

Funktions- und gewichtsoptimierte Zahnräder - additiv durch selektives Laserschmelzen hergestellt

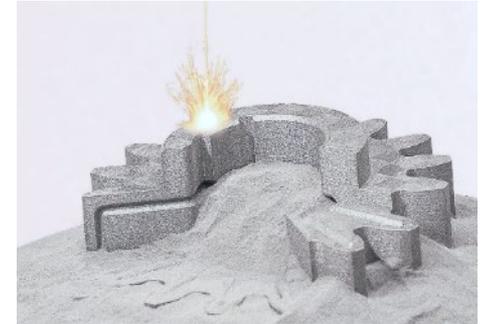
Hans-Jörg Dennig, Andreas Kirchheim, Simon Winterberg, Livia Zumofen

Zentrum für Produkt- und Prozessentwicklung ZPP

Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften ZHAW

Daniel Stierli, Michael Waldburger

RENK-MAAG GmbH

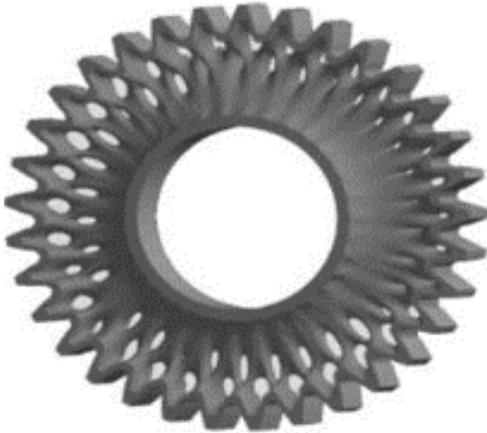


AM Network Tagung: Additive Fertigung in Forschung und Praxis - 24.10.2019 ETH Zürich

- Einführung
- Vorstellen der Partner
- Das Projekt
- Basisversuche zur additiven Fertigung in Vergütungsstahl
- Additiv gefertigte Getriebekomponenten
- Zusammenfassung und Ausblick

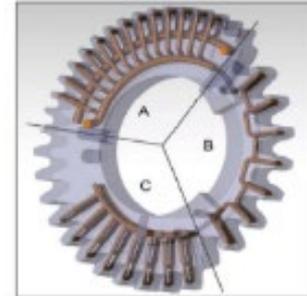


- **Leichtbau** durch komplexe Strukturen
 - Gitterstrukturen
 - Bionische Strukturen



- **Funktionsintegration**

- Bauteilintegration, (Reduktion Bauteilanzahl)?
- Bauteilkühlung
- Optimierung Schmierung



- Max Maag gründete 1913 die **MAAG Zahnräder AG** in Zürich. Er entwickelte die heute weltweit als Standard eingesetzte Evolventenverzahnung.



Renk-Maag GmbH, Winterthur (Schweiz)

- ist ein führender Hersteller von Hochleistungs-Getrieben und Kupplungen, basierend auf der weltweit bekannten MAAG-Technologie.
- unterhält einen weltweiten Unterhalts- und Reparatur-Service für alle RENK-MAAG-Produkte und MAAG-Turbo- und Marinegetriebe wie auch für sämtliche Kupplungen.
- gehört zum RENK-Konzern (Augsburg/ Deutschland)



Turbo-Stirnradgetriebe



MULTICOM®-Getriebe GMX

(Integral-Kompressor-Getriebe)



