

Walther-Meißner-Institut



<http://www.wmi.badw.de>

Physik der Kondensierten Materie I – WS 2020/21

Rudolf Gross

Stefan Filipp

LS für Technische Physik, E23, Physik-Department, TUM

Walther-Meißner-Institut, Bayerische Akademie der Wissenschaften

Garching Research Campus





Wann,

Wo,

Wie,

Warum,

..... ?

Vorlesungszeiten:

Dienstag: 12:30 – 14:00 Uhr

Donnerstag: 10:15 – 11:45 Uhr

(keine Präsenzveranstaltungen)

- **asynchrones E-Learning:** Vorlesungsinhalte werden über Videos (mp4) angeboten
- zusätzlich können **Vorlesungsfolien** können als pdf-Files heruntergeladen werden
- ferner wird jeweils am Dienstag, 12:30 – 14:00 Uhr ein **Tutorium per Zoom-Meeting** angeboten
<https://tum-conf.zoom.us/j/95428265505>, Meeting ID: 954 2826 5505, Passcode: 642658
 - ➔ Diskussion von Fragen zum Vorlesungsstoff, Vertiefung des Vorlesungsstoffs
(Fragen können vorab per Email an Rudolf.Gross@wmi.badw.de geschickt werden)
 - ➔ Behandlung von zusätzlichen Themen, Diskussion von aktuellen Forschungsergebnissen,
 - ➔ organisatorische Fragen
 - ➔ Feedback zur Vorlesung

Vorlesungsinhalt:

- **vermitteln der grundlegenden Eigenschaften und Phänomene von Festkörpern**
- **schaffen der Basis für Spezialvorlesungen**
 → z.B. Halbleiterphysik, Magnetismus & Spinelektronik,
 Supraleitung und Tieftemperaturphysik, Quantentechnologie,
- **begeistern für eines der wichtigsten Gebiete der Physik**
 → große Bedeutung der Physik der Kondensierten Materie im Alltagsleben

Warnung:

Physik der Kondensierten Materie ist enorm breites Gebiet
 → **wir können oft nur an der Oberfläche kratzen !!**

→ **zahlreiche Spezialvorlesungen im Masterstudiengang !!**

Übungsgruppen:

| | Zeit | Raum |
|----------------|-------------------|--------------|
| Übungsgruppe 1 | Mo 08:30-10:00Uhr | Zoom-Meeting |
| Übungsgruppe 2 | Mo 12:30-14:00Uhr | Zoom-Meeting |
| Übungsgruppe 3 | Mi 10:15-11:45Uhr | Zoom-Meeting |
| Übungsgruppe 4 | Do 08:30-10:00Uhr | Zoom-Meeting |

Koordination der Übungen:

Dr. Stephan Geprägs

Stephan.Gepreags@wmi.badw.de



- **Einteilung der Übungsgruppen:** *es wird zunächst keine Zuteilung zu Übungsgruppen vorgenommen*
- **Übungsaufgaben:** *jeweils bis spätestens Donnerstag der vorhergehenden Woche*
- **Übungsaufgaben und Musterlösungen als pdf-File erhältlich:**
<http://www.wmi.badw.de/teaching/Lecturenotes/index.html>

<http://www.wmi.badw.de/teaching/Lecturenotes>



Condensed Matter Physics I + II Lecture Notes of Prof. Gross to the Lectures on "Condensed Matter Physics I + II" (WS 2004/2005 to SS 2020)

Exercises and Solutions to Condensed Matter Physics I+II (2020/2021)

| | | |
|---|---------------------------------|---|
| <p>Exercises WS 2020/2021 first exercise sheet: 05.11.2020</p> | <p>Exercises SS 2021</p> | <p>Solutions, Slides, Summaries can be downloaded here</p> |
|---|---------------------------------|---|

The present version of the solutions may contain typos and mistakes (please send response to Rudolf.Gross@wmi.badw.de). Latest update: 28.10.2020.

Benutzername: Student
Passwort: KM1-Uebung

Condensed Matter Physics I + II Lecture Notes of Prof. Gross to the Lectures on "Condensed Matter Physics I + II" (WS 2004/2005 to SS 2021)

Exercises and Solutions to Condensed Matter Physics I + II (R. Gross: WS 2020/2021 and SS2021)

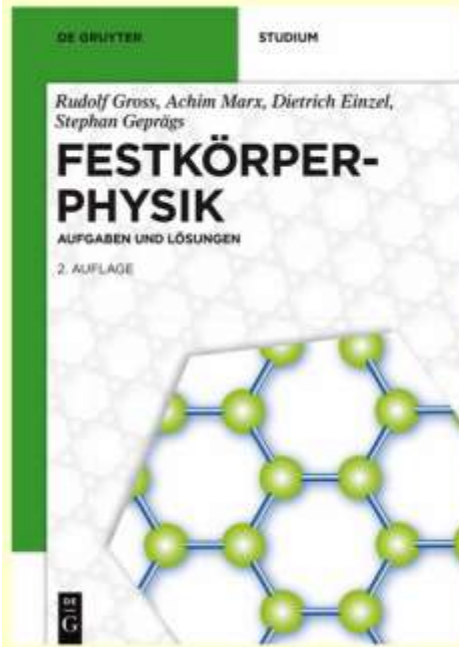
| | |
|---|--|
| <p>Exercises and Solutions, WS 2020/2021</p> | <p>Exercises and Solutions, SS 2021</p> |
|---|--|

The present version of the solutions may contain typos and mistakes (please send response to Rudolf.Gross@wmi.badw.de). Latest update: 28.10.2020.

Slides and summaries to Condensed Matter Physics I + II (R. Gross WS 2020/2021 and SS2021)

| | |
|--|---|
| <p>Movies KM-Expert-1, WS2020/2021</p> | <p>Slides KM-Expert-1, WS2020/2021</p> |
| <p>Movies KM-Expert-2, SS2020 KM2_2019-2020_Organisation.pdf 1-KM-Expert-2 VS 20April2020-1.mp4</p> | <p>Slides KM-Expert-2, SS2020 1-KM-Expert-2 VS 20April2020-1.pdf</p> |

Stephan.Gepreags@wmi.badw.de



- Titel: **Festkörperphysik. Aufgaben und Lösungen**, 2. überarbeitete und erweiterte Auflage
- Verlag: Walter de Gruyter GmbH, Berlin/Boston
- Erschienen: Mai 2018
- Ausstattung/Bilder: Paperback, XI, 327 S., mehr als 80 schw.-w. Abb., 3 schw.-w. Tab.
- Sprache: Deutsch
- ISBN 978-3-11-056611-6, e-book: ISBN 978-3-11-056613-0
- Preis: EUR 29,95

Kurzbeschreibung:

Erst beim Lösen von Aufgaben stellen sich Fragen, die man meint geklärt und verstanden zu haben. Zur Ergänzung des anerkannten Lehrbuchs Festkörperphysik von Rudolf Gross und Achim Marx dient das vorliegende Übungsbuch mit 100 Aufgaben und kompletten Musterlösungen zu allen großen Gebieten der modernen Festkörperphysik. Anhand ausführlicher Lösungswege ermöglicht es sowohl eine Vertiefung und Erweiterung der Kenntnisse als auch die Selbstkontrolle des erlernten Stoffs. Die erfahrenen Dozenten leiten Studierende dazu an, sich physikalisches Wissen selbst zu erarbeiten und Hindernisse bei der Findung des eigenen Lösungswegs zu überwinden. Die einzelnen Lösungsschritte sind nachvollziehbar und verständlich formuliert, wobei zahlreiche Abbildungen die bearbeiteten Themen zusätzlich veranschaulichen. Ideal zur Prüfungsvorbereitung und zum selbständigen Lernen.

Condensed Matter Physics I + II

Lecture Notes of Prof. Gross to the Lectures on "Condensed Matter Physics I + II" (WS 2004/2005 to SS 2020)

Exercises and Solutions to Condensed Matter Physics I+II (2020/2021)

Exercises WS 2020/2021

first exercise sheet: 05.11.2020

Exercises SS 2021

Solutions, Slides, Summaries

can be downloaded here

The present version of the solutions may contain typos and mistakes (please send response to Rudolf.Gross@wmi.badw.de). Latest update: 28.10.2020.

Benutzername: Student
Passwort: KM1-Uebung

<http://www.wmi.badw.de/teaching/Lecturenotes/index.html>

| Titel | Zeit | Ort | Info | Anmeldung |
|---|-----------------------------------|---|------|----------------------------|
| Prüfung zu Physik der kondensierten Materie 1 | Do 04.03.2021, 11:30 – 13:00 h | 101, Hörsaal 1, "Interims I" (5620.01.101), 004, Hörsaal 1 "Interims II" (5416.01.004) | | 07.12.2020 - 15.01.2021 |
| Prüfung zu Physik der kondensierten Materie 1 | Di 06.04.2021, 11:30 – 13:00 h | MW 1050, Johann-Bauschinger-Zeichensaal (5510.01.050) | | 08.-22.03.2021 |

alle Studierenden müssen sich selbst anmelden !!

Erlaubte Hilfsmittel:

- 1 A4-Blatt, einseitig, HANDSCHRIFTLICH beschrieben (nicht kopiert/gedruckt/...)

