

Zahnformen in mechanischen Kleinuhren

Berechnung, Optimierung und Messung geometrischer und kinematischer Eigenschaften

Feinwerktechnische Konstruktion 2014

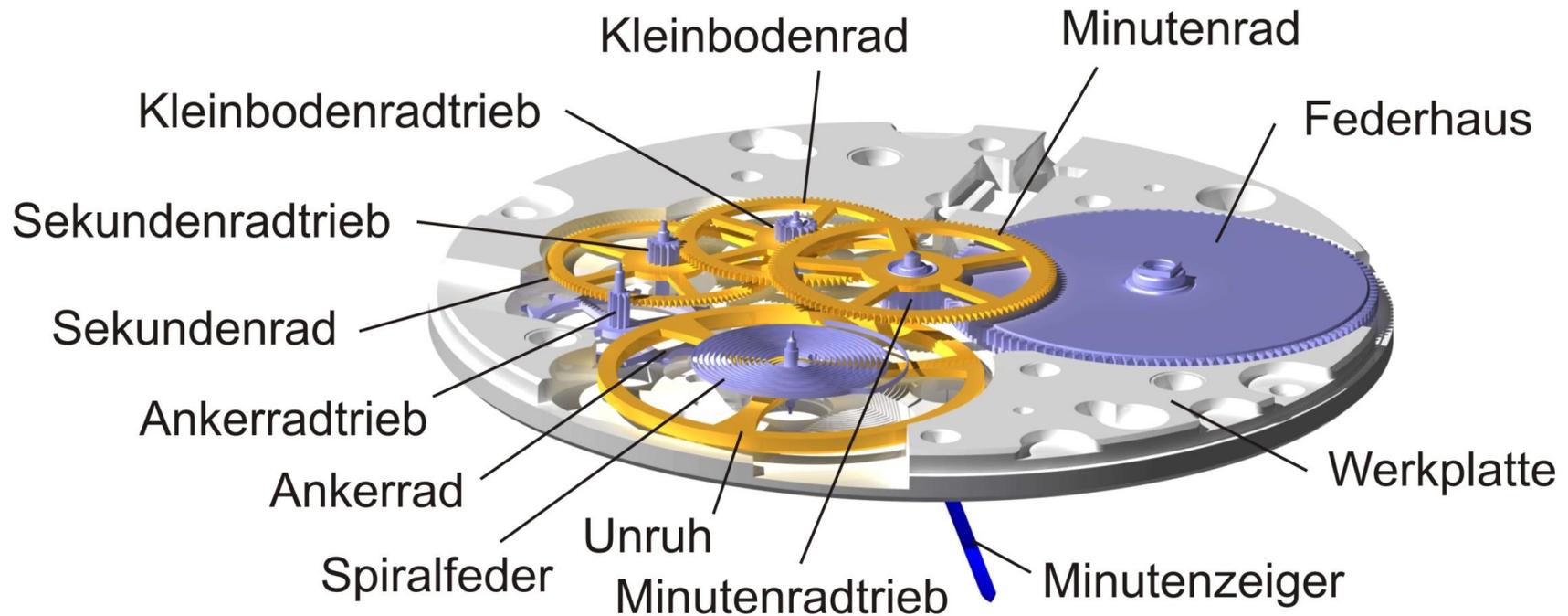
Prof. Dr.-Ing. Berthold Schlecht | Dipl.-Ing. Benjamin Röseler |
Dipl.-Ing. Lutz Reichel (Fa. NOMOS Glashütte/SA.)

Dresden, 05. November 2014



- Einleitung
 - Aufbau und Funktion
 - Anforderungen an Uhrenverzahnungen
- Verzahnungsanalyse
 - Geometrische und kinematischen Eigenschaften
 - Drehmoment- und Amplitudenmessungen
- Verzahnungsoptimierung
 - Ableitung von Verzahnungen mit geringer Drehmomentenschwankung
- Zusammenfassung und Ausblick

- Uhrwerk einer mechanischen Kleinuhr bestehend aus vier Zahnradstufen und Schwingungssystem ohne dargestellter Hemmung:

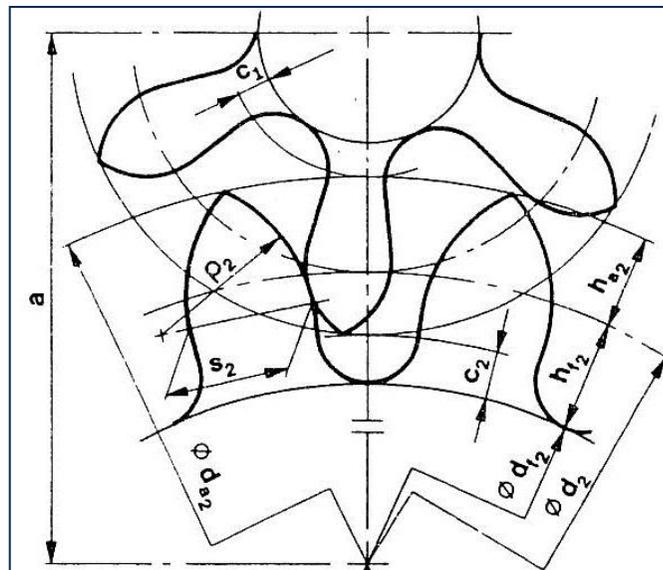


- Anforderungen an Uhrwerksverzahnungen:
 - Große Übersetzung in einer Stufe
 - Geringe geforderte Zähnezahl amtrieb
 - Geringe Verluste infolge von Reibung
 - Möglichst **konstantes momentanes Momentenverhältnis** über dem Zahneingriff
 - Unempfindlich gegenüber **Achsabstandsänderungen**
 - Selbsthemmung darf nicht auftreten
 - Großes Flanken- und Kopfspiel
- Anwendung von **Pseudozykloiden-** oder **modifizierten Evolventenverzahnungen**

