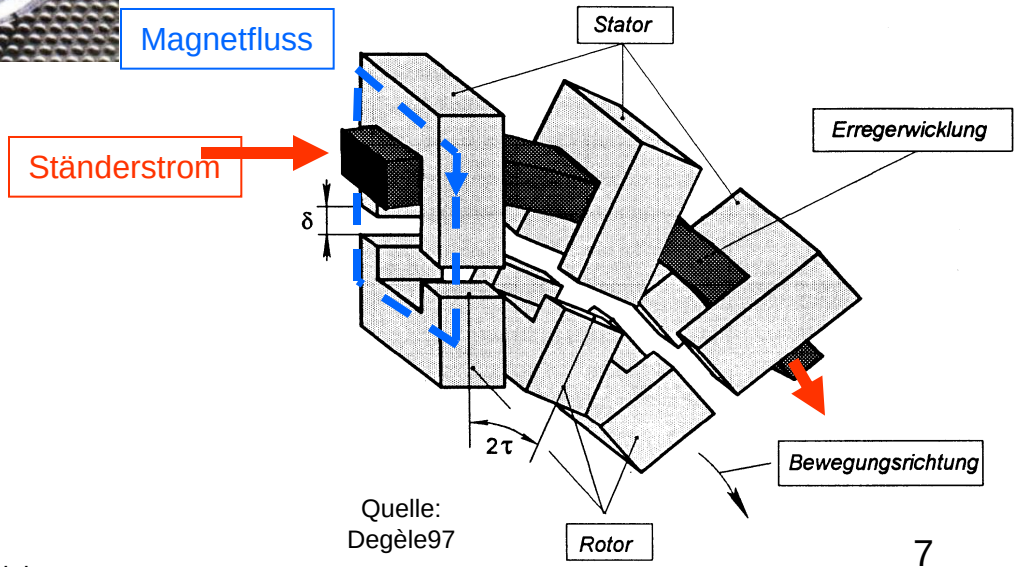
Längsflussprinzip



Transversalflussprinzip







Quelle:
Degèle97

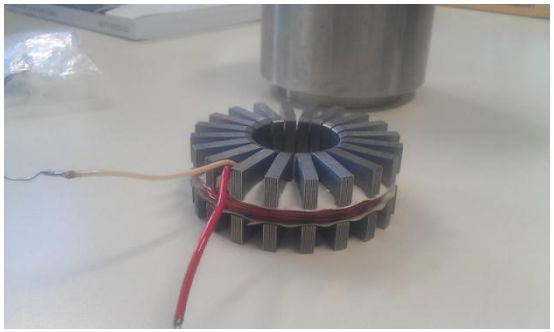
Unterschiedliche Konstruktionen von Transversalflussmaschinen

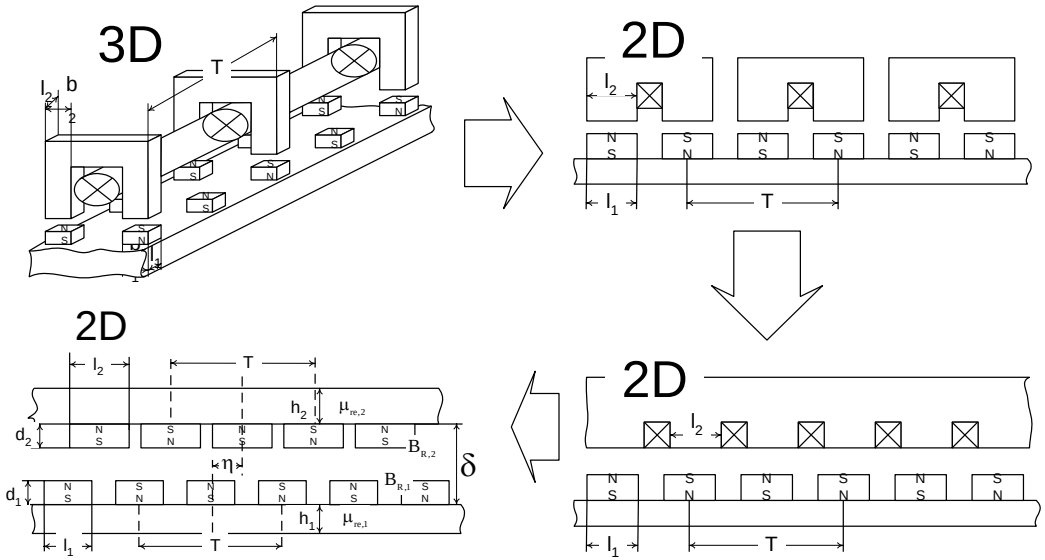
Hochmomentgenerator in Leichtbauweise für Windkraftanlagen
[Lloyd Dynamowerke Bremen]