Gross-Planetengetriebe



Synchronkupplungen

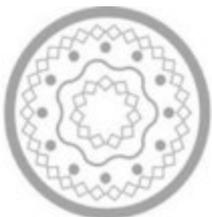


Zahnkupplungen



Kombi- und Spezialgetriebe





Vision



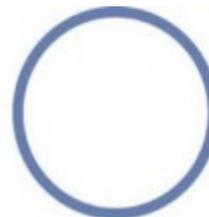
Innovation



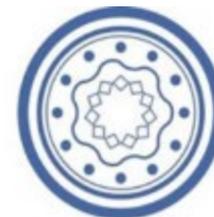
Development



Prototypes



Realisation



Product

**Innovation
Playground**



**Innovation
Development**



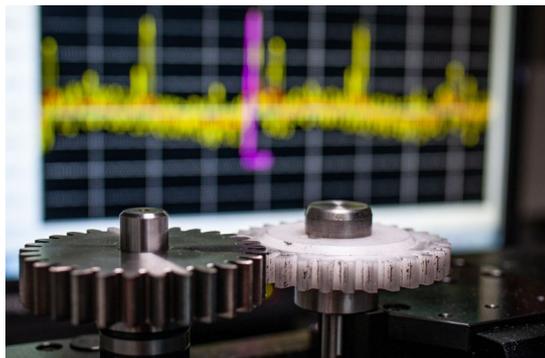
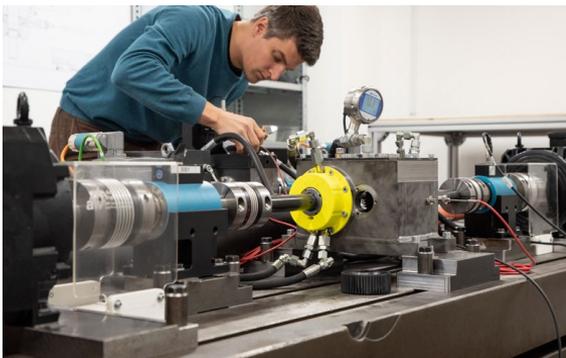
3D-Experience



**Advanced Production
Technologies
Additive Manufacturing**



Getriebeforschung



Getriebeforschung

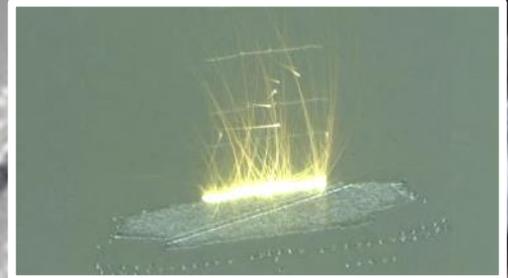
Die ZPP-Arbeitsgruppe «Getriebetechnik» verfügt über Expertise in der Auslegung von Maschinenelementen, insbesondere **Zahnradern aus Stahl und Kunststoff**.

Für Forschungs- und Dienstleistungsprojekten stehen dazu zahlreiche Prüfstände, Fertigungs- und Messmaschinen sowie die geeigneten Berechnungsprogramme zur Verfügung.

[Flyer Getriebetechnik](#)

- Auslegen von Zahnradern mit KISSsoft
- Erstellung von **KISSsoft Materialdaten**
- FEM-Berechnungen mit Ansys
- Strukturoptimierung des Zahnradkörpers mit TOSCA
- Kundenspezifische Prüfstandsentwicklung
- Vermessen von Zahnradern (Zweiflankenwälzprüfung, Zahnweitenmessung, Bildgebende/taktile Vermessung)
- Prüfung in Bezug auf Schadensarten
- Durchführbarkeit von Schmierstoffprüfungen mit **FZG-A und FZG-C Verzahnung**
- Analyse der Schadensarten
- Prüfungen nach **VDI 2736**
- Herstellung von Stirn- und Kegelrädern mit EUKLID

- **Angepasste Produktentwicklung für die additive Fertigung**
- **Wirtschaftliche und technische Machbarkeitsstudien**
- **Maschinenentwicklung für die additive Fertigung**
- **aF&E-Projekte zur Produkt- und Prozessentwicklung in der additiven Fertigung**
- **Unterstützung in Form von Workshops und Schulung bei der Einführung der additiven Fertigung**
- **Allgemeine und kundenspezifische Aus- und Weiterbildung zum Thema Additive Fertigung**

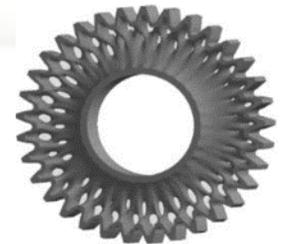


KTI-Nr. 25648.1 PFIW-IW

SLM-Zahnräder: Funktions- und gewichtsoptimierte Zahnräder, die mit dem Selective Laser Melting Verfahren (SLM) hergestellt werden