- Einleitung
 - Aufbau und Funktion
 - Anforderungen an Uhrenverzahnungen
- Verzahnungsanalyse
 - Geometrische und kinematischen Eigenschaften
 - Drehmoment- und Amplitudenmessungen
- Verzahnungsoptimierung
 - Ableitung von Verzahnungen mit geringer Drehmomentenschwankung
- Zusammenfassung und Ausblick

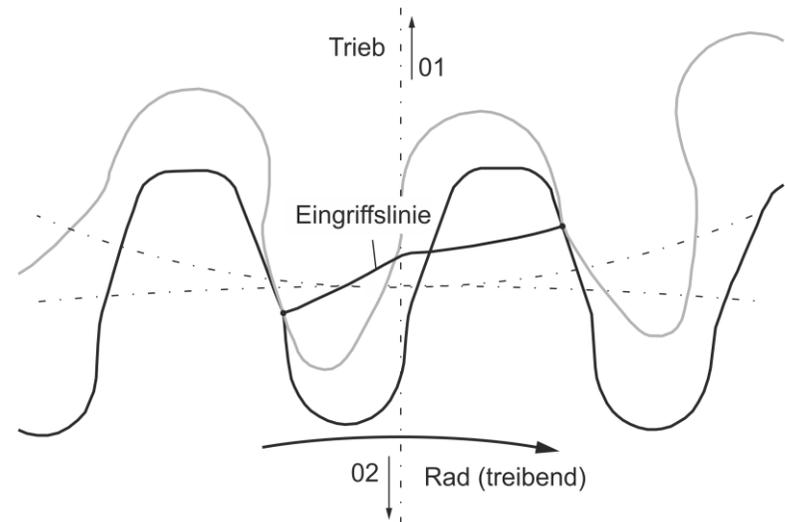
- **Kreisbogenverzahnungen:**

- Zahnkopfflanke entspricht einem Kreisbogen, Zahnfußflanke einer radial verlaufenden Geraden

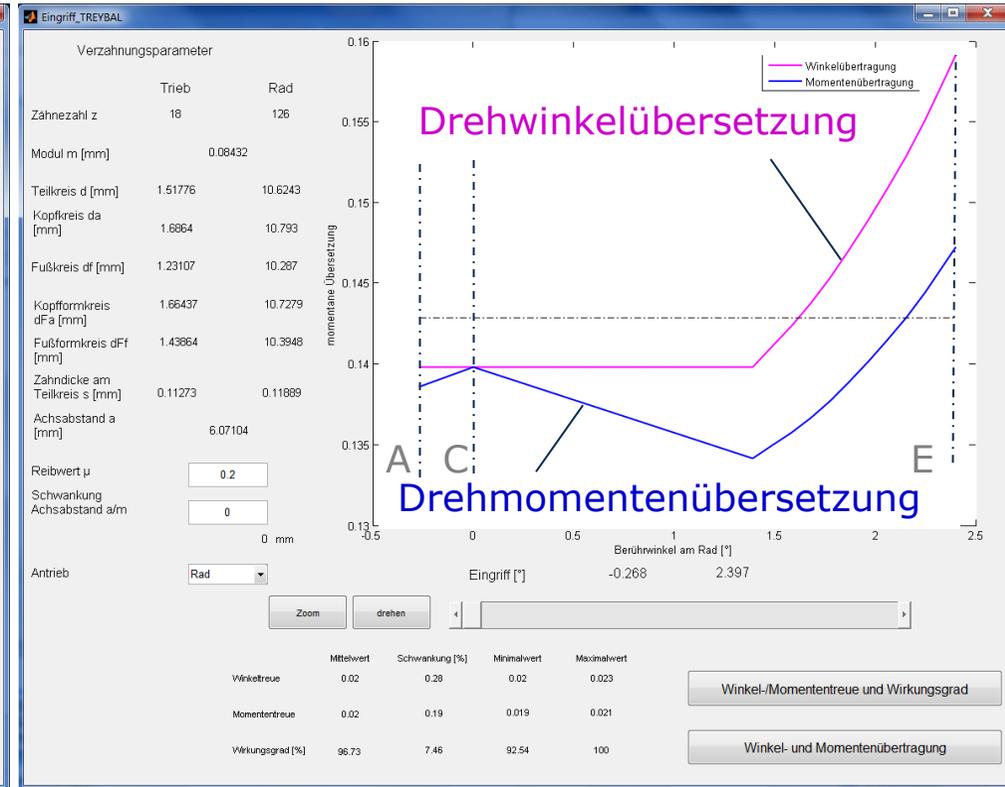
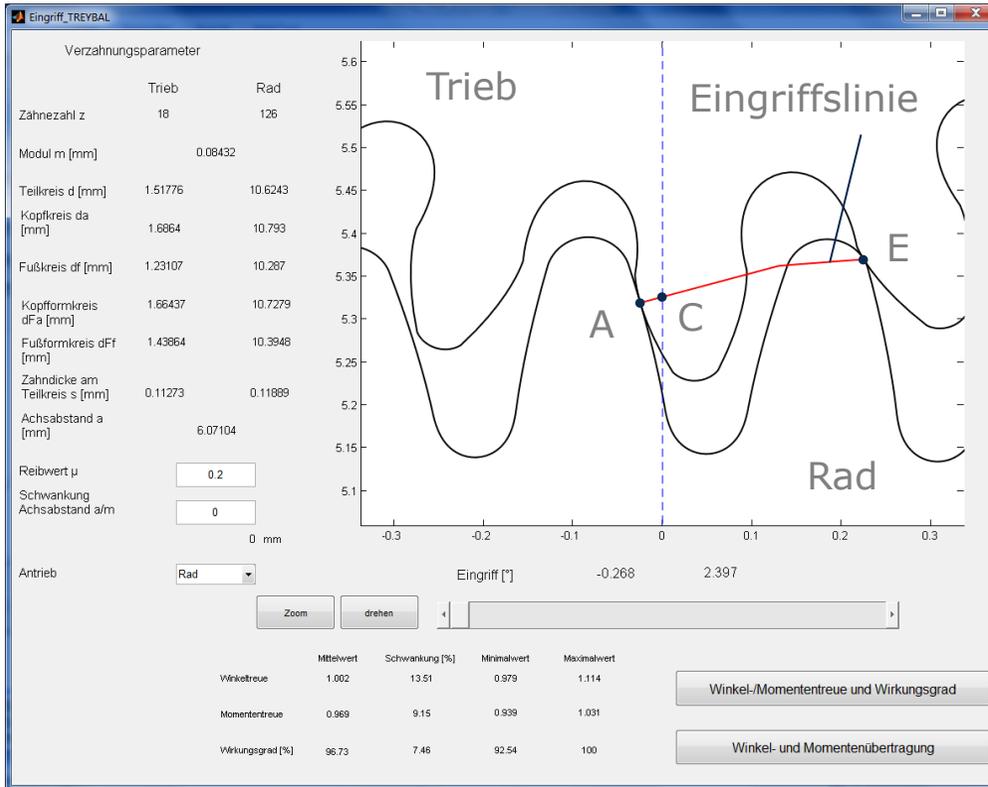