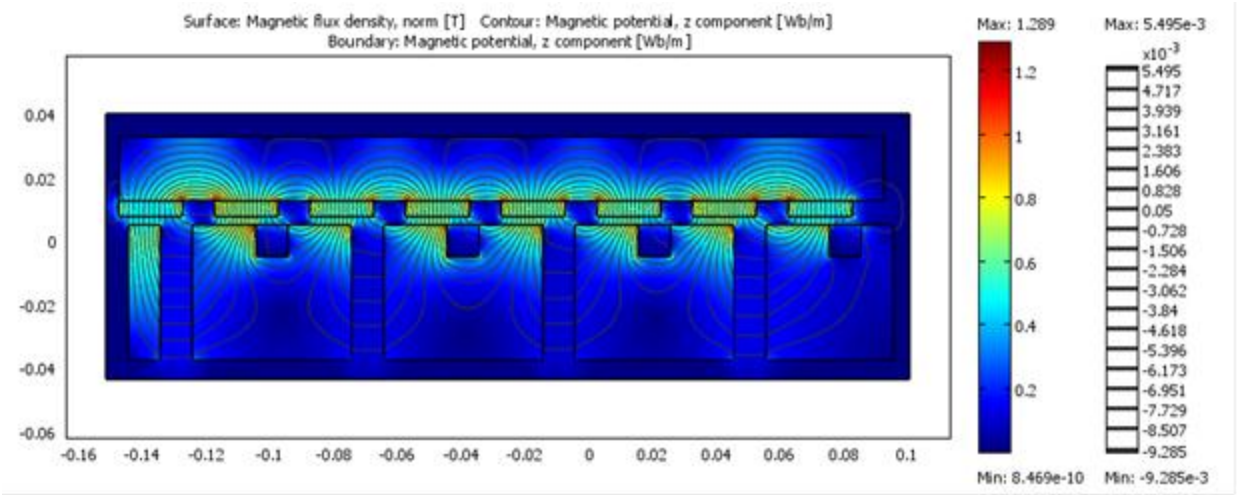
n=55 U/min
M=8,7 kNm
P= 50 kW
1,2 Tonnen
27,6 kN
23 kN pro Tonne

(herkömmlich 6 kN pro Tonne)

