

Schwingungsthematik in Präzisionslaboren aus der Perspektive der Nutzer

Tobias Donner

Institute for Quantum Electronics

ETH Zürich



In Zahlen



19'800 Studierende, davon 4'000 Doktorierende, aus über 120 Ländern



500 Professorinnen und Professoren



355 Spin-off-Firmen seit 1996



21 Nobelpreisträger (darunter Albert Einstein und Wolfgang Pauli)
1 Empfänger der Fields-Medaille
2 Pritzker-Preisträger

Zwei Standorte:

- ETH Zentrum
- ETH Hönggerberg

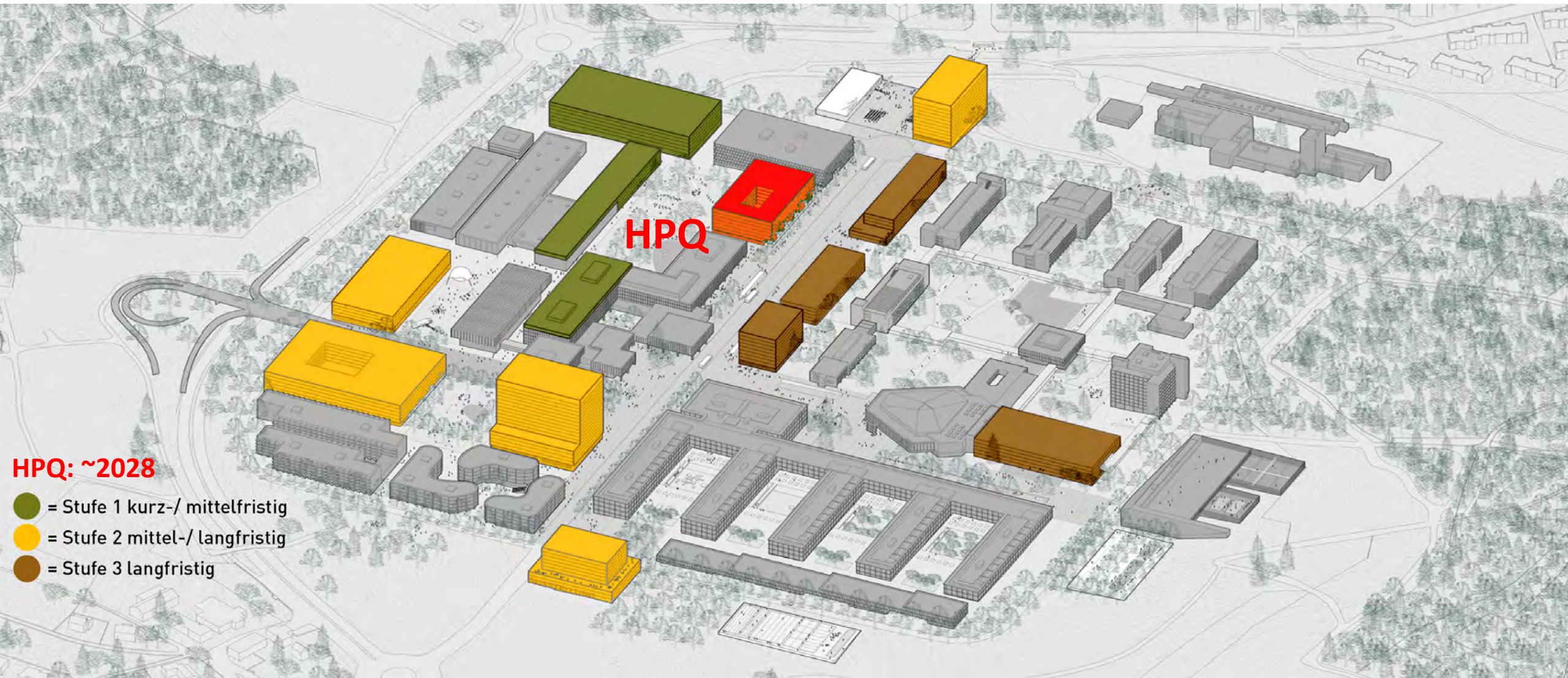


Campus Höggerberg – Masterplan 2040

2018: 11'000 Personen auf Campus



2040: 20'000 Personen auf Campus?!