- **Modifizierte Evolventenverzahnungen:**

- 1. Modifikation: unterschiedliche Eingriffswinkel der paarenden Räder
- 2. Modifikation: unterschiedliche Eingriffswinkel an der treibenden Radflanke in Kombination mit einer kreisbogenförmigen Triebflanke

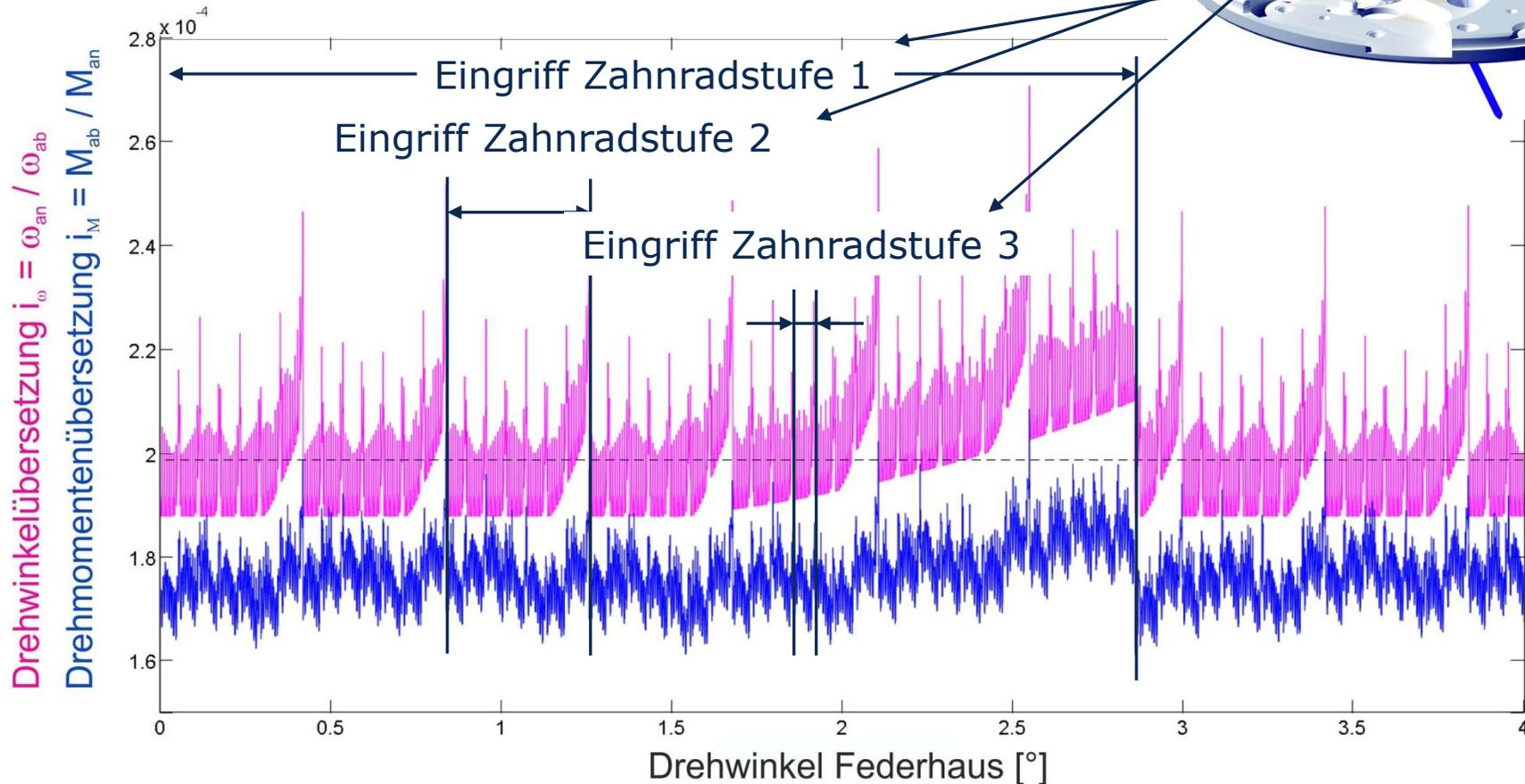
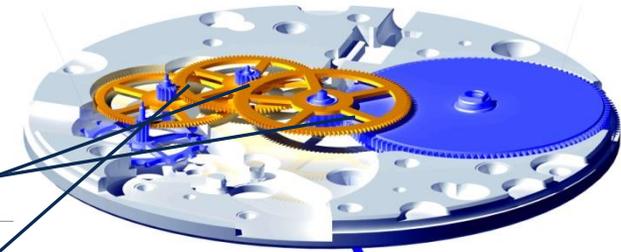