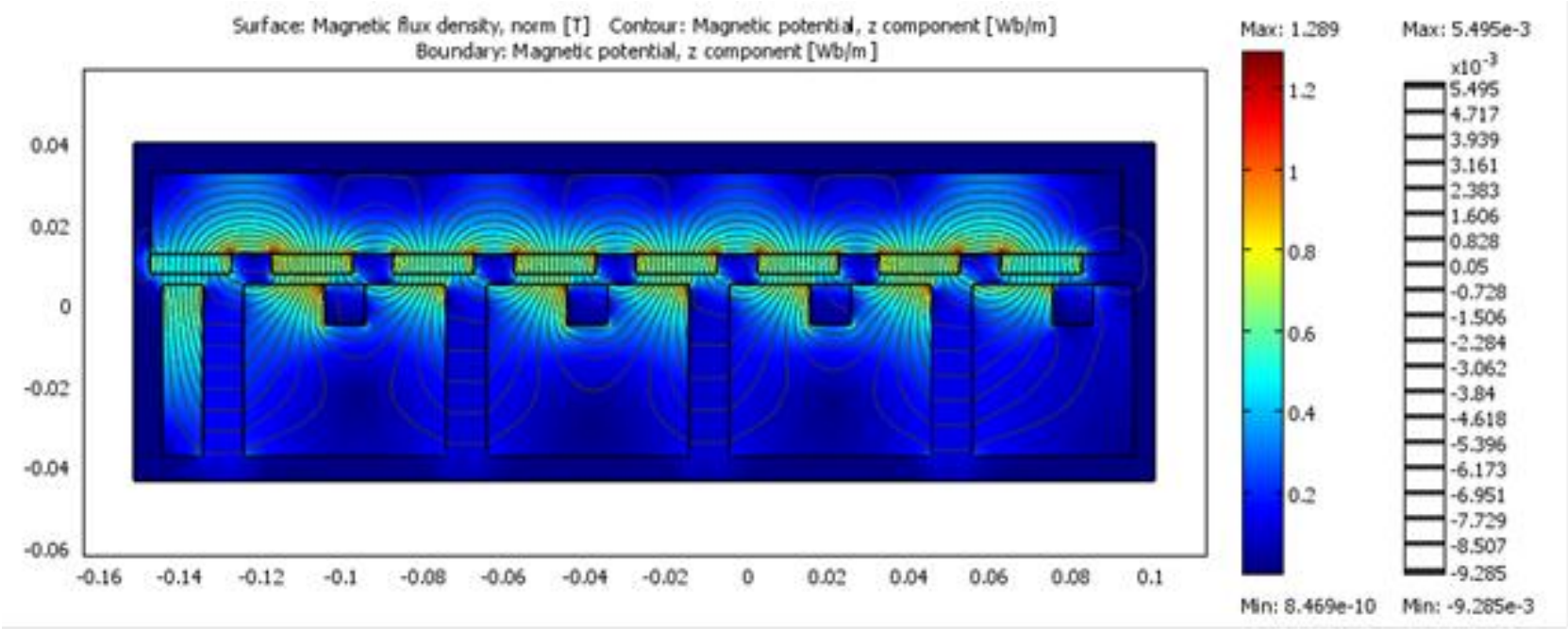
Design von Transversalflussmaschinen am Beispiel des Servax Motors (1)







Feldbild des Servax Motors (FE Modell)

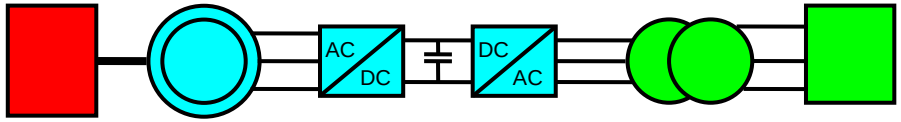


Hauptproblem:
Festlegung der Maschinengeometrie mit dem Ziel

- minimaler Streufluss und
- maximaler magnetisch wirksamer Querschnitt der Pole

Verlustminimierung durch Regelung der elektrischen Generatorgrößen

Verlustminimierung des PMSM-Generators



Turbine

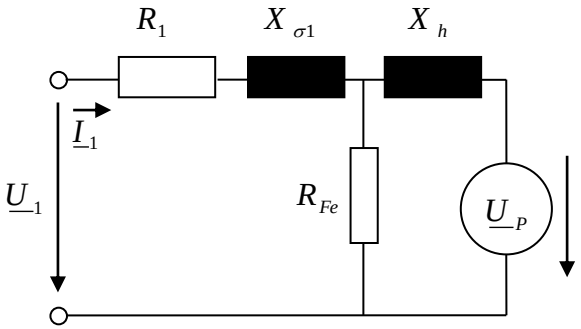
Ersatzschaltbild der Synchronmaschine ohne Eisenverluste