HPQ

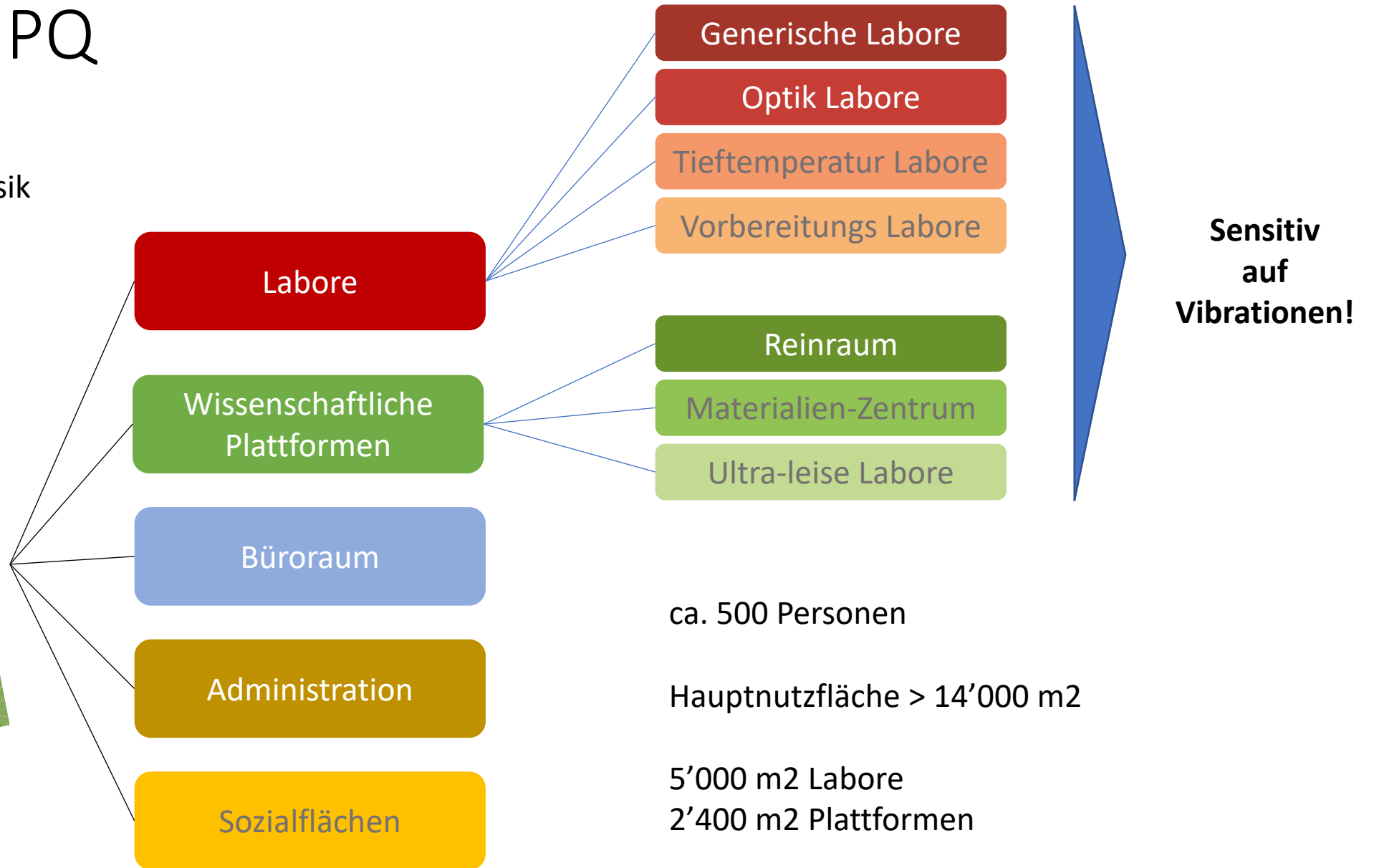
HPQ: ~2028

- = Stufe 1 kurz-/ mittelfristig
- = Stufe 2 mittel-/ langfristig
- = Stufe 3 langfristig