Inhalt
der
Vorlesung

Themen

- **1 Aufbau von Kristallen:**
Klassifizierung von Kristallstrukturen, Richtungen und Ebenen, Defekte, Oberflächen
- **2 Reziprokes Gitter und Strukturanalyse:**
Brillouin-Zonen, von Laue- und Bragg-Bedingung, Struktur- und Atomformfaktor, Debye-Waller-Faktor
- **3 Bindungskräfte:**
Van der Waals, ionische, kovalente und metallische Bindung, Wasserstoffbrückenbindung
- **4 Elastische Eigenschaften:**
Kontinuumsmechanik, Spannung, Dehnung, Elastizitätstensor, elastische Wellen
- **5 Gitterdynamik:**
klassische Theorie des Kristallgitters, Dispersionsrelation der Gitterschwingungen, Phononen
- **6 Thermische Eigenschaften des Kristallgitters:**
spezifische Wärme (klassisch, quantenmechanisch), Debye- und Einstein-Näherung, thermische Ausdehnung, Wärmeleitfähigkeit

Themen

- **7 Das freie Elektronengas:**
Fermi-Gas, Fermi-Energie, Dispersionsrelation, spezifische Wärme, elektrische und thermische Leitfähigkeit, Hall-Effekt
- **8 Elektronen im periodischen Potenzial:**
Bloch-Wellen, Dispersionsrelation und Bandstruktur, Näherung von schwach und stark gebundenen Elektronen, Metalle/Halbmalle/Isolatoren, Fermi-Flächen
- **9 Dynamik von Kristallelektronen:**
Semiklassische Beschreibung, Bewegung in elektrischen und magnetischen Feldern, Streuprozesse, Boltzmann-Transportgleichung, thermoelektrische und thermomagnetische Effekte

Fortsetzung in KM 2:

quantenmechanische Beschreibung der Elektronenbewegung

Themen

10. Halbleiter:

- Elektronische Struktur und Transporteigenschaften

Bandlücke, Ladungsträgerkonzentration, Dotierung,

- Halbleiteranwendungen

*p-n Übergang, Zener-Diode, Esaki-Diode, Solarzelle, Injektionslaser,
Transistor, niedrigdimensionale Elektronengassysteme,*

11. Dielektrische Eigenschaften:

- Dielektrische Eigenschaften des Elektronengases

dielektrische Funktion, Plasmonen, elektrostatische Abschirmung, Polaritonen,

- Dielektrische Eigenschaften von Isolatoren

*Dielektrizitätskonstante und Polarisation, Polarisationskatastrophe,
Ferroelektrizität, weiche optische Phononen,*

Themen

12. Magnetismus:

- **Dia- und Paramagnetismus**

Langevin-Gl. für Diamagnetismus, Paramagnetismus, adiabatische Entmagnetisierung,

Paramagnetismus der Leitungselektronen,

- **Ferro- und Antiferromagnetismus**

ferromagnetische Ordnung, Spinwellen, ferrimagnetische Ordnung, antiferromagnetische Ordnung,

Domänen,

- **Magnetische Resonanz**

Dynamik und Relaxation der Magnetisierung, Bloch-Gleichungen,

Themen

13. Supraleitung:

- **Grundlagen der Supraleitung**

Meißner-Effekt, Thermodynamik, London-Eindringtiefe, Kohärenzlänge,

Supraleiter 1. und 2. Art, BCS-Theorie,

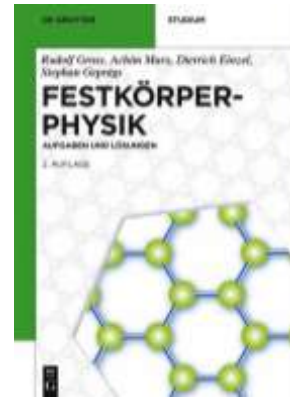
- **Makroskopische Quantenphänomene**

Flussquantisierung, Josephson-Effekte, Quanteninterferometer,

Literatur

1. **Festkörperphysik, 3. Auflage**
Rudolf Gross, Achim Marx,
de Gruyter Oldenbourg München (2018),
ISBN-13: 978-3-11-055822-7

Vertiefungsthemen sind nicht prüfungsrelevant



2. **Festkörperphysik,**
N. W. Ashcroft, N. D. Mermin, Oldenbourg-Verlag, 3. Auflage (2007).
3. **Einführung in die Festkörperphysik,**
Charles Kittel, Oldenbourg-Verlag, 12. Auflage (2005).
4. **Festkörperphysik,**
Harald Ibach, Hans Lüth, 7. Auflage, Springer Verlag, Berlin (2009).
5. **Einführung in die Festkörperphysik,**
K. H. Hellwege, 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin (1988).



- in Vorlesung gezeigte Grafiken
- Zusammenfassungen der Vorlesungsstunden
- Übungsblätter
- Musterlösungen
-

<http://www.wmi.badw.de/teaching/Lecturenotes/index.html>

**Physik der
Kondensierte Materie
an der
TU München**

1. Physik-Department:

E10: Back
E13: Müller-Buschbaum
E14: Simmel
E17: Krischer
E20: Barth
E21: Böni
E51: Pfeiderer
Theorie: Knolle, Pollmann

2. Walter Schottky Institut:

E24: Finley, Holleitner
E25: Stutzmann, Brandt, Sharp
Theorie: Knap

3. Walther-Meißner-Institut:

E23: Gross, Filipp, Deppe, Hackl, Hübl
(Althammer, Fedorov, Opel)

4. FRM II:

E13: Müller-Buschbaum
E21: Böni
E51: Pfeiderer

- **Münchner Physik Kolloquium** (TUM, LMU, MPI)
Zeit und Ort: Mo 17:15h, Raum: PH HS2, TUM / E7, LMU
- **Festkörperphysik-Kolloquium**
Zeit und Ort: Do 17:15h, Raum PH HS3
- **Walther-Meißner-Seminar**
Zeit und Ort: Fr 11:00h, Seminarraum WMI
- **Walter Schottky Seminar**
Zeit und Ort: Di 17:15h, Seminarraum S101, WSI

Exzellenzcluster:



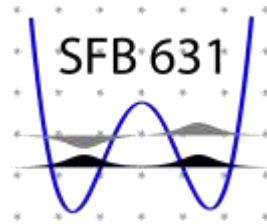
Munich Center for Quantum Science and Technology



Sonderforschungsbereiche:



TRR 80



Graduiertenschulen:



QCCC - International PhD Programme of Excellence

Quantum Computing, Control and Communication

DFG Schwerpunktprogramme (Priority Programs):



SPP2137 Skymionics

Topological Spin Phenomena in Real-Space for Applications

Munich
Center for
Quantum
Science and
Technology

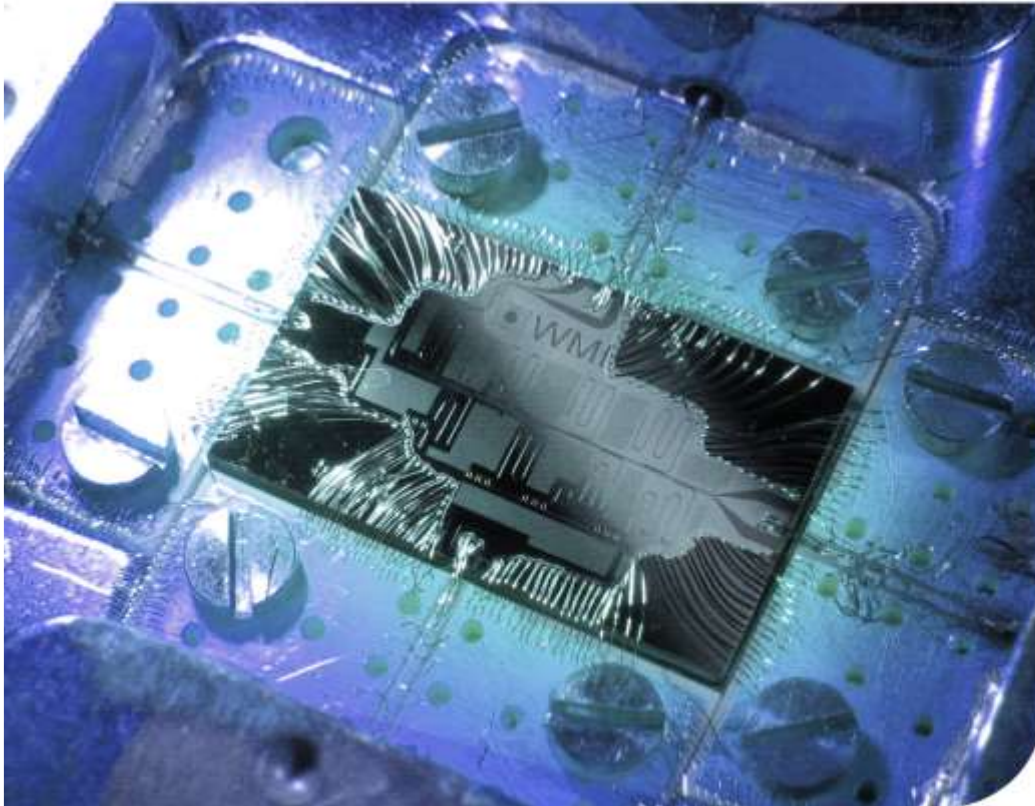
MCQST

Münchner Zentrum für Quanten-Wissenschaften und -Technologie



Draft Proposal for a Cluster of Excellence

Exzellenzstrategie des Bundes und der Länder



Sprecher:

Immanuel Bloch

Ignacio Cirac

Rudolf Gross

ca. 8 Mio. € / Jahr

Förderzeitraum: 2019 - 2025

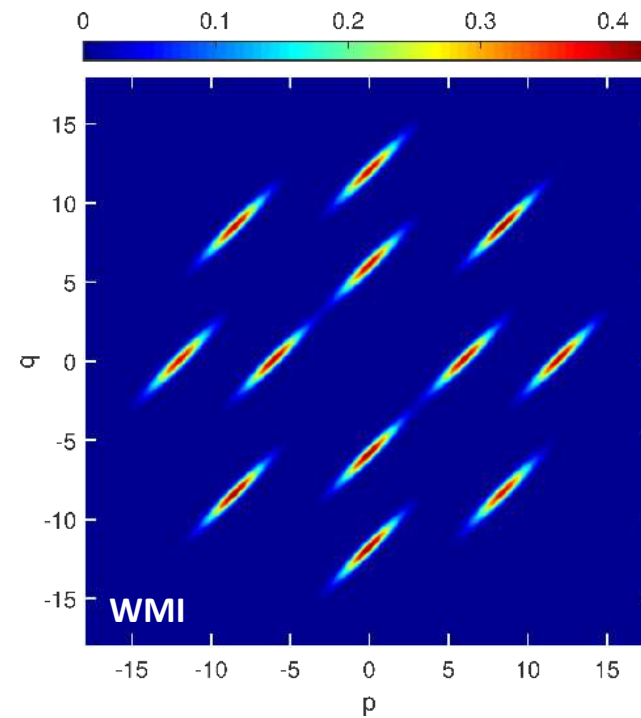
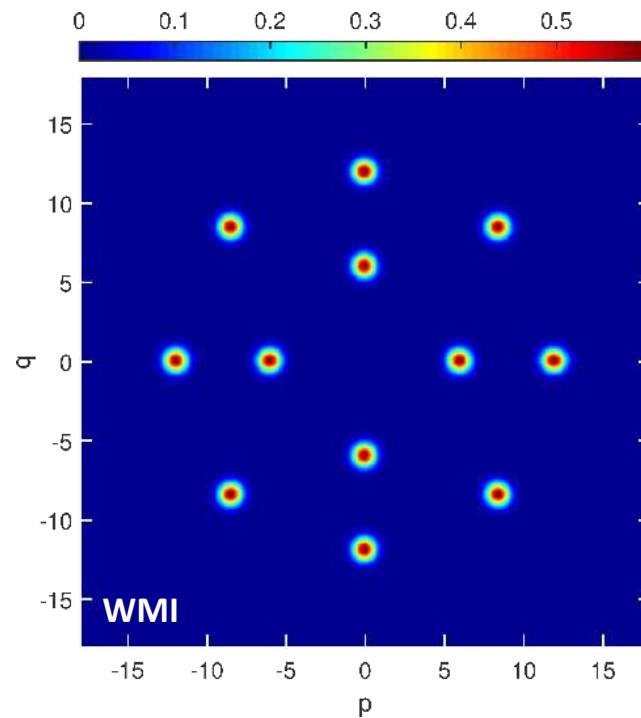