$R_1, X_{\sigma 1} << X_h$

↓

Eisenverluste sind näherungsweise spannungsproportional

↓

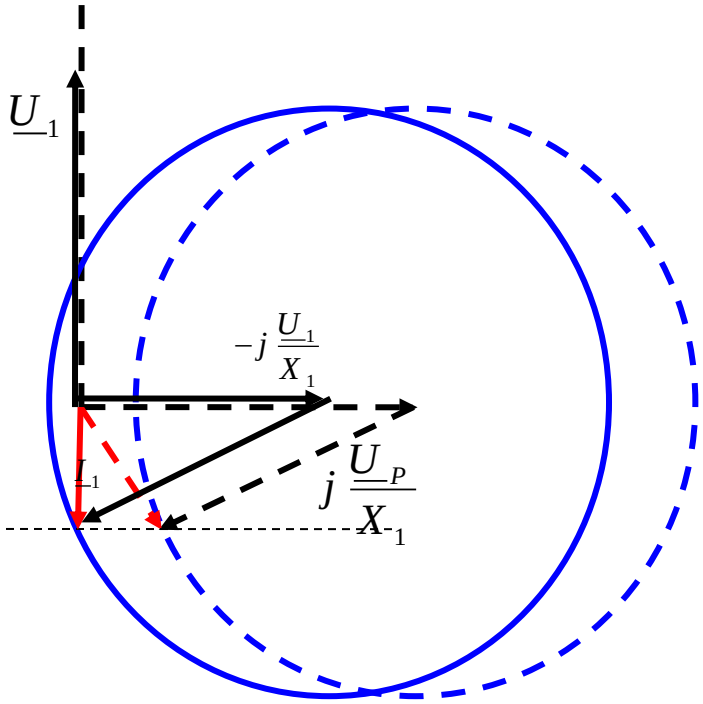


Übererregung (kapazitiver Strom durch Spannungsverringerung) reduziert Eisenverluste und erhöht Kupferverluste

Es existiert eine Ständerspannung, bei der die Gesamtverluste minimal sind

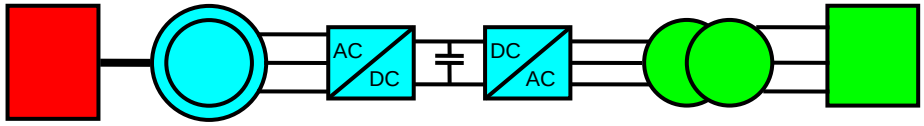
Optimierung des Pulsmusters des maschinenseitigen Gleichrichters bei blockförmiger Spannungssteuerung

Regelung der Ständerspannung unter dem Gesichtspunkt der Verlustminimierung (Eisen- und Kupferverluste) durch Spannungspulsung



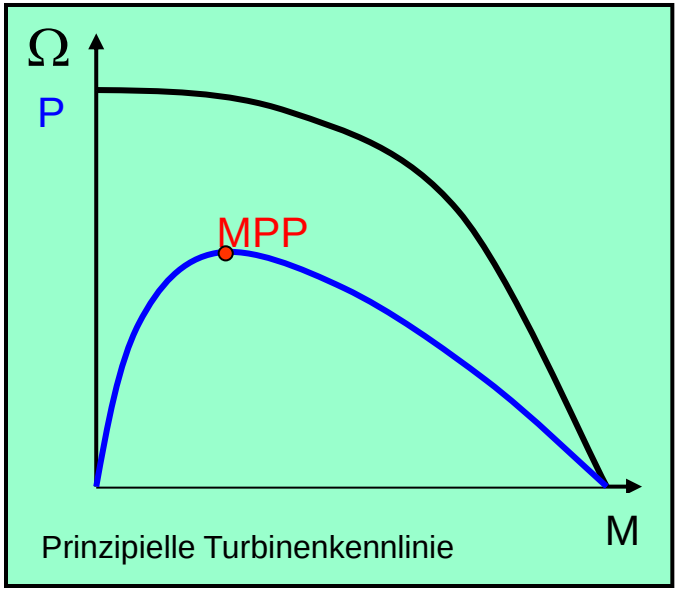
Maximum-Powertracking bei drehzahlvariablen Genratoren

Maximum Power Point Tracking (MPP) des Arbeitspunktes der Turbine



Turbine

Online-Anpassung der Turbinendrehzahl, bei der die maximale Leistung abgegeben wird



Prinzipielle Turbinenkennlinie

Drehzahlgeregelter bzw. momenten-geregelter Generator nötig, der das Lastmoment oder die Generator-drehzahl so einstellt, dass die Turbine im MPP arbeitet

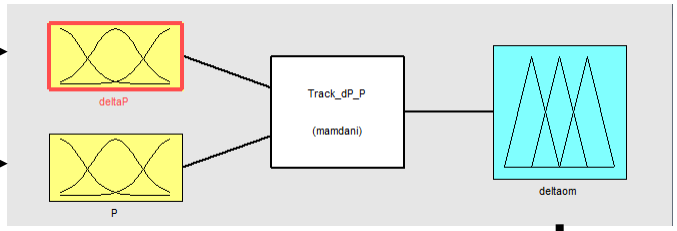
Einsatz von intelligenten Such-algorithmen, die das optimale Lastmoment bzw. die optimale Generatordrehzahl online unter verschiedenen Strömungsbedin-gungen ermitteln