- Berechnung der geometrischen und kinematischen Eigenschaften:
 - Eingriffslinie
 - Drehwinkel- und Drehmomentenübertragung



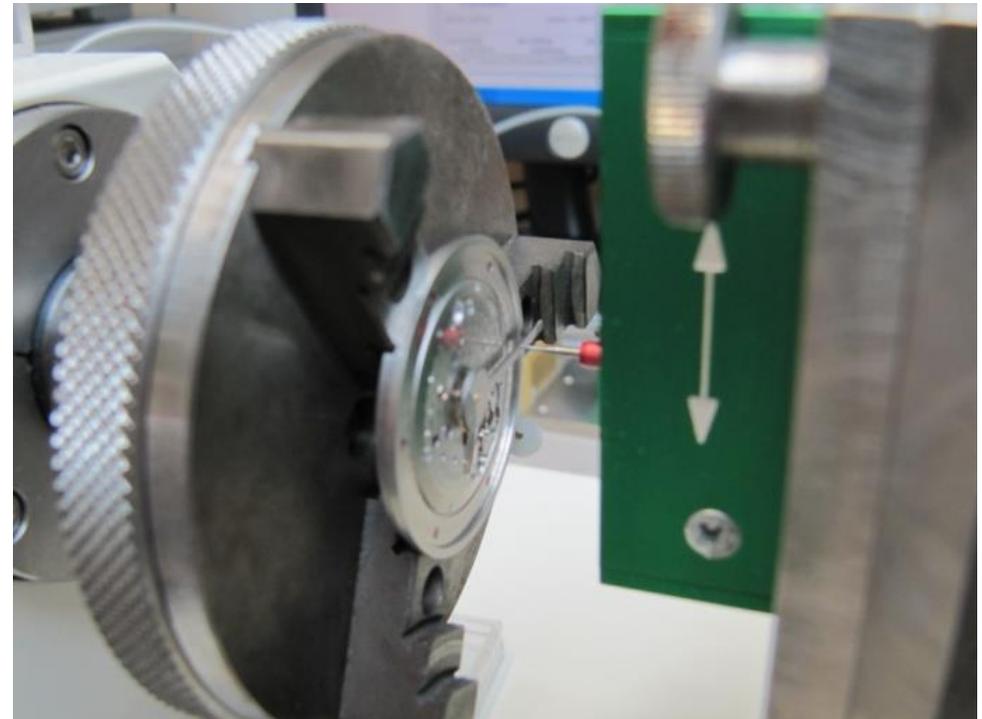
- Ermittlung der Gesamtübersetzungen der Räderkette (ohne dem Einfluss des Flanken- und Lagerspiels)

Ankerrad (Abtrieb) Federhaus (Antrieb)