Deutsches
Museum 



erfolgreiche Begutachtung am 12. 06. 2018 in Bonn

... a Cluster of Excellence joining the Munich competences in Quantum Science, Quantum Technology, and Quantum Matter



Exzellenzstrategie: Bund und Länder fördern ab 2019 **wissenschaftliche Spitzenleistungen**, Forschungsk Kooperationen und die Profilbildung von Universitäten

Exzellenzcluster: fachübergreifende und international wettbewerbsfähige Forschungsprojekte zu **besonders relevanten wissenschaftlichen Fragestellungen**

- **195** Vorträge für Exzellenzcluster
- **88** Vorträge für Vortrag empfohlen
- 27. September 2018:
 - **57** Exzellenzcluster für Förderung ausgewählt, Förderzeitraum: 7 Jahre, ab 01.01.2019
- Fördervolumen: ca. 2.7 Mrd. € (75% Bund, 25% Länder)

Exzellenz-Landkarte



- e-conversion
- Munich Center for Quantum Science & Technology
- ORIGINS
- SyNergy – Munich Cluster for Systems Neurology

Center for Quantum Engineering



Forschungsbau:

ca. 40 Mio. €

Fertigstellung:

ca. 2023/24



Walther-Meißner-Institut

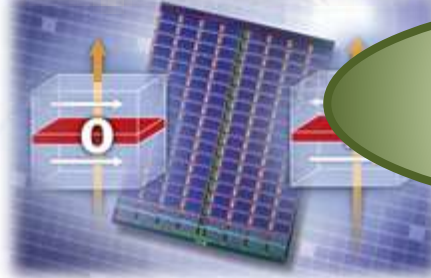


<http://www.wmi.badw.de>

Supraleitung, Magnetismus, Quantensysteme und Quantentechnologie

Nanotechnologie, Dünnschichttechnologie für supraleitende und magnetische Materialien