Suchalgorithmen MPP

Fuzzy

Ist- Leistung

Leistungsänderung

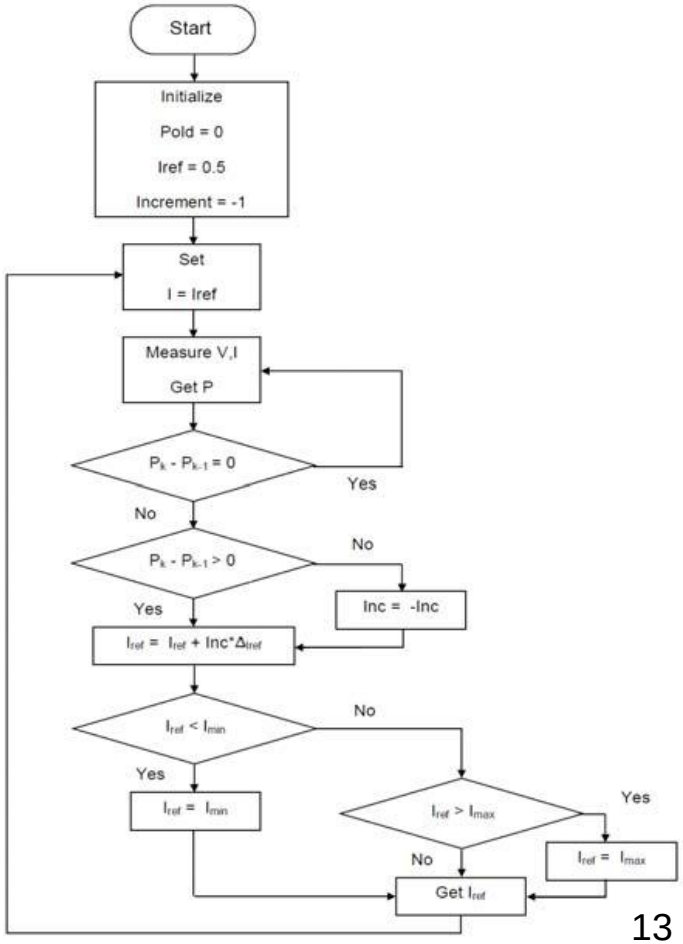


Drehzahl-/
Drehmomentsollwert

+ wissensbasierte Regelung
+ einfache Programmierung

- Implementierbarkeit

Perturb and Observation (P&O)
(stören und beobachten)



MPP Tracking durch Polynomapproximation der Lastkennlinie

Nachteile konventioneller Suchalgorithmen

- **Sie basieren auf Änderungen der Eingangsgröße. Dadurch wird das System zur Parameteranpassung stets aus dem stationären Arbeitspunkt ausgelenkt. Diese Auslenkung kann durch eine Änderung von inneren Prozessgröße oder durch bewusste Einprägung einer Störgröße von außen erfolgt sein.**

- **Die Auswertung von Änderungen des Arbeitsarbeitspunktes bedingt eine Differentiation, was mit einer Erhöhung der Störempfindlichkeit einhergeht.**

Alternative zu konventioneller Suchalgorithmen

- **Aufnahme der Lastkennlinie M=f(n) zu Beginn der Inbetriebnahme.**

- **Näherung der Kennlinie durch ein Polynom z. B. nach dem Prinzip der kleinsten Quadrate und Berechnung der Leistungskurve P=f(M) oder P=f(n).**

- **Analytische Bestimmung des MPP auf der Leistungskurve.**

- **Einstellung des analytisch gefundenen optimalen Arbeitspunktes am Wasserrad bzw. Generator.**

- **Bei signifikanten Abweichungen des Arbeitspunktes von der Polynomkennlinie erneute Aufnahme der Kennlinie um den Arbeitspunkt.**