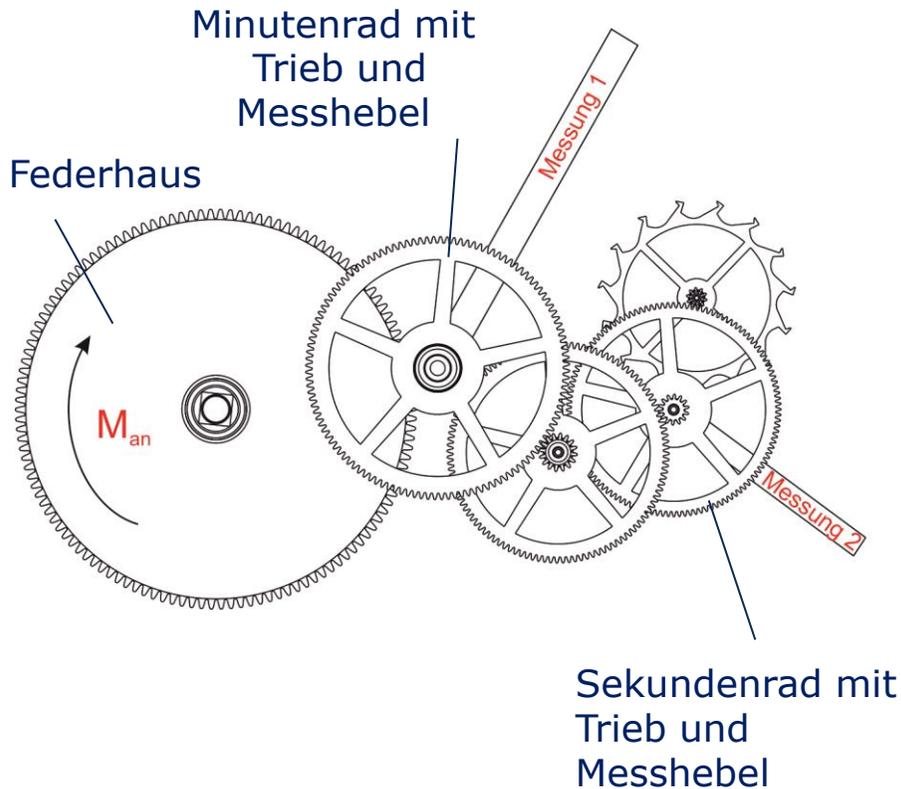


- Drehmomentmessung

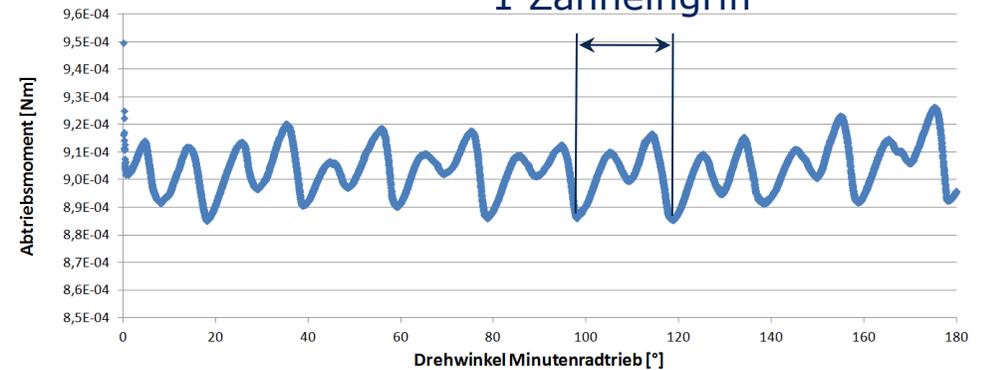
- Drehmomente im Bereich $1,1E-03$ Nm bis $1,8E-05$ Nm
- Messung indirekt mittels Kraftaufnehmer an einem definierten Hebelarm
- Messbereich des Sensors $\pm 0,1$ N, Messauflösung $\Delta F_{LC-01} < 10 \mu\text{N}$
- Messung erfolgt „quasistatisch“



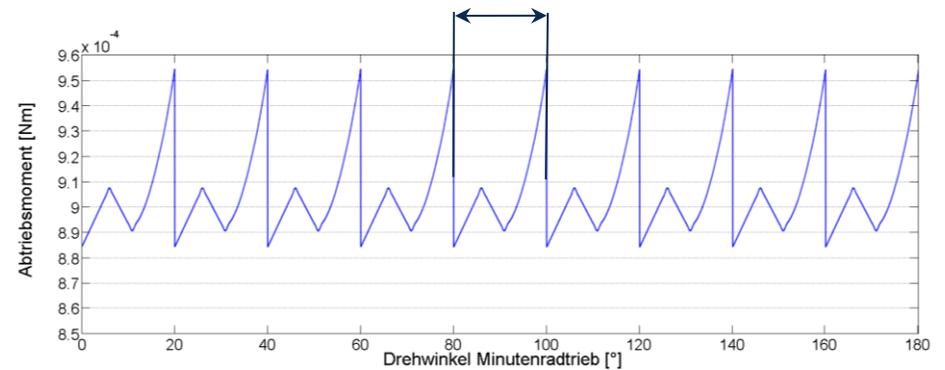
- Vergleich der theoretisch berechneten kinematischen Eigenschaften mit Messdaten:
 - Drehmomentmessungen über einzelne Zahnradstufen