Spin Systeme
Magnetismus



Suprafluidität

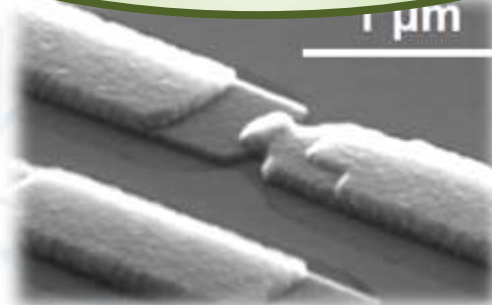
Supraleitung



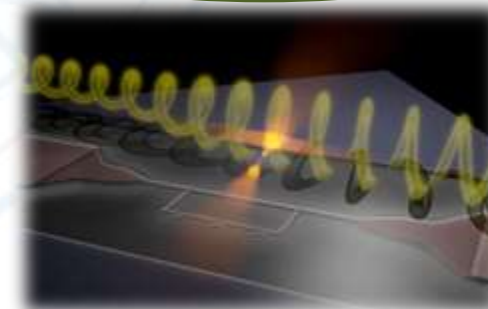
Quantenphänomene
und
Quantenmaterialien

Forschung

mesoskopische
Festkörpersysteme



Quanten-
informationssysteme



Supraleitung



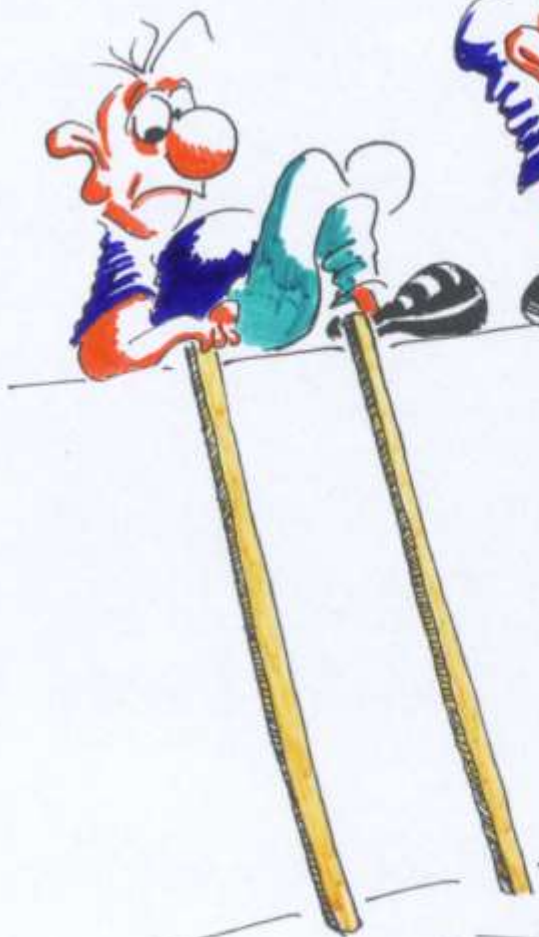
Walther Meißner

* 16. 12 1882 in Berlin

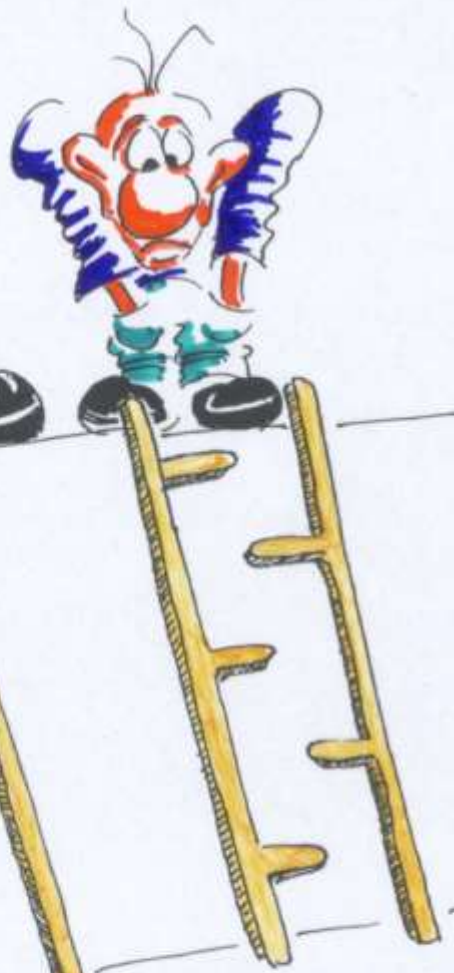
† 15. 11. 1974 in München

**Meißner-Effekt und
Stromfluss ohne Widerstand**





Nichtleiter



Halbleiter



Normalleiter



Supraleiter

Nanowissenschaften

und

Nanotechnologie

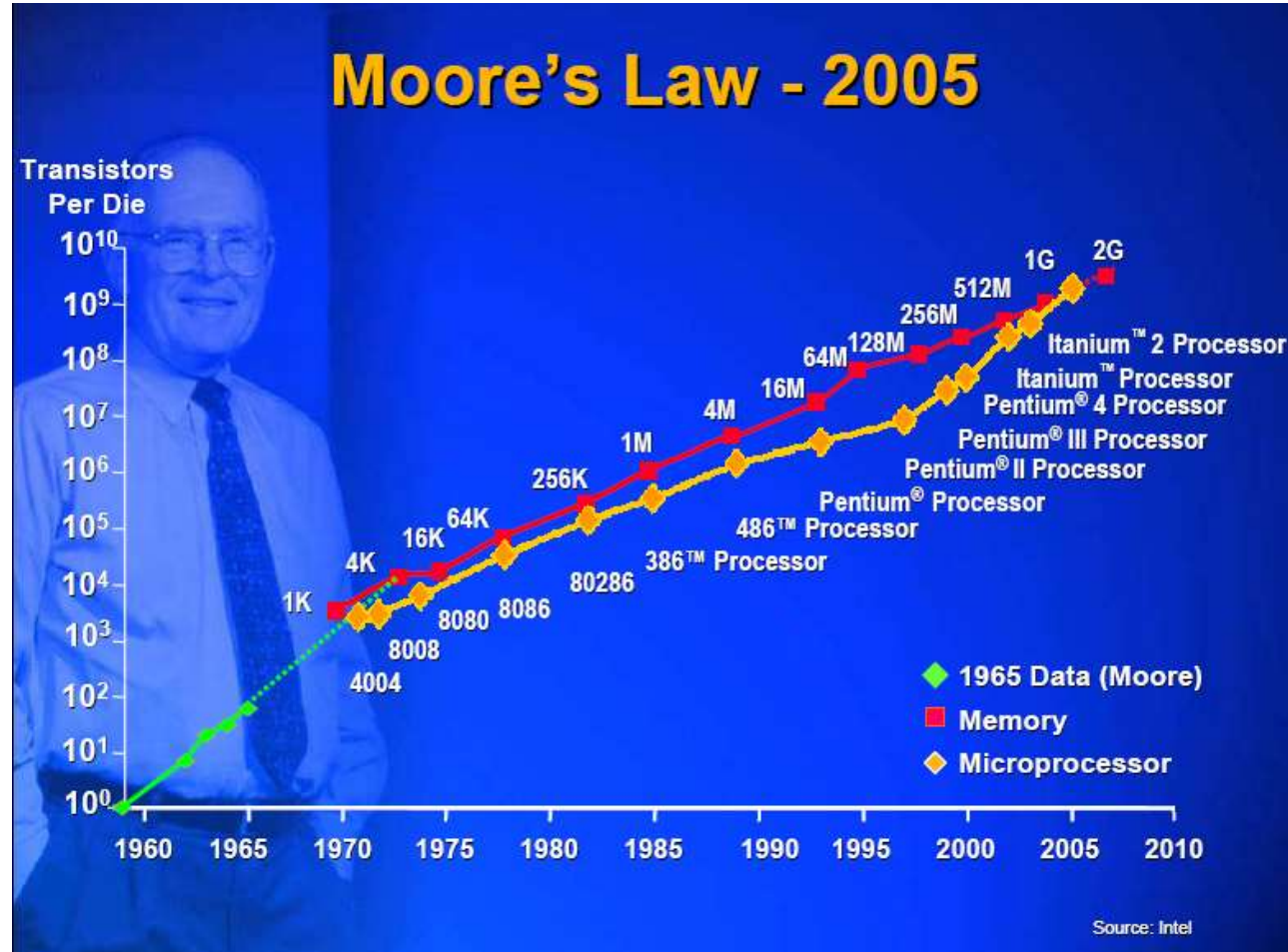
am

WMI

Mooresches Gesetz

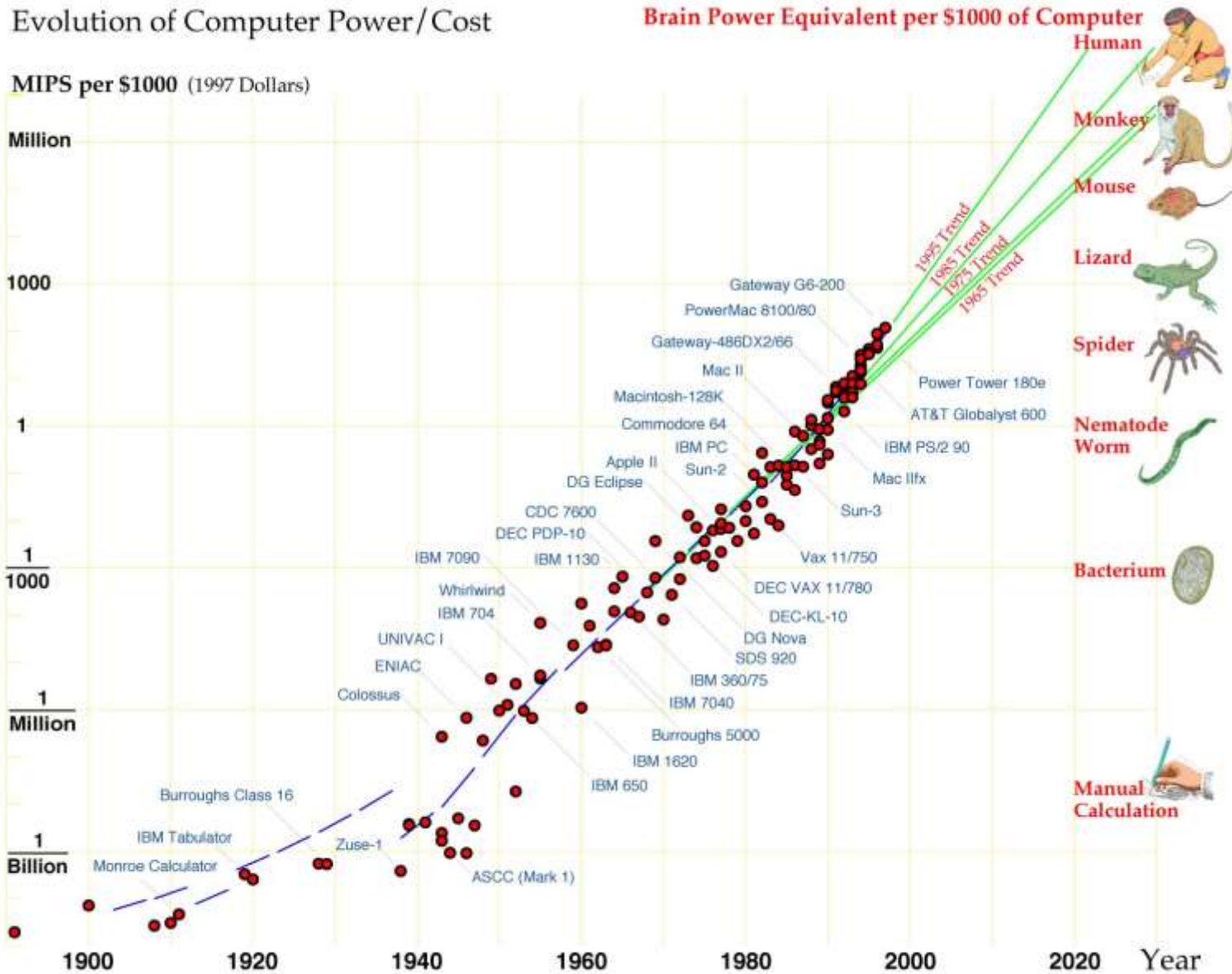
1965 beobachtete Moore ein exponentielles Anwachsen der Zahl der Transistoren pro integriertem Schaltkreis und sagte vorher, dass sich dieser Trend fortsetzt

→ Mooresches Gesetz



<http://www.intel.com/research/silicon/mooreslaw.htm>

Moore's Law



Graph by courtesy of Hans Moravec

The chips are down for Moore's law

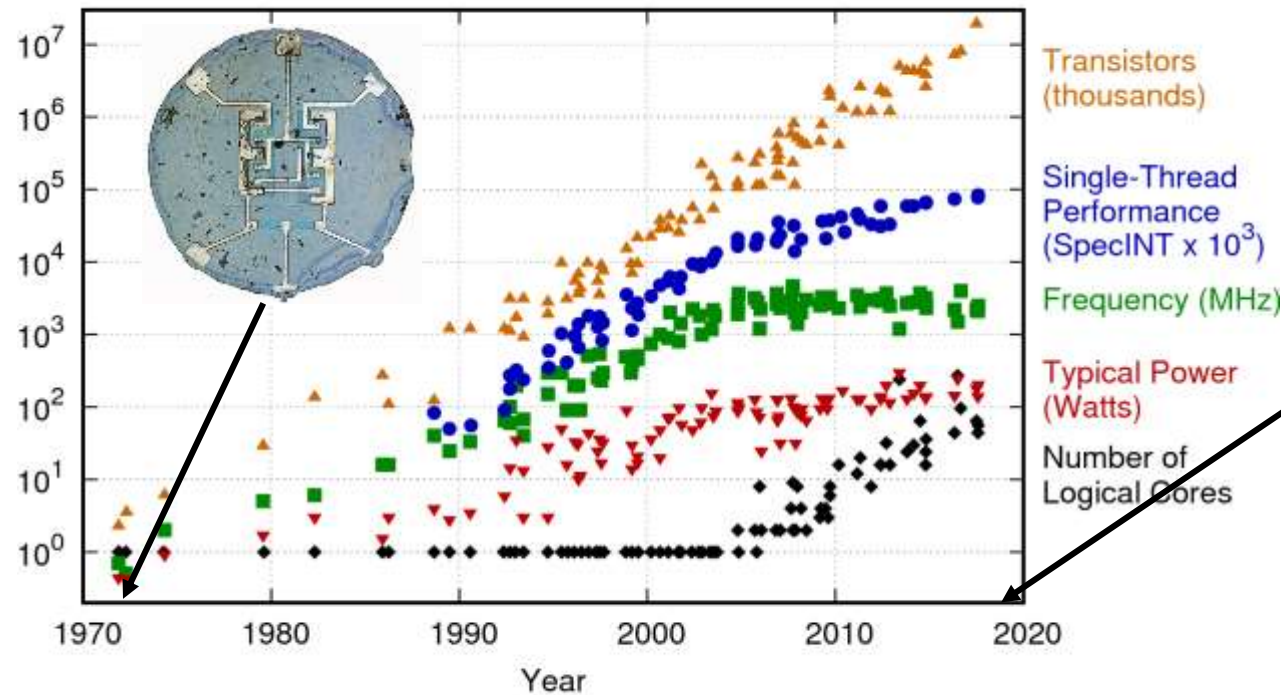
The semiconductor industry will soon abandon its pursuit of Moore's law. Now things could get a lot more interesting



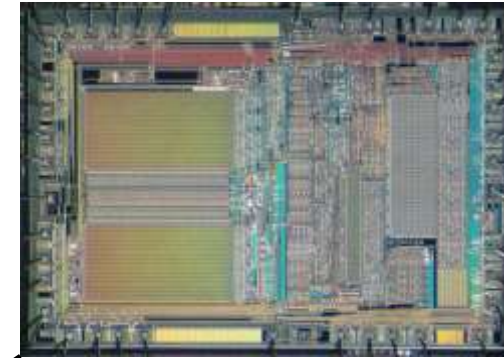
M. Mitchell Waldrop, Nature 530, 144 (2016)

Ende des Mooreschen Gesetzes

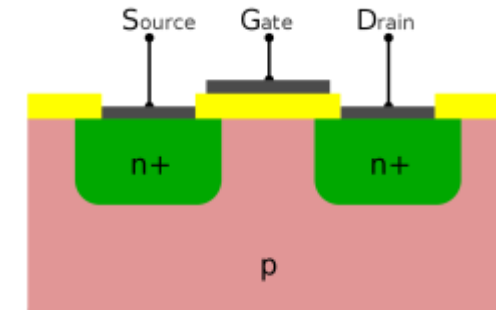
42 Years of Microprocessor Trend Data



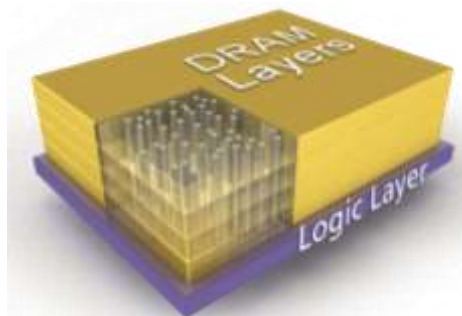
Original data up to the year 2010 collected and plotted by M. Horowitz, F. Labonte, O. Shacham, K. Olukotun, L. Hammond, and C. Batten
 New plot and data collected for 2010-2017 by K. Rupp



Intel Core i9 (14 nm)



und dann ?



neue Architekturen

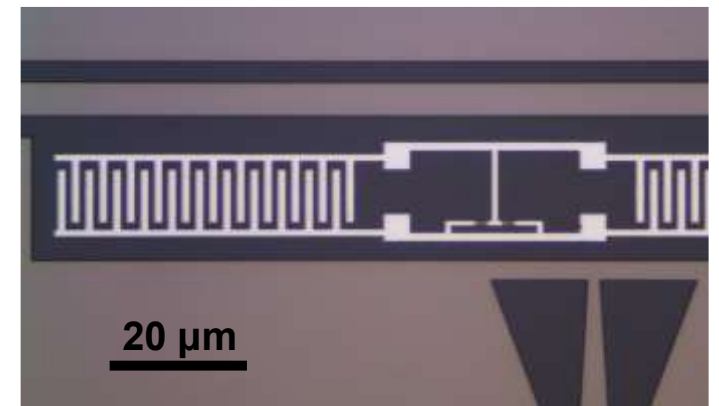
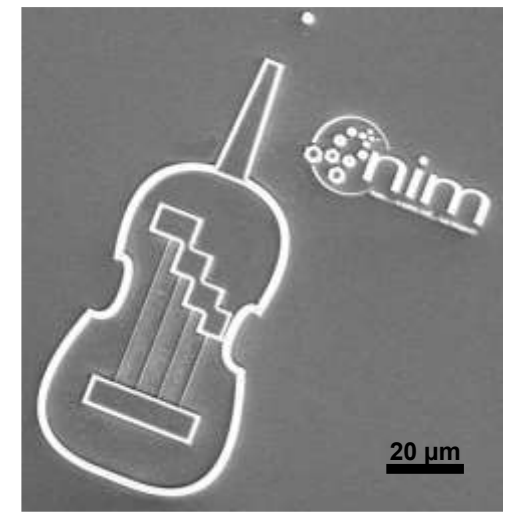
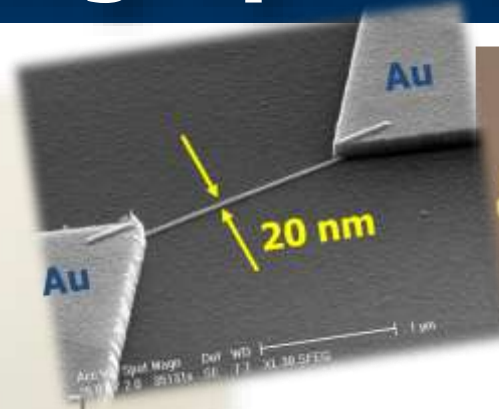