MPP Tracking durch Polynomapproximation der Lastkennlinie

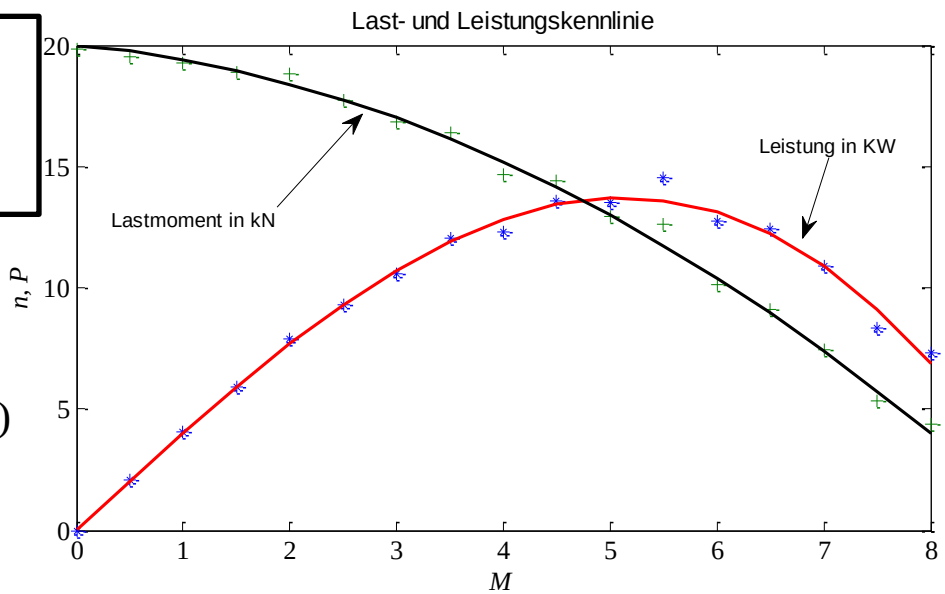
Vorteile der Polynomapproximation

- **Differentiation des Arbeitspunktes wird umgangen.**
- **Vermeidung von Suchbewegungen, statt dessen Neujustierung der Kennlinie in größeren Zeitabschnitten bzw. bei signifikanten Änderungen.**
- **Reduzierung von Messfehlern durch Approximation der Kennlinie nach den kleinsten Fehlerquadraten**

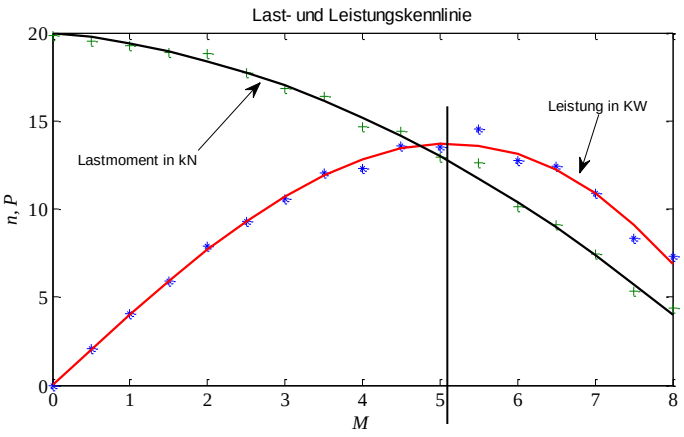
Approximation der Lastkennlinie durch ein Polynom 3. Ordnung und der Leistungskennlinie durch ein Polynom 4. Ordnung