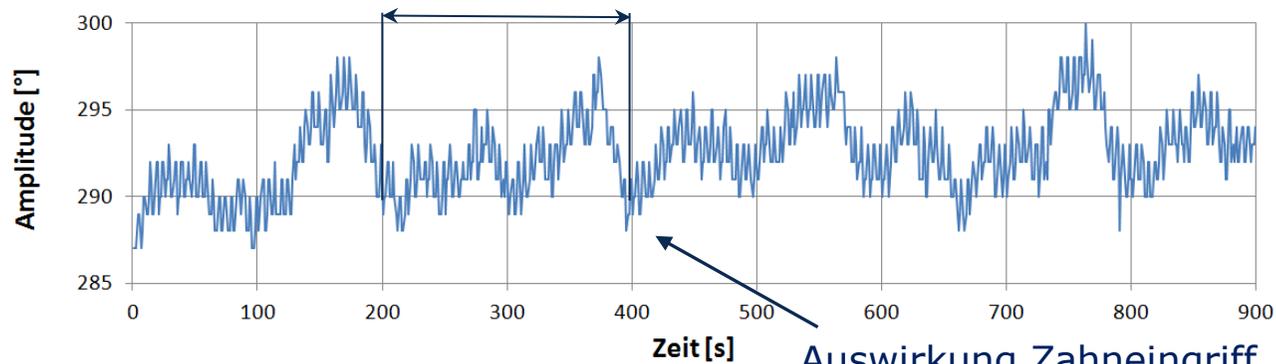
Messung über eine Zahnradstufe:
1 Zahneingriff



Simulation:
1 Zahneingriff

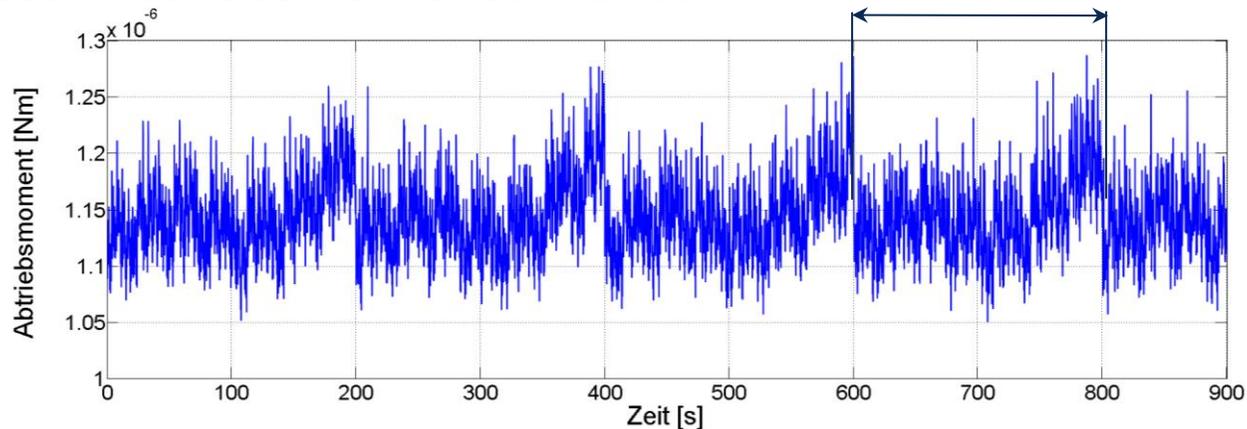


- Vergleich der theoretisch berechneten kinematischen Eigenschaften mit Messdaten:
 - Amplitudenmessungen des Schwingungssystems