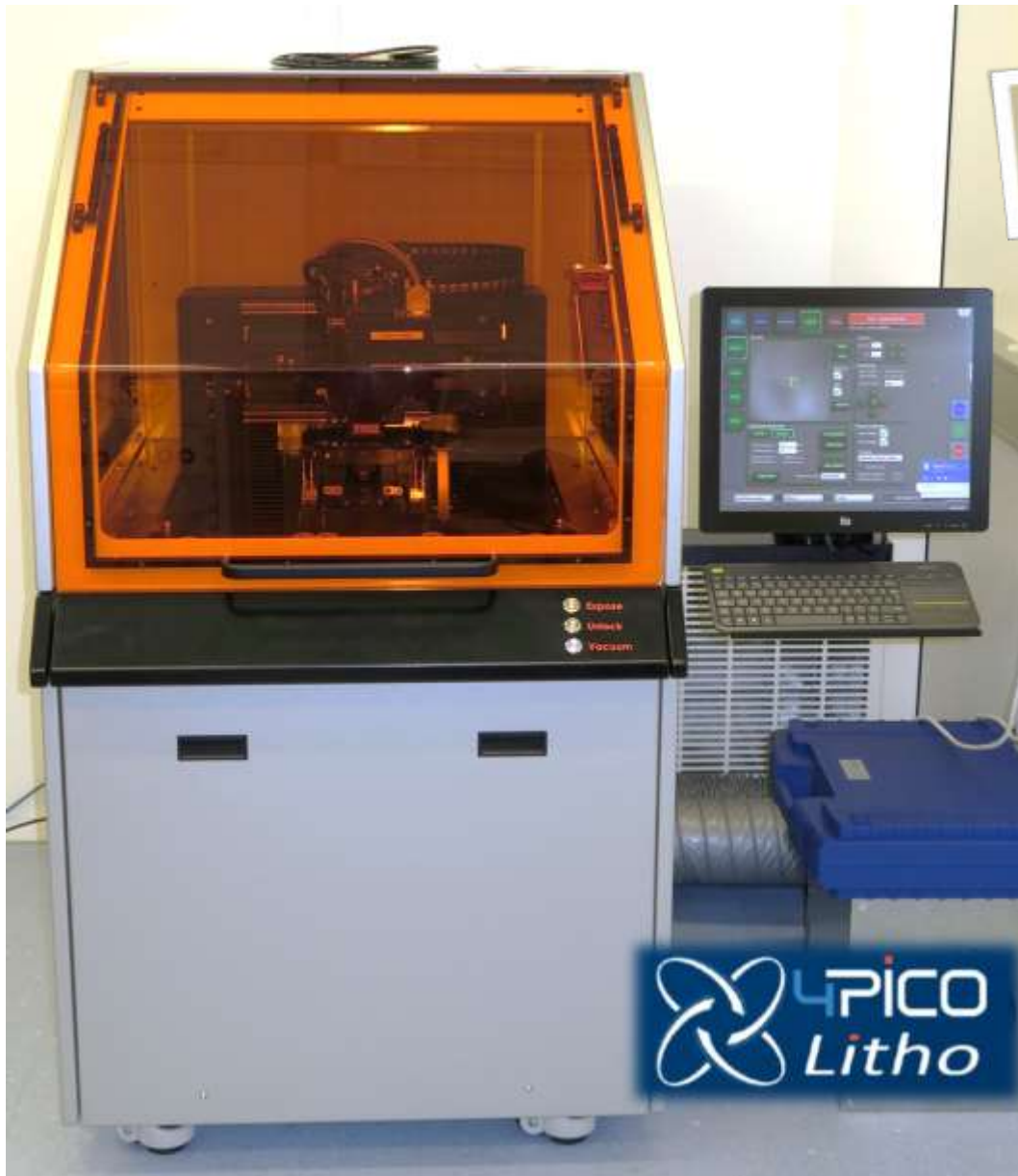
neuromorphe Computer



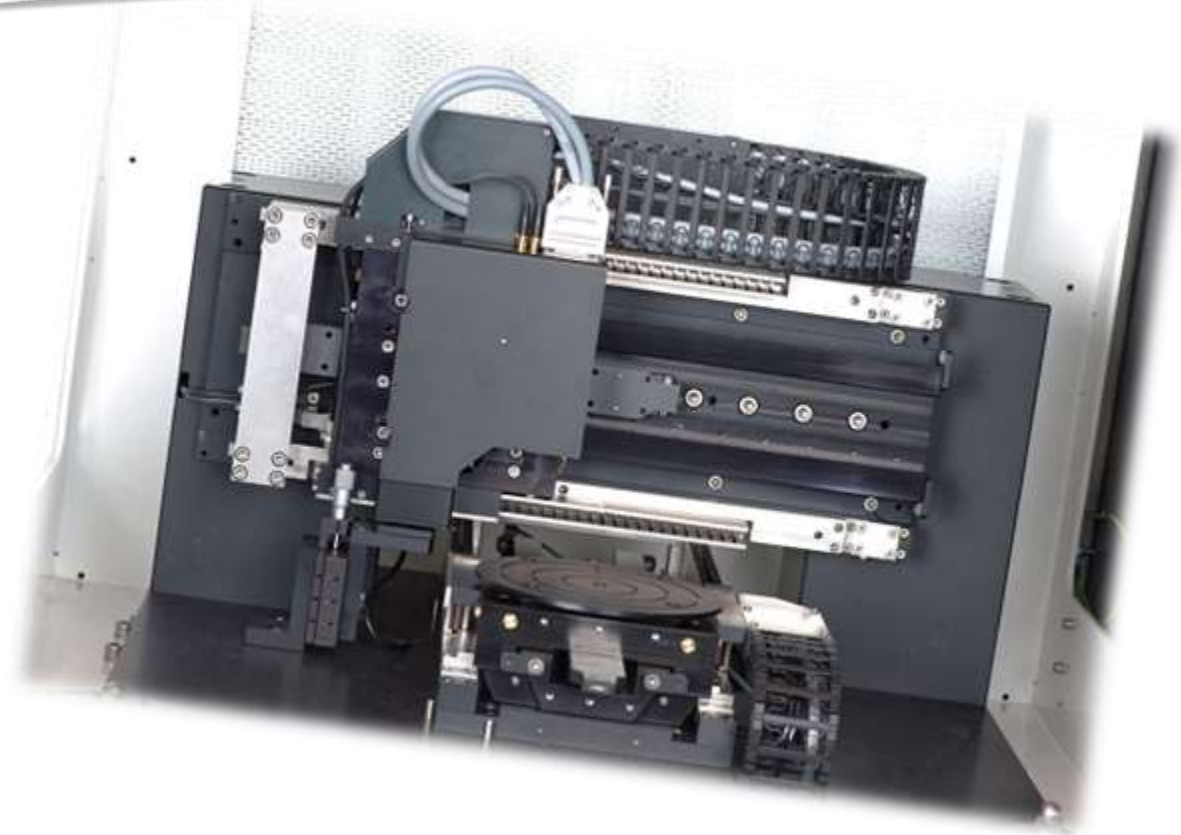
Quantencomputer

NanoBeam Ltd.
nB5





PicoMaster 200



Laserschreiber PicoMaster 200

(bis 8 Zoll, Schreibmodule mit 405 und 375 nm Lasern)

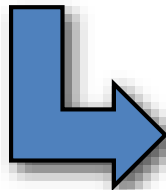
Quanten- informations- verarbeitung

Quanteninformationsverarbeitung

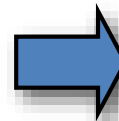
Quantencomputer



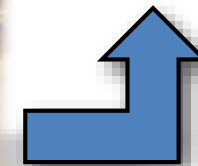
Enigma (1940)