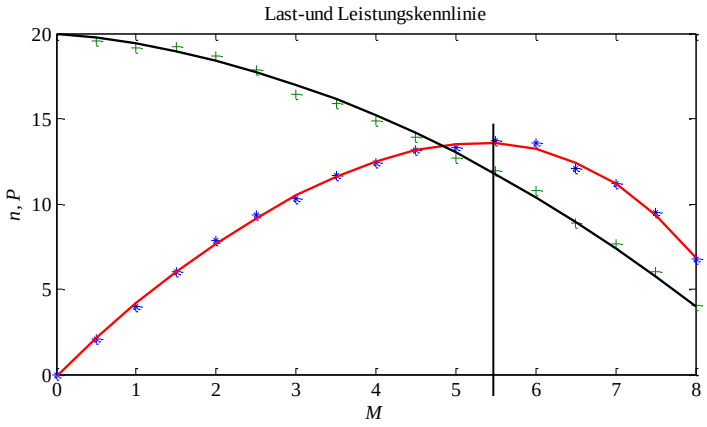
$$n = n_0 - a*M - b*M^2 - c*M^3$$

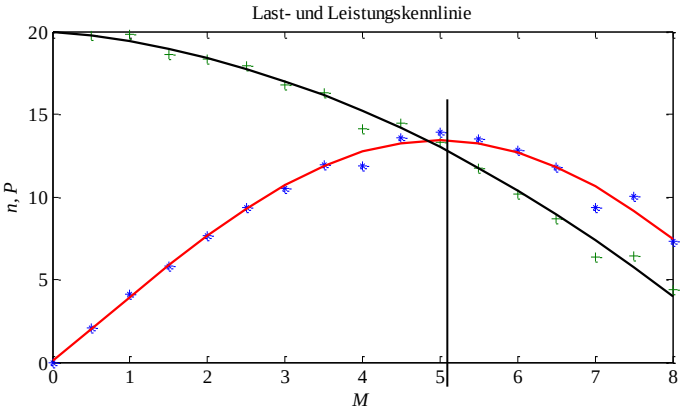
$$P = \frac{2\pi}{60}(n_0*M - a*M^2 - b*M^3 - c*M^4)$$