Neubau HPQ

D PHYS

Departement für Physik



Externe Vibrations-Quellen

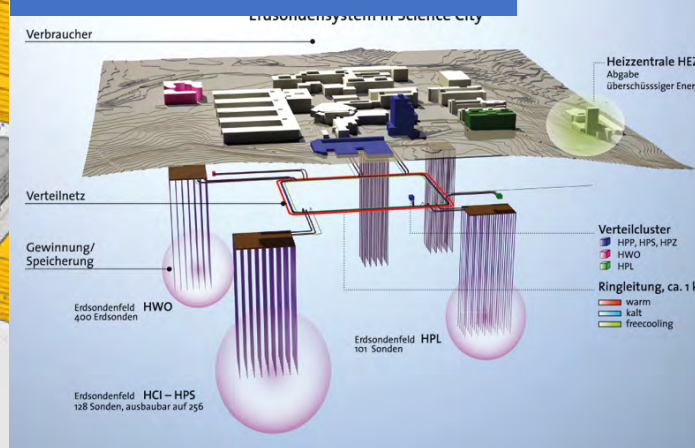
Material-Tests



Busverkehr



Erdwärme-Felder



Zentrifuge

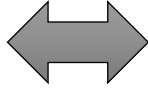


Campus-Betrieb





Architekten und Planer



Zukünftige Nutzer



Gibt es etwas bei Vibrationen zu berücksichtigen?



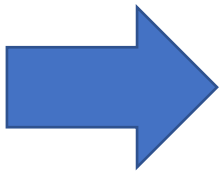
Es soll so sein, dass meine Experimente funktionieren!



Welche Vibrationskriterien sollen denn eingehalten werden?



Wie heisst das beste Vibrationskriterium...?



- Nutzer sind sich oftmals nicht im Klaren darüber, ob ihre Anwendungen sensitiv auf Vibrationen sind.
- Der durchschnittliche Nutzer kann oftmals keine Kriterien angeben.
- Konservative Lösungen werden gewählt um auf der sicheren Seite zu sein.

Wie beschreibt man die Qualität eines Standorts?



Zukünftige
Nutzer



Architekten und
Planer



- Verstehen der zukünftigen Anwendungen
- Messung und Auswertung von Vibrationen
- Bestehende Normen
- Definition durch den zukünftigen Nutzer