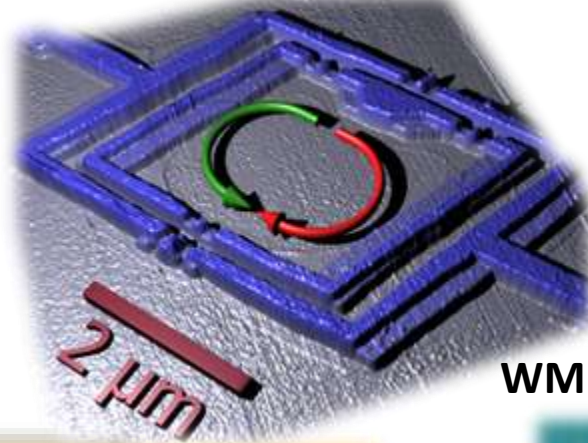
**Vakuumpipen
ENIAC (1946)**



erster Transistor (1947)
Bardeen, Brattain, & Shockley

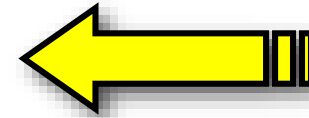


supraleitende Quantenbits



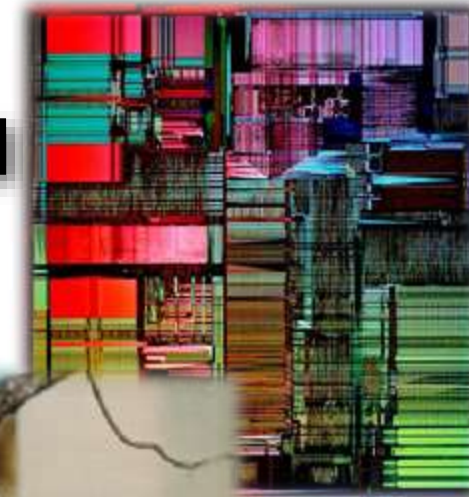
WMI

Physik



Technologie

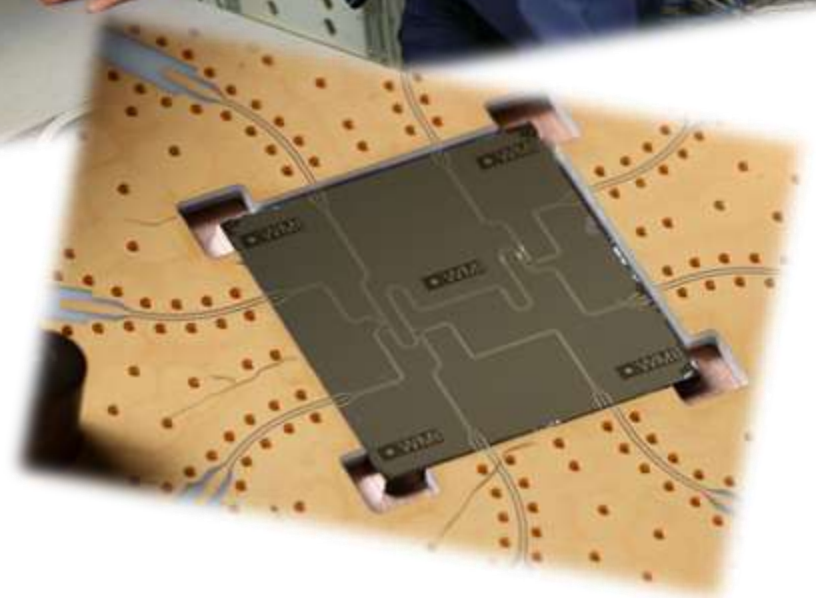
**Intel dual-core 45 nm
(2007)**



Supraleitende Quantencomputer



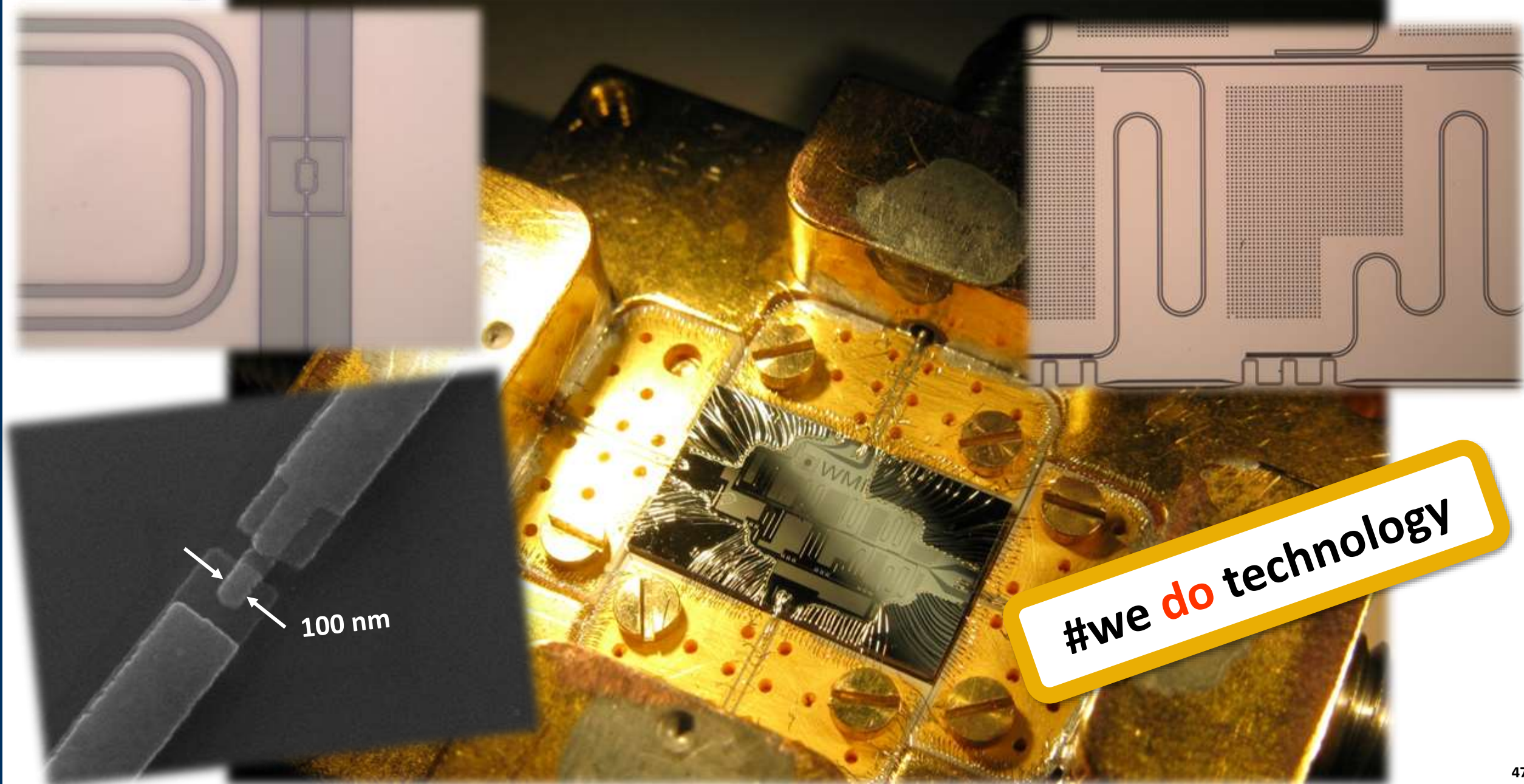
Stefan Filipp



Quantum Computing @ WMI

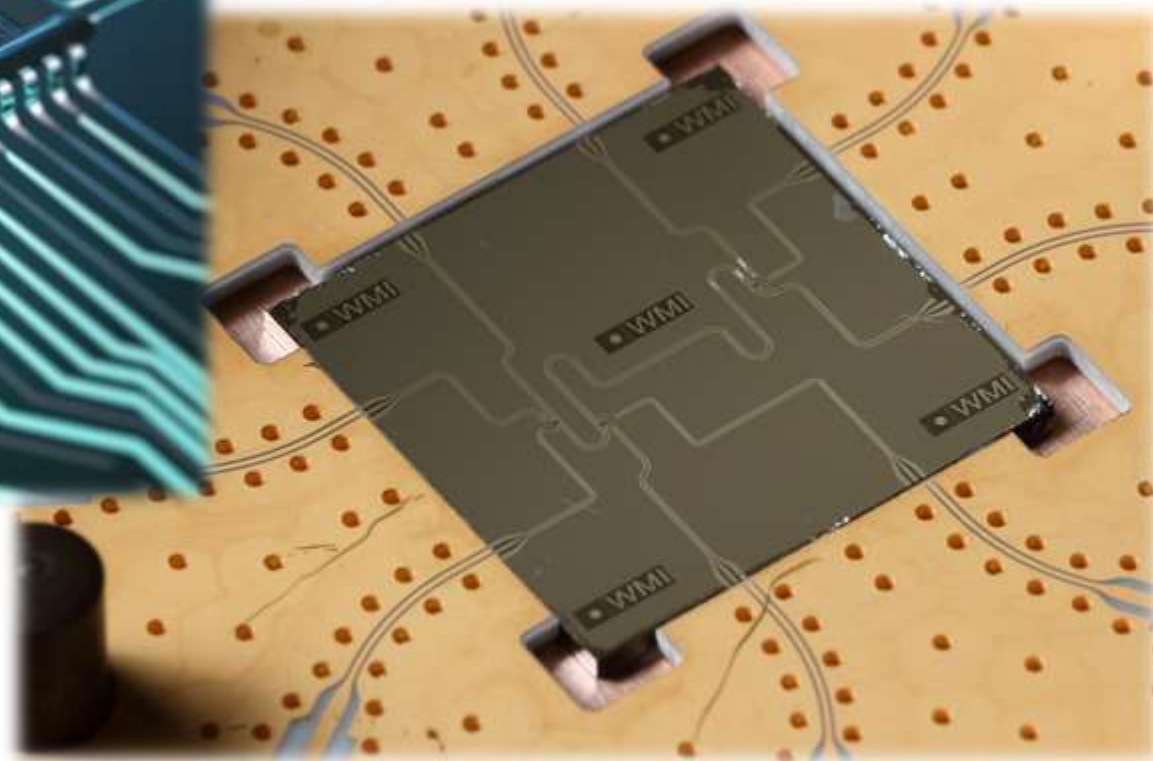
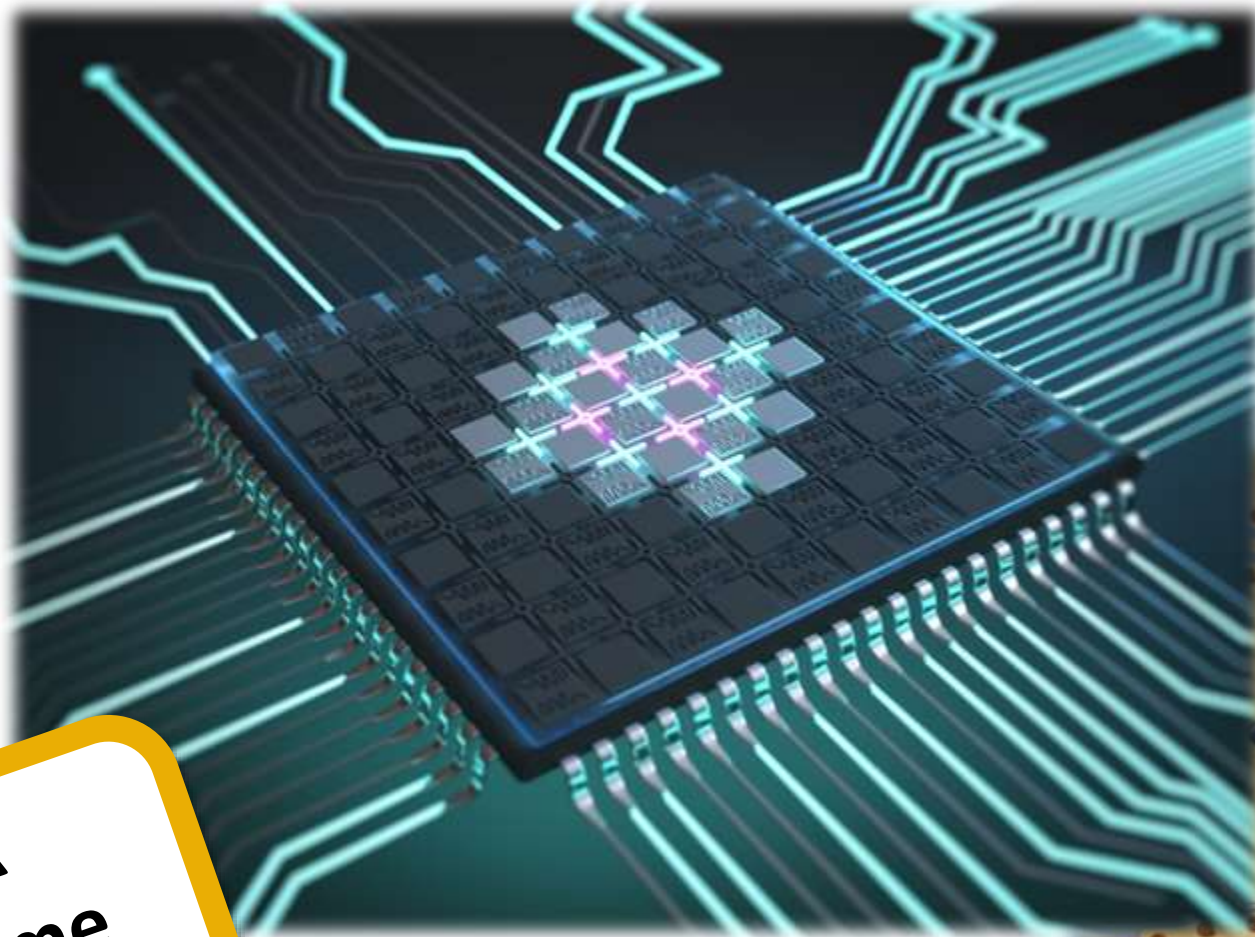
23. 07. 2020