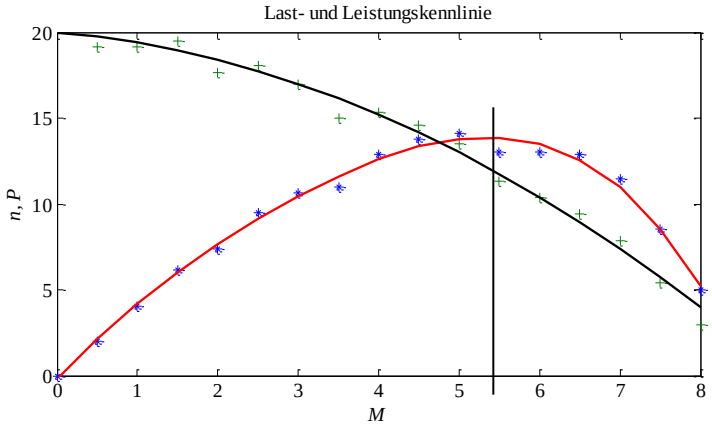


Kennlinien bei unterschiedlichen zufälligen Messfehlern

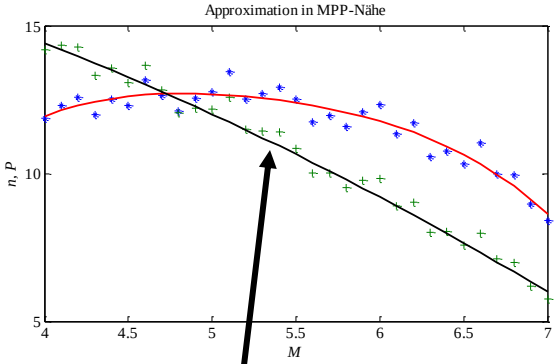




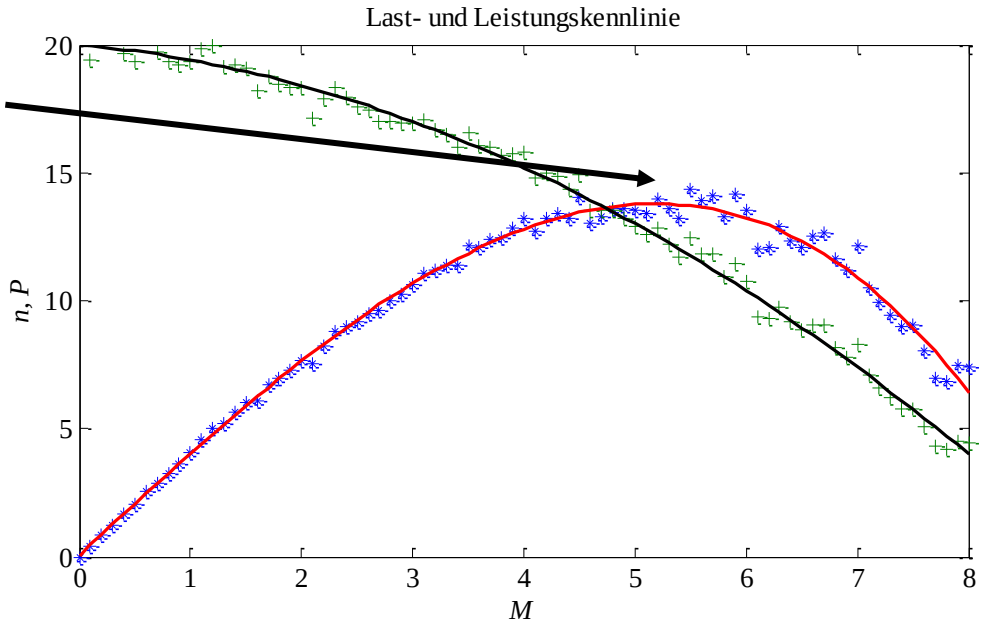


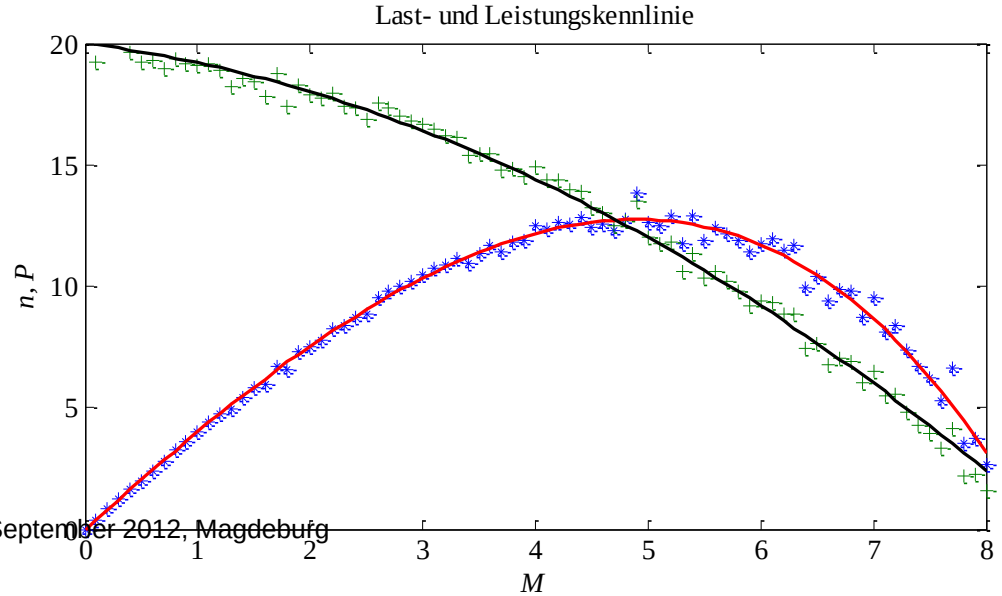


Kennlinien bei unterschiedlichen zufälligen Messfehlern und größerer Anzahl an Messwerten



Nahezu linearer Verlauf der Lastkennlinien in der Umgebung des MMP





Schlussfolgerungen

- **Transversalflussgeneratoren zeichnen sich gegenüber anderen Lösungsmöglichkeiten durch eine höhere Momentendichte aus und sind deswegen für getriebelose Ausführungen besonders gut geeignet**

- **Durch Anpassung der Drehzahl bzw. des Lastmomentes des Generators kann die Turbine unabhängig von den jeweiligen Strömungsbedingungen mit maximalem Wirkungsgrad (Maximum Power Point) betrieben werden.**

- **Die Generatorverluste lassen sich durch regelungstechnische Maßnahmen minimieren. Dadurch steigt der Wirkungsgrad und die thermische Belastung sinkt.**

- **Zur Verlustminimierung muss der Generator im leicht übererregten Zustand betrieben werden. Der energieoptimale Arbeitspunkt kann über die Generatorspannung eingestellt werden. Hierzu dienen spezielle online Suchalgorithmen im Sinne einer Extremwertregelung.**