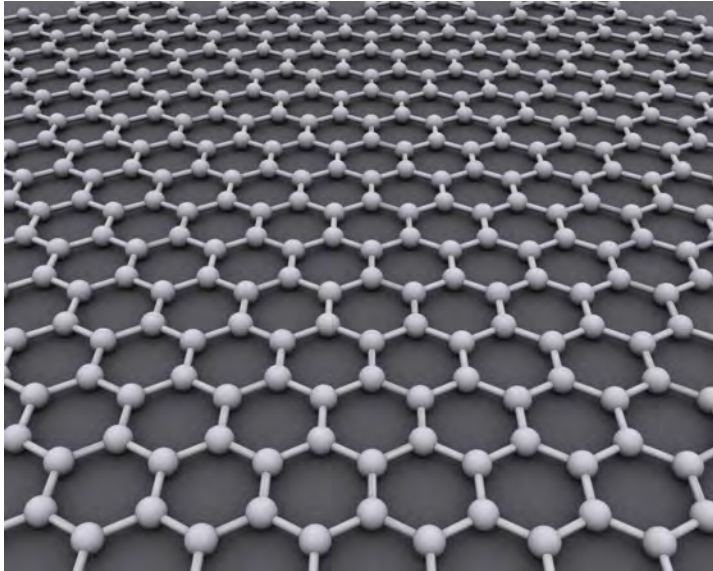
Fragen an zukünftige Nutzer



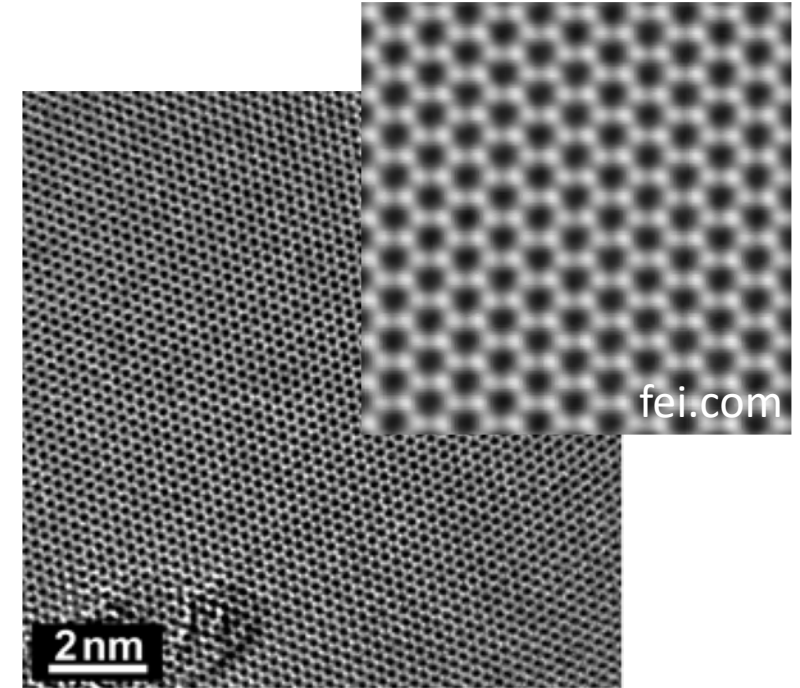
- Gibt es bestehende Spezifikationen, z.B. von Geräteherstellern?
- Welche Massnahmen wurden bisher getroffen?
- Treten im bisherigen Betrieb Probleme durch Vibrationen auf?
- Gibt es mechanische Resonanzen im Aufbau?
- Über welche Zeitintervalle müssen Vibrationen **durchgehend** auf niedrigem Niveau sein?
- **Referenzmessung** der bestehenden Situation.

Vibrationssensitive Anwendungen

Elektronen-Mikroskop



By AlexanderAIUS - Own work, CC BY-SA 3.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=11294534>