Supraleitende Quantencomputer



#we do technology

Supraleitende Quantencomputer



**A
Game
Changer**

Magnetismus

&

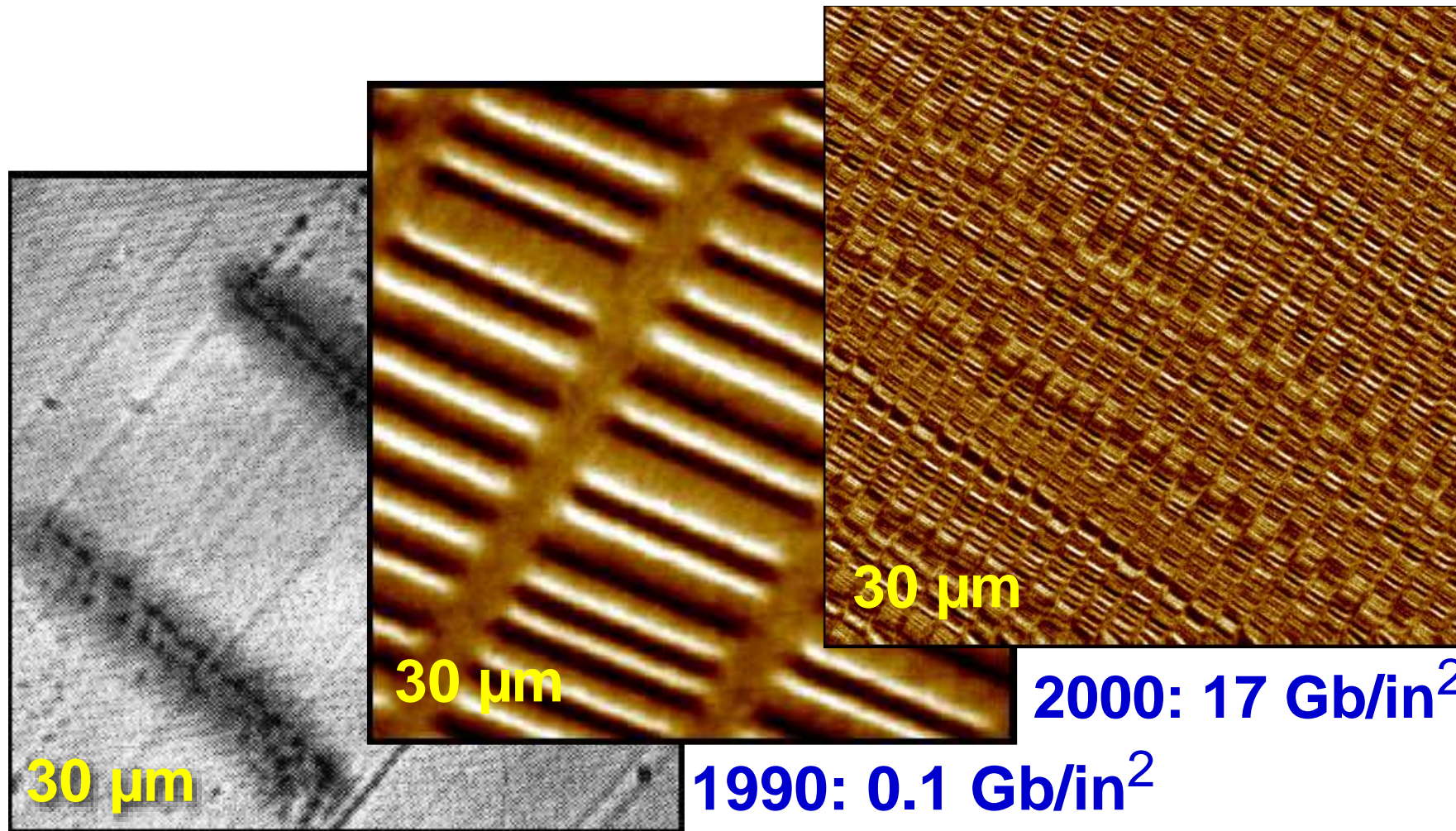
Spinelektronik



IBM MicroDrive



Magnetische Datenspeicherung



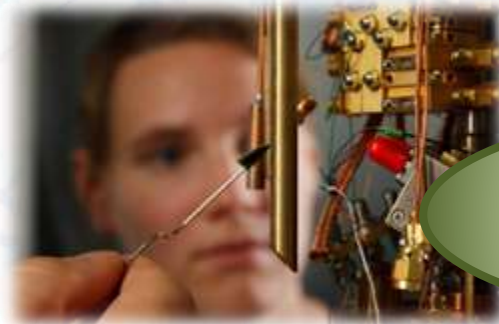
1984: 0.04 Gb/in²

1990: 0.1 Gb/in²

2000: 17 Gb/in²

1 in = 2.54 cm

Technologie



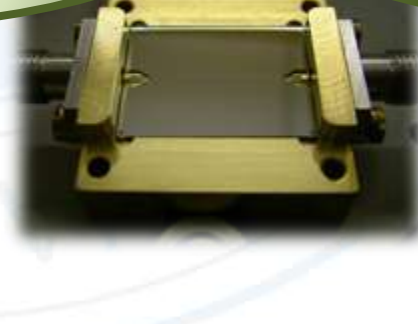
Tief- und Ultratief-
temperaturtechniken



**Technologie-
entwicklung**

Einkristallzüchtung,
Dünnschichttechnologie

Nanotechnologie,
Quantentechnologien



innovative Kryotechnik

.....WMI entwickelt ersten „trockenen“ Mischkühler

K. Uhlig, Cryogenics 42, 73 – 77 (2002)

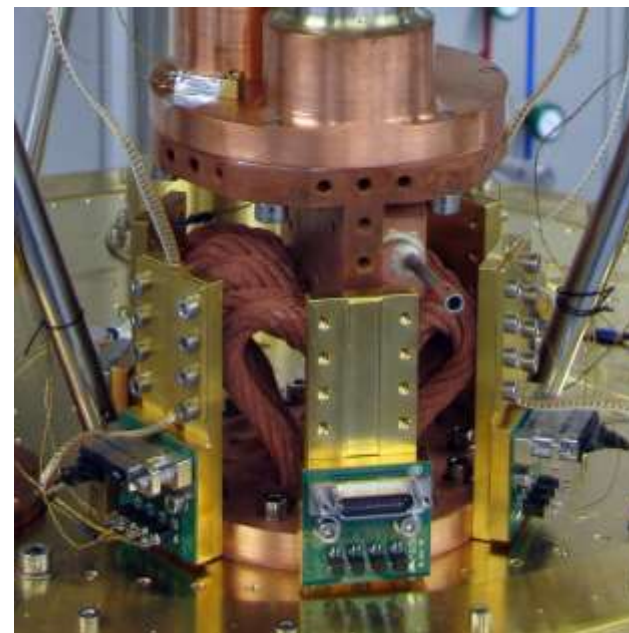
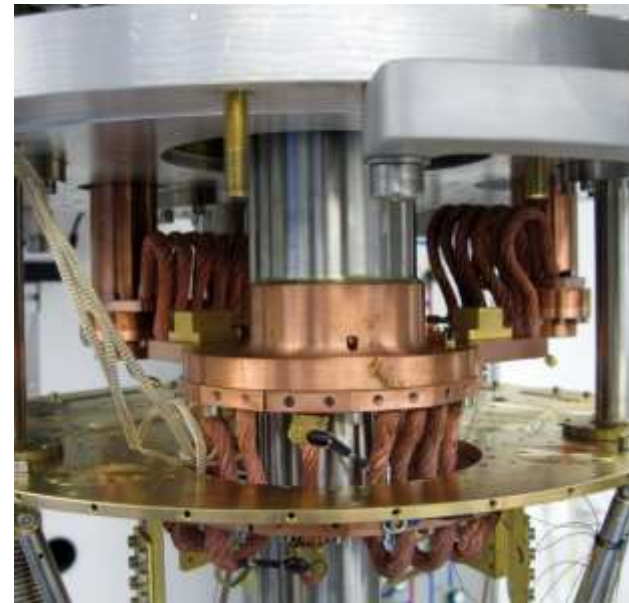
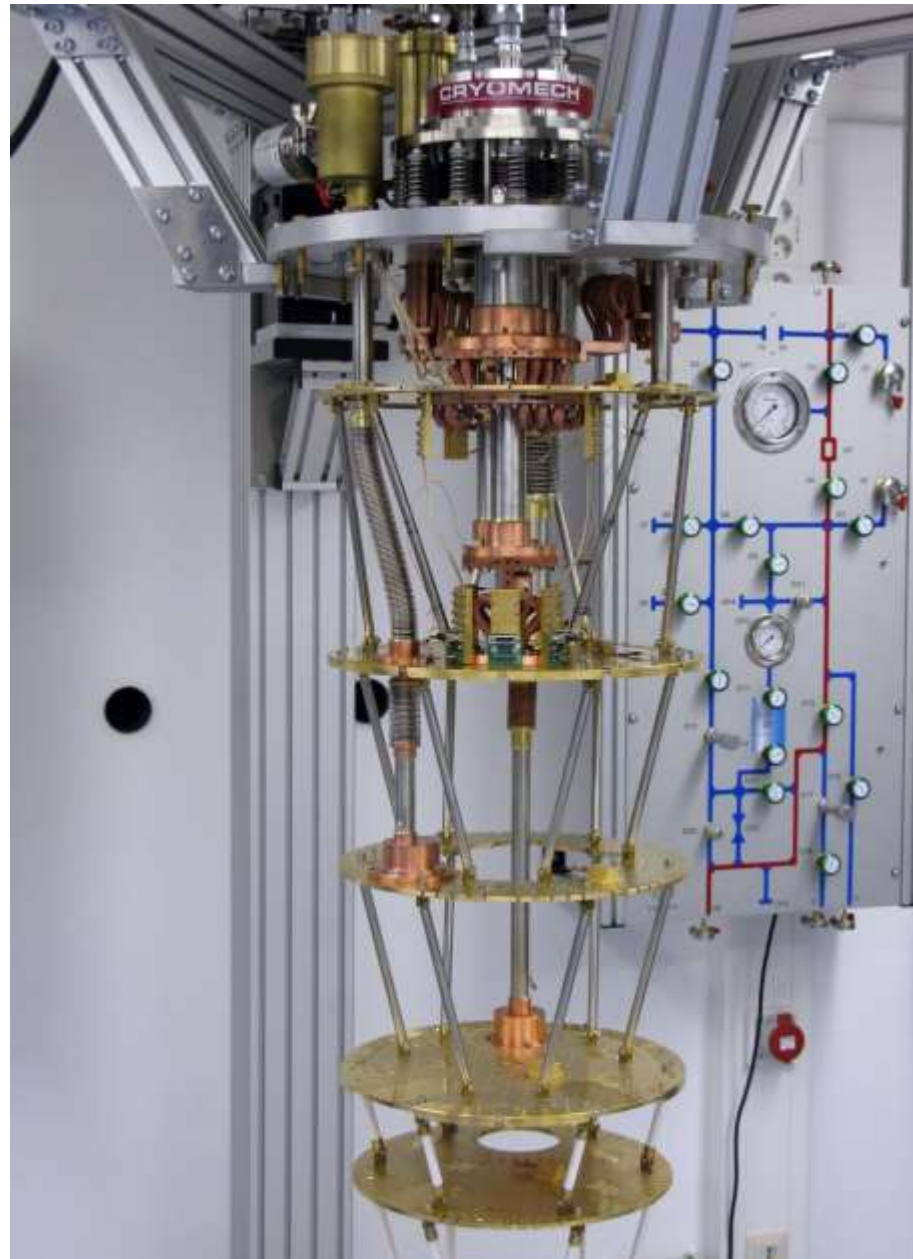