Umsetzungspartner
Renk Maag GmbH

Forschungspartner
**Zentrum für Produkt- und Prozessentwicklung ZPP
Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften ZHAW**



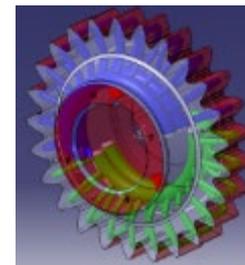
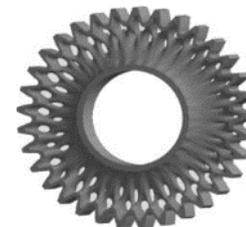
Selektives Laserschmelzen von Zahnrädern und Zahnradkomponenten

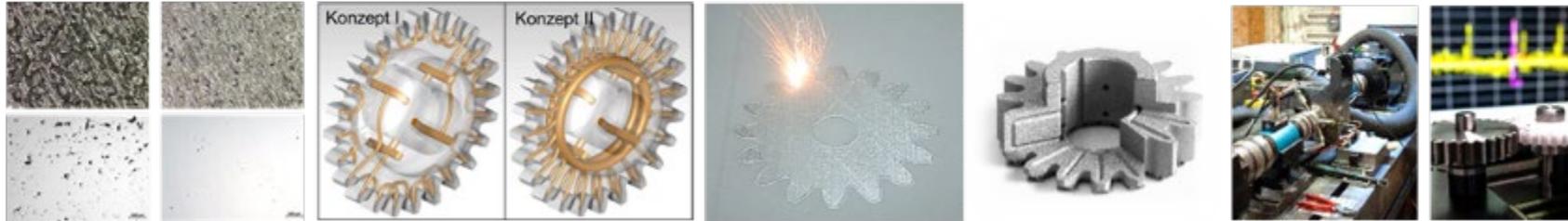
Kühlung

Schmierung

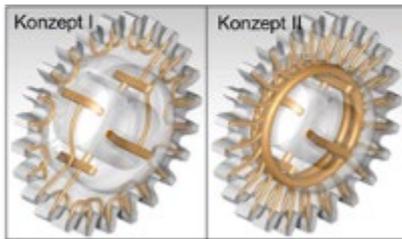
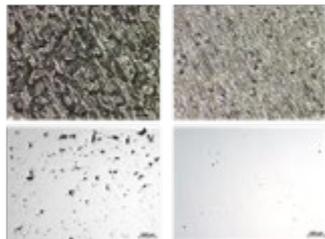
Topologie-
optimierung

- Leichtere und effiziente Antriebssysteme
- Kleinere Massenträgheitsmomente
- Effizienzsteigerung von Getrieben durch optimierte Gestaltung für Kühlung und Schmierung
- Reduzierter Schmiermittelverbrauch
- Entwicklung von im SLM-Verfahren hergestellten Zahnrädern in Vergütungsstahl (30CrNiMo8)
- Im Projekt soll dabei das Wissen im Bereich Zahnrad- und additiver Fertigung (Selektives Laser Melting SLM) kombiniert werden





- Prozessparameter für SLM-Zahnradmaterial 30CrNiMo8 entwickeln.
- Innenliegende Kanäle für Schmierung und Kühlung entwickeln und Zusammenhänge dieser verifizieren.
- Kraftfluss- und strukturoptimierte Auslegung und Prüfung der Zahnräder.