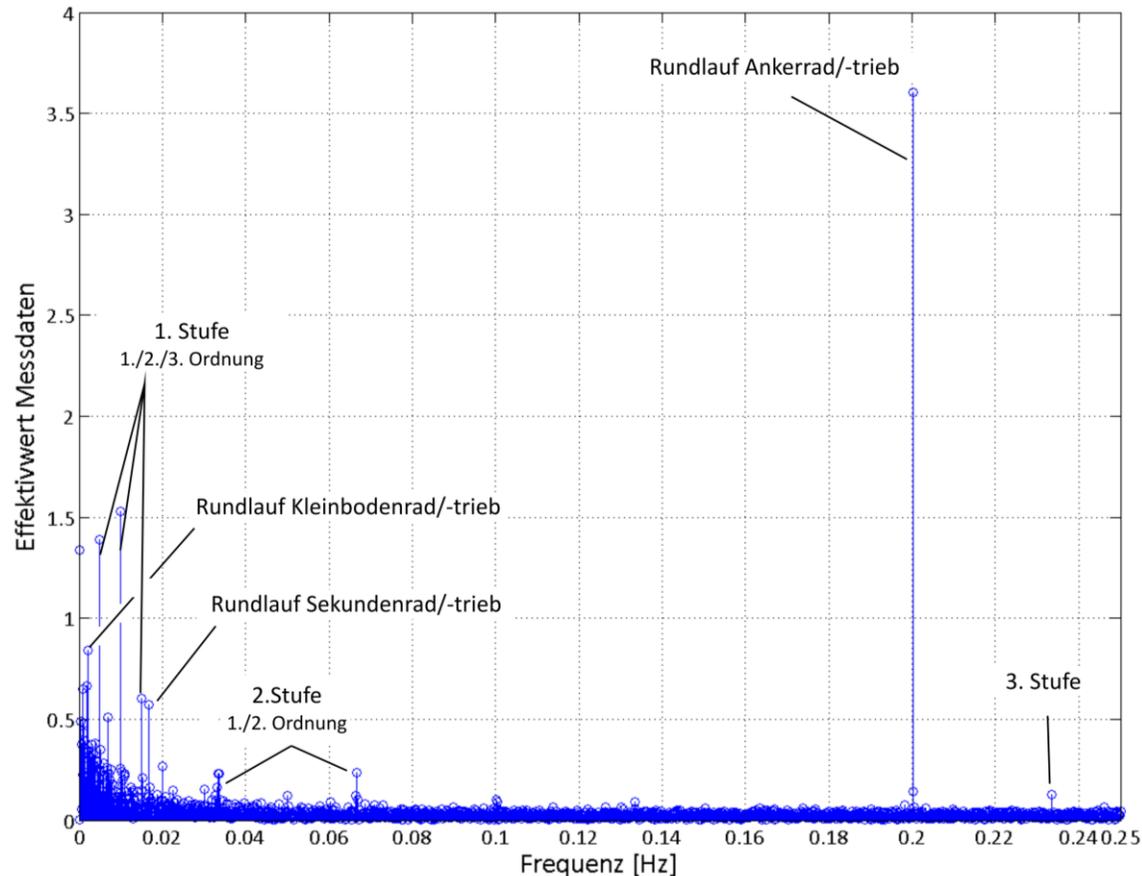


Auswirkung Zahneingriff
Federhaus-Minutenradtrieb

- Berechneter Abtriebsmomentenverlauf



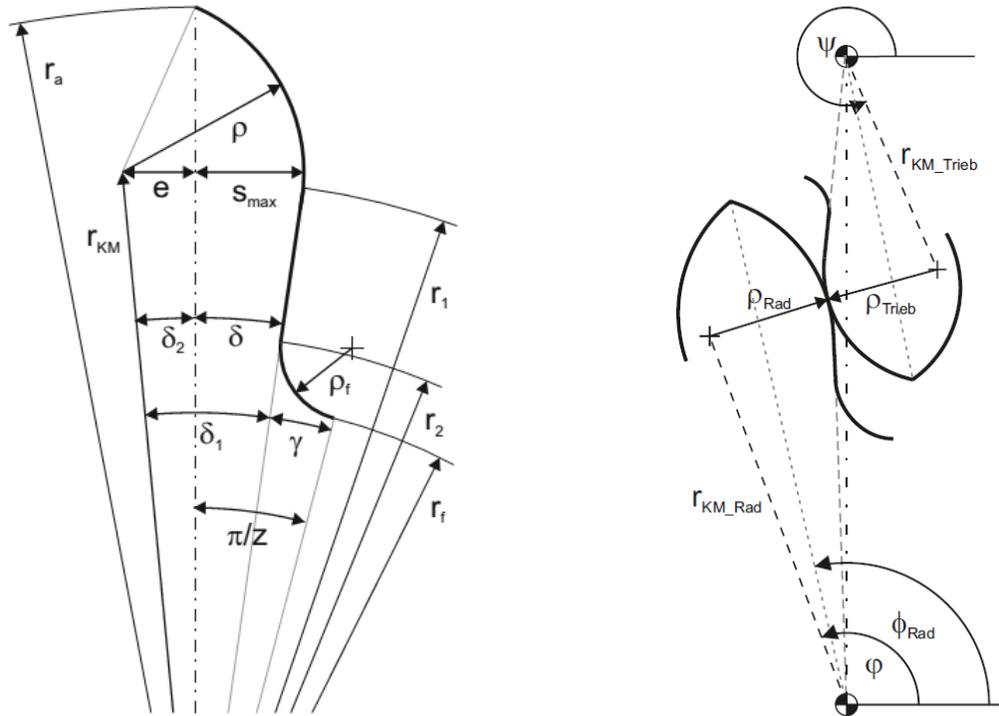
- Auswertung der Amplitudenmessung mittels einer DFT – Analyse
 - Amplitudenschwankungen durch Rundlauffehler
 - Amplitudenschwankungen durch Zahneingriff der Räder