Oxford Instruments Triton family



Marktanteil von trockenen Mischkühlern: > 90%

Trockene Mischkühler



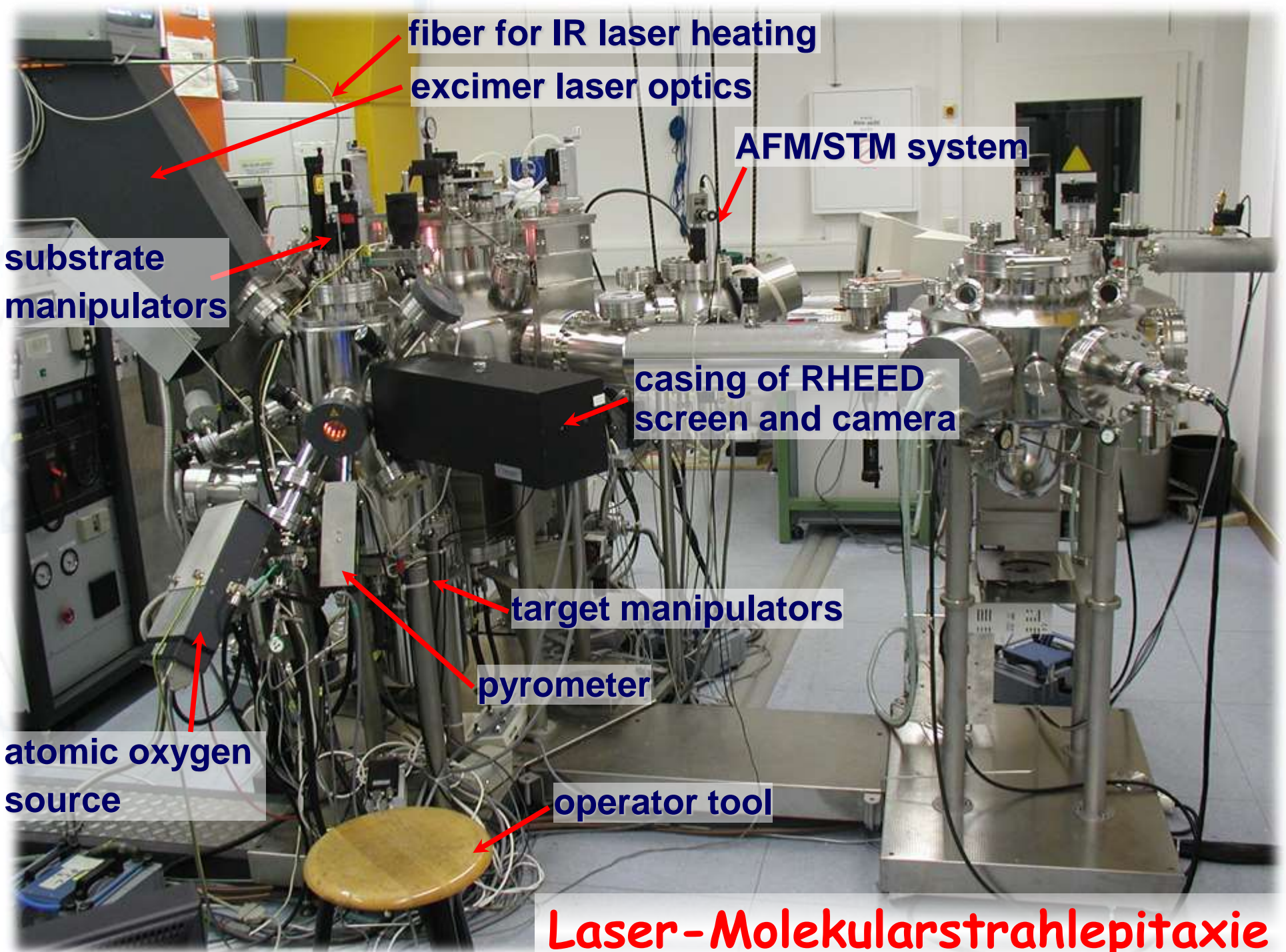
dry dilution
refrigerator with
large sample
stage

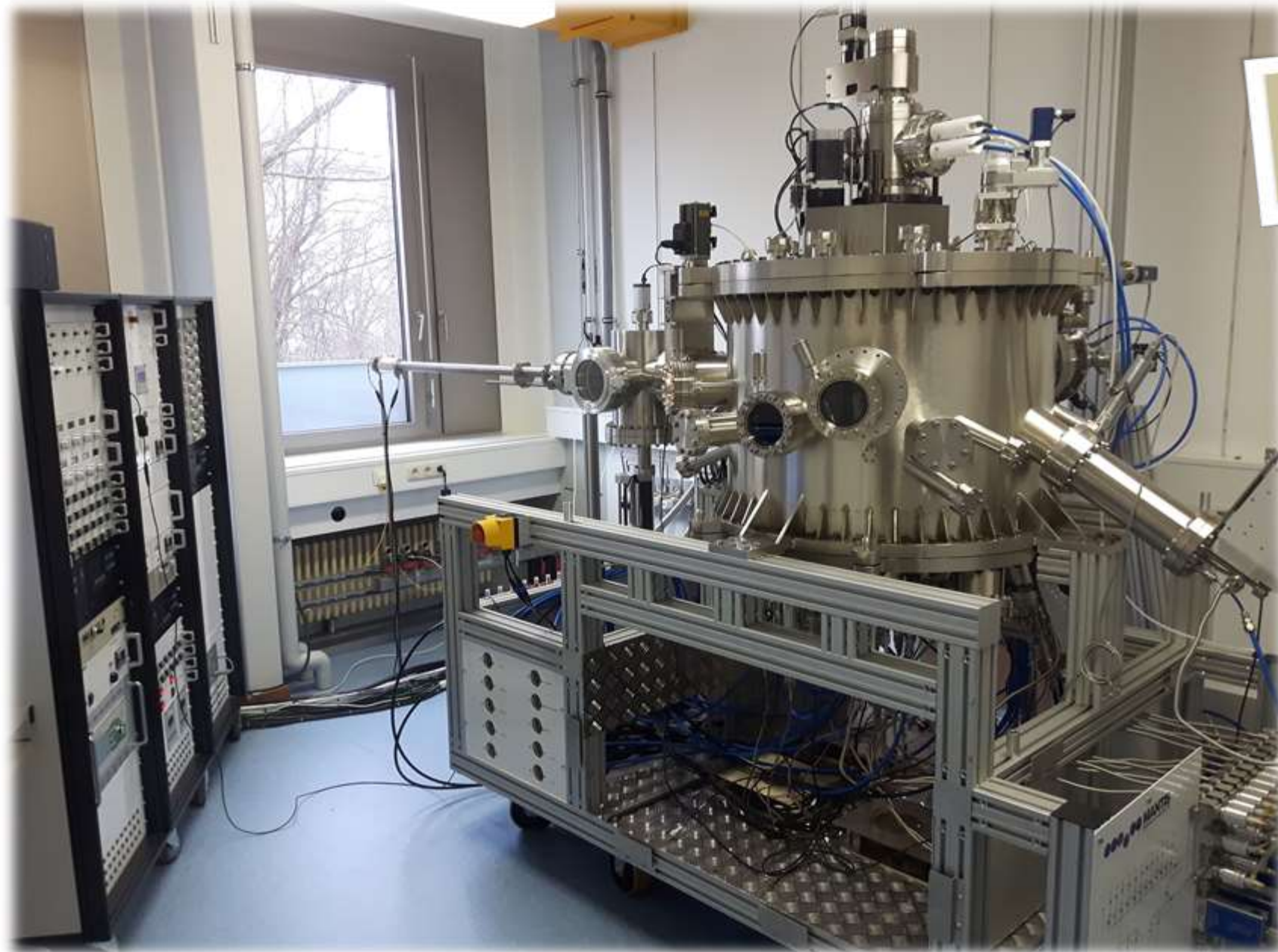
*Marx
Höß
Uhlig*

IBM Q System One









ULTRA DISC

UHV Sputtersystem für
supraleitende Schichten
(7 Quellen, bis 4 Zoll)