Herausforderungen:

- Zahnradwerkstoff Vergütungsstahl 30CrNiMo8 kein Standardmaterial für SLM
 - Entwicklung der Prozessparameter
- Schlecht Schweißbar: Neigung zu Rissbildung
 - Optimierung der Fertigungsstrategie, um Spannungen zu minimieren

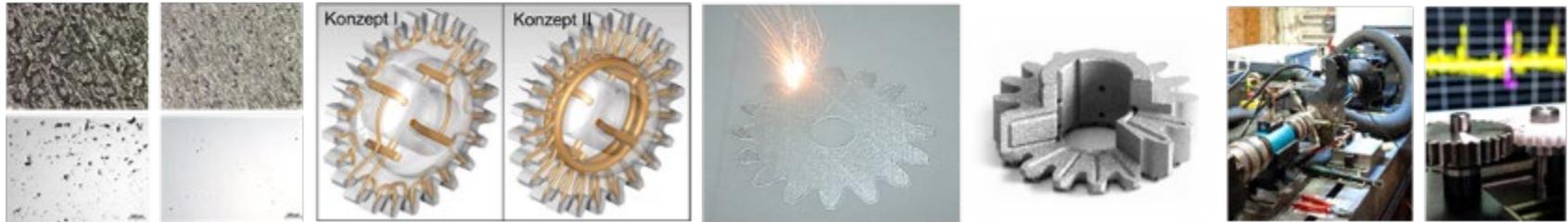
Mit additiver Fertigung zu innovativen Getriebekomponenten



Zahnrad



Zahnkupplung



Herausforderungen:

- Optimale Kühlung der Zahnräder
 - Entwicklung Kühlungskonzepte
 - Berechnung/Simulation
 - Funktionstests

Konzept

Berechnung/Simulation

Versuche

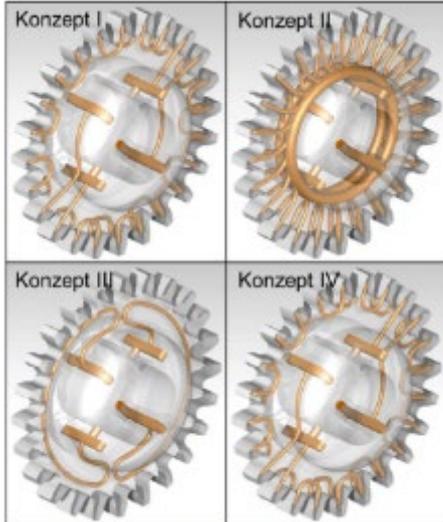


Abb. 3-15 Strömungsoptimierte Konzepte I bis IV

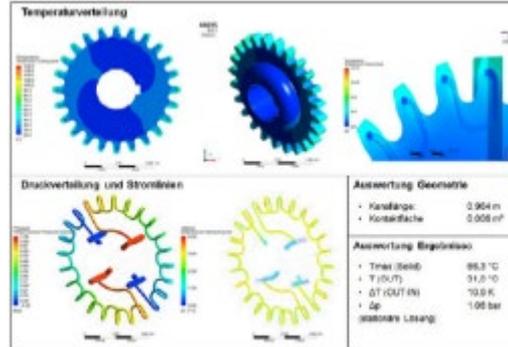


Abb. 3-26 CFD-Konzeptvergleich: Temperatur- und Strömungsverhalten Konzept I

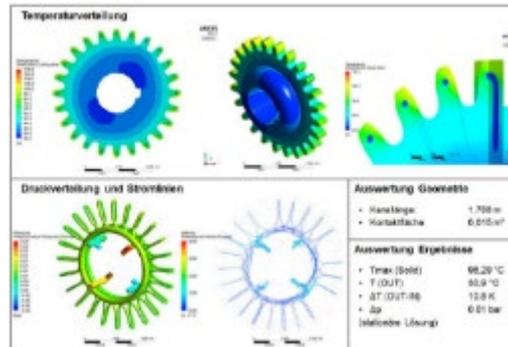


Abb. 3-28 CFD-Konzeptvergleich: Temperatur- und Strömungsverhalten Konzept II

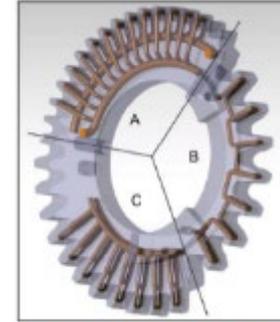


Abb. 3-39 Testbauteil: CAD-Darstellung mit Zuordnung der Zahngröße und des Kühlprinzips