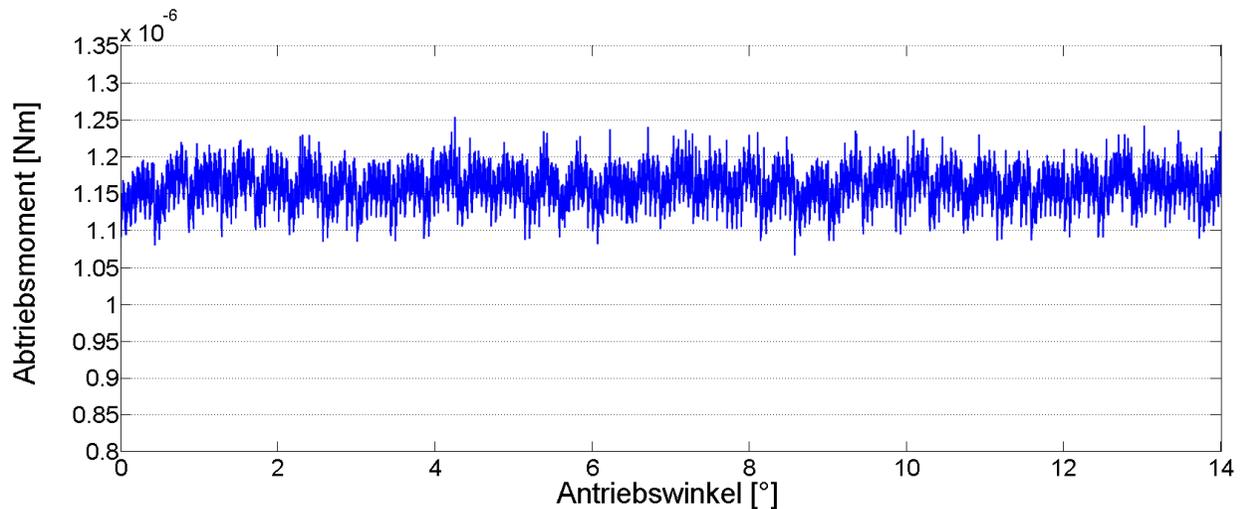
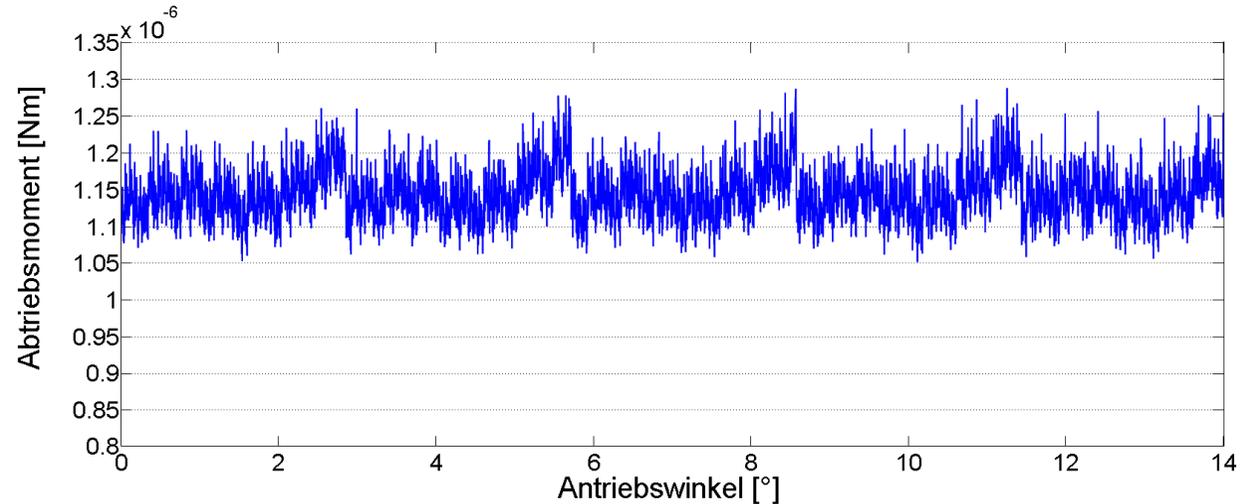
- Einleitung
 - Aufbau und Funktion
 - Anforderungen an Uhrenverzahnungen
- Verzahnungsanalyse
 - Geometrische und kinematischen Eigenschaften
 - Drehmoment- und Amplitudenmessungen
- Verzahnungsoptimierung
 - Ableitung von Verzahnungen mit geringer Drehmomentenschwankung
- Dynamische Simulation des Räderwerkes
- Zusammenfassung und Ausblick

- Grundidee:
 - Vorgabe der Drehmomentenkennlinie
 - Berechnung optimaler Profilformen
 - Herstellung der angepassten Zahnräder
- Festlegungen:
 - Konstanter Reibwert und Achsabstand
 - Treibendes Rad mit evolventischer oder kreisbogenförmiger Flankenform
 - Mathematisch beschreibbarer Verlauf der Drehmomentenübersetzung über einem Zahneingriff
- Aufgabe:
 - Berechnung eines optimierten Triebprofils
 - Berechnung des Wälzfräserbezugsprofils

- **Parametervariationen** an Kreisbogenverzahnungen zur Ermittlung optimaler Geometrieparameter mit dem Ziel einer Drehmomententreuen Übertragung
- Berechnung der kinematischen Eigenschaften über **Koppelgetriebe** bei konstantem Achsabstand und konstantem Reibwert



- Bisheriger Verlauf des Abtriebsmomentes
- Verlauf des Abtriebsmomentes nach der Optimierung
- Verringerung der Drehmomentenschwankung um nahezu 50%



- Einleitung
 - Aufbau und Funktion
 - Anforderungen an Uhrenverzahnungen
- Verzahnungsanalyse
 - Geometrische und kinematischen Eigenschaften
 - Drehmoment- und Amplitudenmessungen
- Verzahnungsoptimierung
 - Ableitung von Verzahnungen mit geringer Drehmomentenschwankung
- Dynamische Simulation des Räderwerkes
- Zusammenfassung und Ausblick

- Simulationssoftware zur **Analyse, Bewertung und Vergleich** von typischen Verzahnungen in der Uhrentechnik
- Berechnung von geometrischen und kinematischen Eigenschaften
- Vergleich der Eigenschaften mit **Messwerten** (Drehmoment, Amplitude, Zahnprofil)
- Optimierung der Zahnprofilform hinsichtlich einer **gleichbleibenden Drehmomentenübertragung**

Technische Universität Dresden
Fakultät Maschinenwesen
Institut für Maschinenelemente und
Maschinenkonstruktion
Lehrstuhl Maschinenelemente

Münchner Platz 3
D-01062 Dresden

www.me.tu-dresden.de



»Wissen schafft Brücken.«