Bereich	Modul	Kühlprinzip
-	[mm]	-
A	2,5	paralleler Kanalverlauf
B	4,5	serieller Kanalverlauf
C	3,5	Mischform aus seriellen und parallelem Verlauf

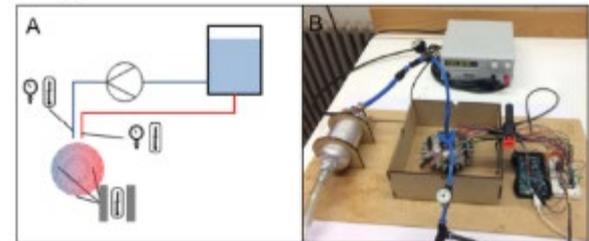
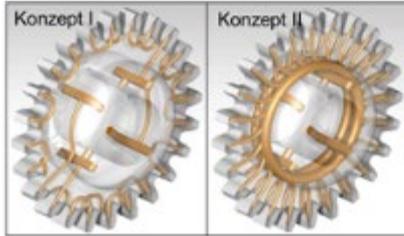
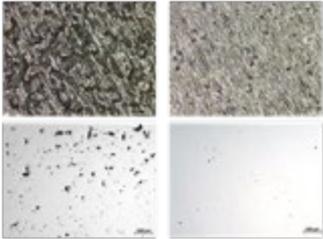
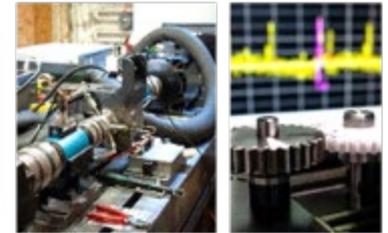
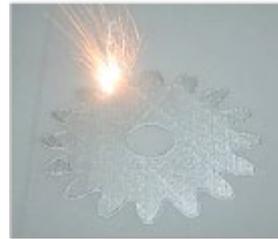
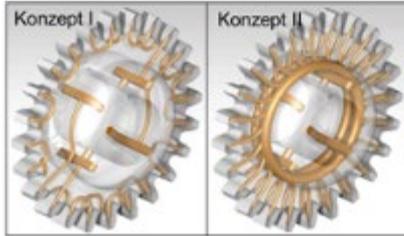
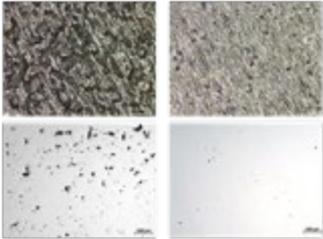


Abb. 3-46 schematischer (A) und praktischer (B) Aufbau des Funktionsprüfstands



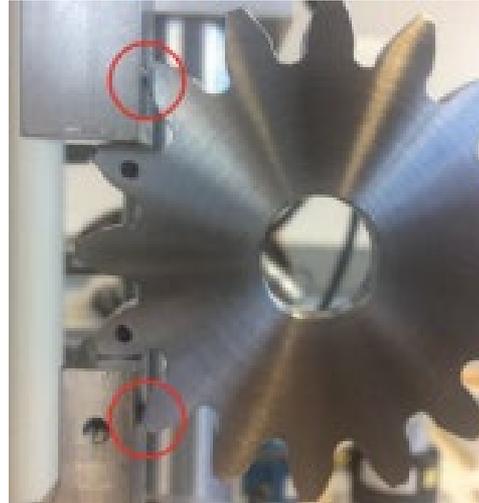
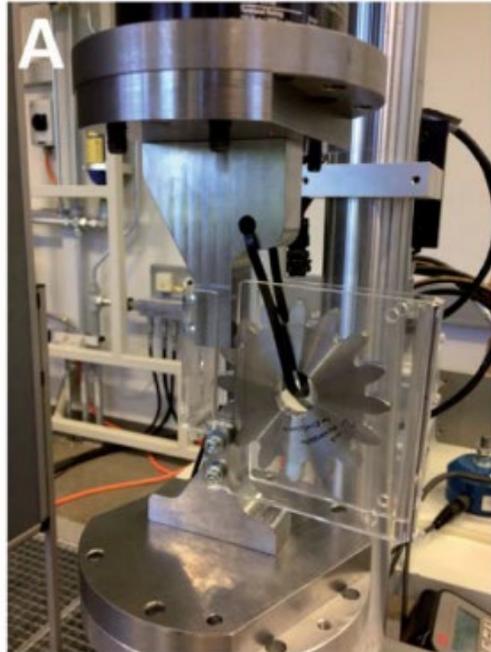
Herausforderungen:

- Stabile Prozesse zur Herstellung Zahnräder
 - SLM Prozess
 - Pulverentfernung aus Kühlkanälen
 - Wärmebehandlung
 - Nachbearbeitung



Herausforderungen:

- Adaptierte Prüfabläufe auf Pulsatorprüfstand
- Adaptierte Prüfabläufe auf Drehmomentprüfstand
 - verschiedene Durchmesser
 - Wellenintegrierte Kühlung
 - Etc.



Tab. 3.9: Spezifikation der Prüfmaschine MTS 370.02 [39]

Angabe	Wert	Einheit
Kraft	max. ± 15	[kN]
Hub	max. ± 75	[mm]
Drehmoment	max. ± 150	[Nm]
Winkel	max. ± 135	[°]
Frequenzen	0.01 - 100 (lastabhängig)	[Hz]
Arbeitsraum	460 x 1412 (b x h)	[mm]

Tab. 3.10: Lastwerte für den Pulsortest

Formelzeichen	Beschreibung	Wert	Einheit
F_o	Pulsator-Oberlast	9705	[N]
F_u	Pulsator-Unterlast	485 ($\sim 5\%$ von F_o)	[N]
F_m	Pulsator-Mittellast	5095	[N]

Die Pulsator-Mittellast F_m ergibt sich aus den wirkenden Lastspitzen F_o und F_u während dem Pulsortest. Der dabei sinusförmige Belastungsverlauf ist in der Abbildung 3.21 dargestellt.

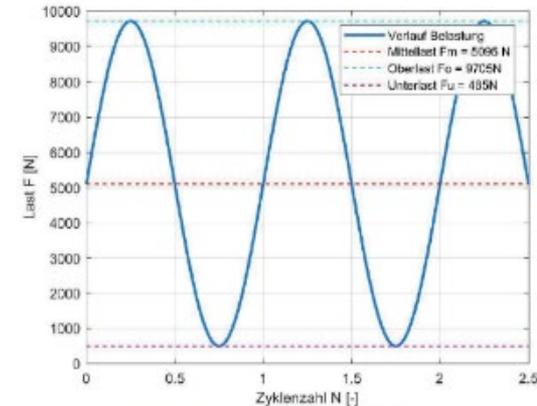
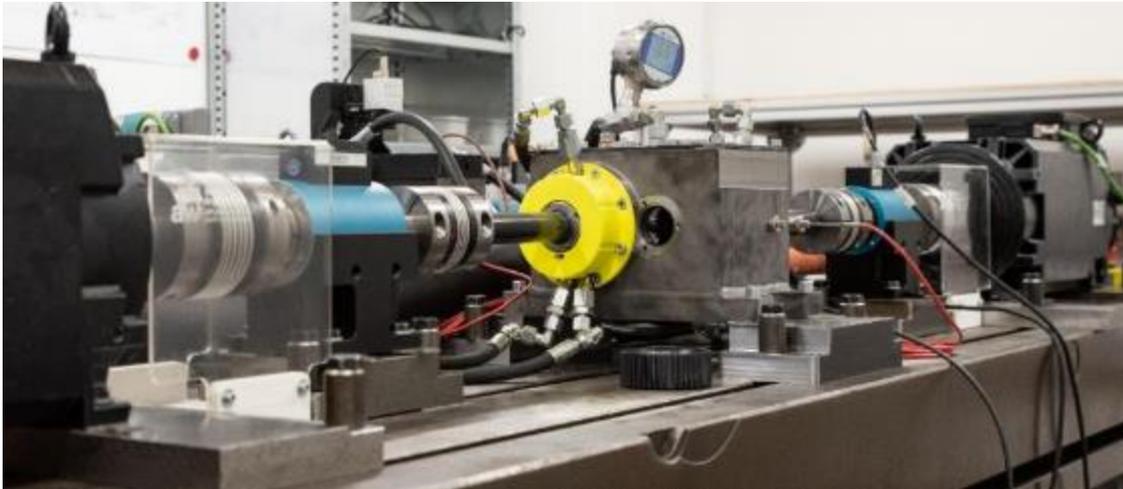


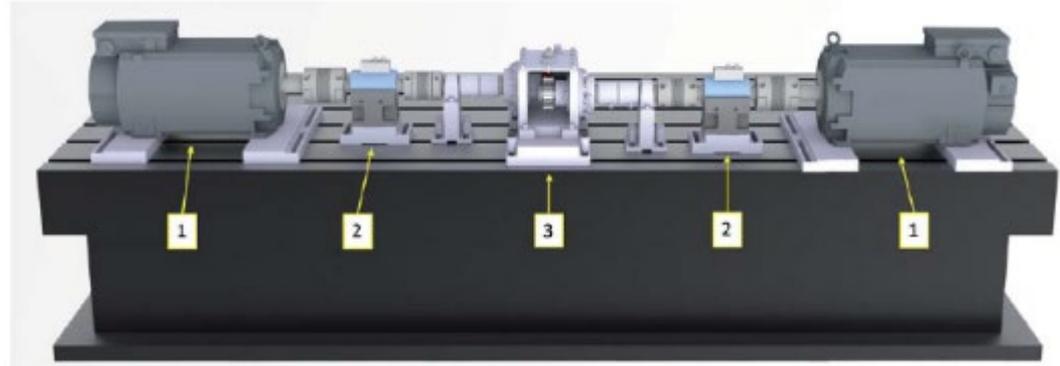
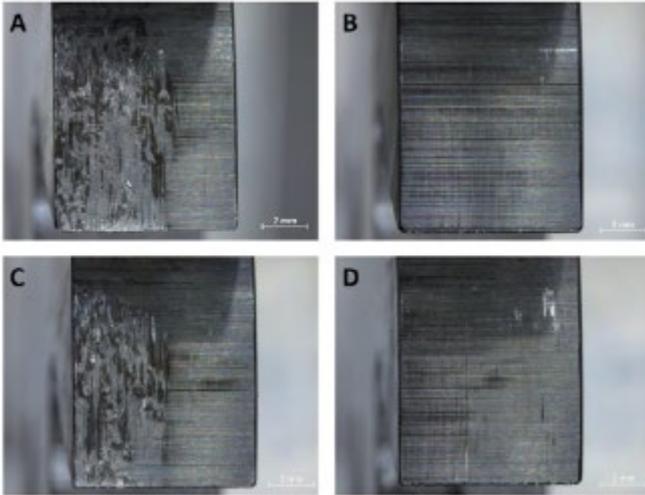
Abb. 3.21: Belastungsverlauf des Pulsortests [6]

- Überwachung der Zahnflanken, Lager und Öl-Temperatur
- Wirkungsgradmessung durch zwei Drehmomentwellen
- Analyse der Gehäusevibrationen und des Körperschalls durch triaxiale Schwingungsaufnehmer
- Antrieb / Bremse: je 19.5 kW
- Prüfmoment: 1 bis 150 Nm
- Drehzahl: 10 bis 3000 min⁻¹



Weiterentwicklung im Innosuisse-Projekt:

- Ölzuführung inkl. Überwachung in rotierender Welle für Zahnradkühlung und -schmierung



1 Motor/Generator, 2 Drehmomentaufnehmer, 3 Getriebebox mit Wechselzahnradpaarungen

- Test der Zahnräder mit und ohne innenliegenden Kühlkanälen
- Effizienzsteigerung:
 - Weniger Schmierstoff bei gleichzeitig innenliegender Kühlung
 - Höhere Sicherheit gegen Fressen



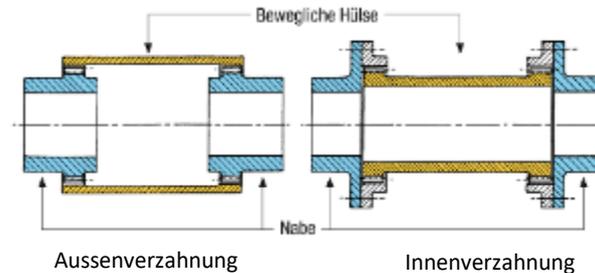
Zahnrad



Zahnkupplung

- Verbindung von zwei unabhängig gelagerten Wellensträngen
- Übertragung eines Drehmoments

- Grundsätzlich bestehend aus 3 Teilen:
 - Zwei Naben
 - Starr auf den zu kuppelnden Wellen montiert
 - Aussen- oder Innenverzahnung
 - Bewegliche Hülse -> Kupplungsstern



Prinzip-Skizze einer Zahnkupplung (RENK-MAAG).

Bewegliche Hülse

- Verzahnung mit Zahnfussschmierung
- Zahlreiche Bohrungen für Schmierkanäle
- Geringe Stückzahlen für kleinste Baugrösse

Ziele:

- Direkte Integration der Schmierkanäle
- Re-Design für AM
 - Nur dort Material wo notwendig einsetzen
 - Möglichst viel Funktion integrieren
 - Möglichst wenig Nachbearbeitung
- Optimierung Kosten/Nutzen - Verhältnis



*Zahnkupplung mit
Zahnfussschmierung (RENK-MAAG).*



- Design für AM
 - Keine Supports notwendig
- Endkonturnaher AM-Rohling
 - Integrierte Schmierkanäle
- 25 % Materialersparnis
 - Kostenreduktion
- Minimale Nachbearbeitung
 - Verzahnung
 - Schnittstellen
 - Dichtungen
 - Wärmebehandlung



Optimierter Kupplungsstern (Modell)



Schmierkanäle



Optimierter Kupplungsstern additiv gefertigt (SLM)

Wie weiter?

- Additive Herstellung Zahnkupplung (ZHAW/ZPP)
- Nachbearbeitung (Renk Maag)
- Dauertests (Renk Maag)

Zusammenfassung

- Vergütungsstahl 30CrNiMo8 für SLM-Verfahren geeignet
 - Härtewerte sowie Zugfestigkeit zu konventionellen Zahnrädern vergleichbar
 - Zahnfusstragfähigkeit zu konventionellen Zahnrädern vergleichbar
 - Sicherheit gegen Fressen vergleichbar
- Herstellung Zahnradkomponenten mit optimalem Pulver und Parametern (ZHAW/ZPP)

Nächste Schritte/Ausblick

- Nachbehandlung und Nachbearbeitung Zahnräder und Zahnradkupplung konventionell (Renk Maag)
- Test Zahnräder (ZHAW/ZPP)
 - Zahnfusstragfähigkeit (Pulsatorprüfstand), mit/ohne integrierter Kühlung
 - Sicherheit gegen Fressen/Fresstragfähigkeit (Getriebeprüfstand), mit/ohne integrierter Kühlung
- Test Zahnkupplung (Renk Maag)
 - Dauertestlauf bei Renk Maag

- Sehr interessantes Projekt im Spannungsfeld zwischen Grundlagenforschung (Materialparameter Vergütungsstahl) und angewandter F&E (Zahnradkomponenten mit Funktionsintegration)
- Sehr gute Zusammenarbeit zwischen den Projektpartnern Renk Maag GmbH und ZHAW/ZPP
- Dank an die Innosuisse für die Unterstützung dieses Projektes



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

**Innosuisse – Schweizerische Agentur
für Innovationsförderung**

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Kontakt:

Dr. Hans-Jörg Dennig

Dr. Andreas Kirchheim

ZHAW School of Engineering

Zentrum für Produkt-

und Prozessentwicklung (ZPP)

Lagerplatz 22, 8401 Winterthur

Telefon +41 58 934 49 53

hans-joerg.dennig@zhaw.ch

www.zpp.zhaw.ch