High-Resolution TEM on Graphene

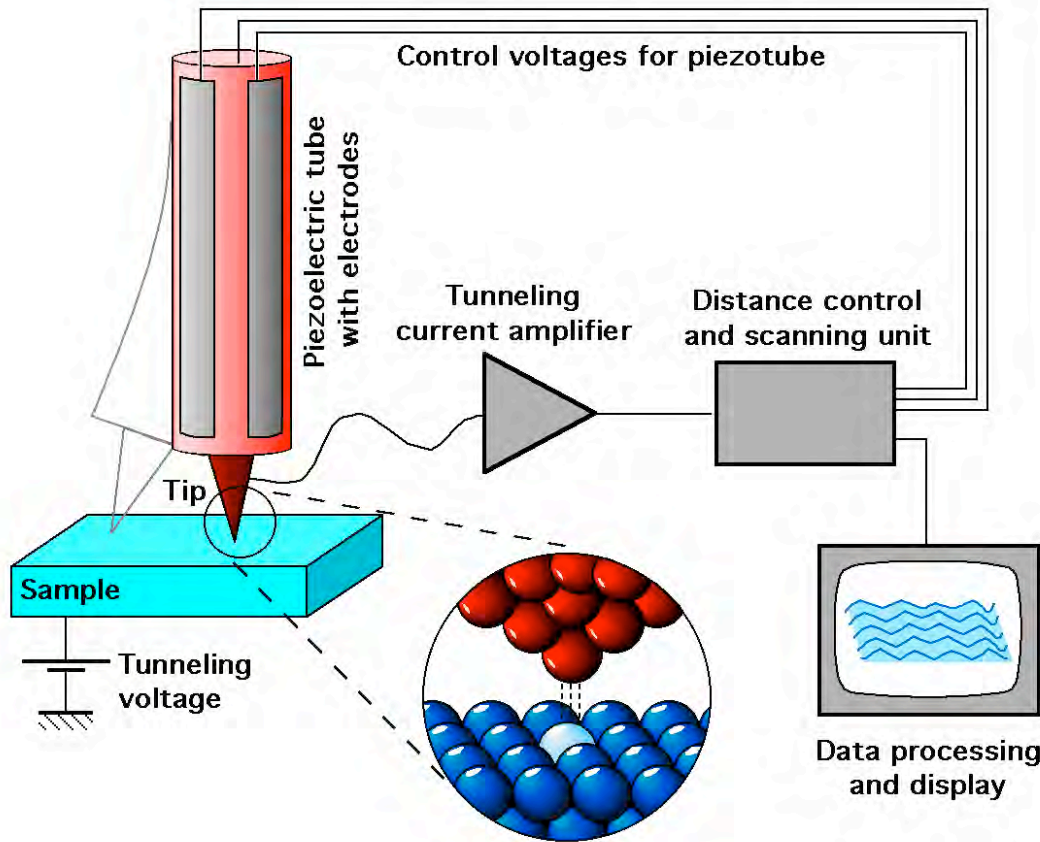
J. Kling, DTU center for elektronnanoskopi

- Grosses Gerät -> “weich”
- Auch empfindlich auf schwankende elektromagnetische Felder
- Diese können auch durch mechanische Bewegung in statischem Feld erzeugt werden!

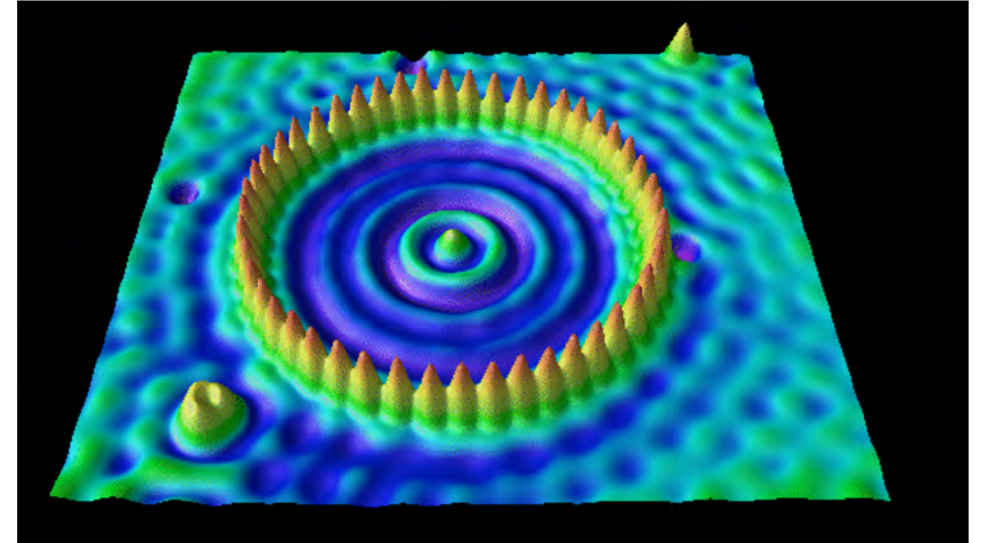
- Anforderungen vom Hersteller spezifiziert
- Bisher: Spezialfundamente im Keller
- Extreme Vibrationsbedingungen:
Je stiller desto besser
- Mehrere Stunden pro Bild

Vibrationssensitive Anwendungen

Raster-Tunnel-Mikroskop



48 Eisenatome auf Kupfer

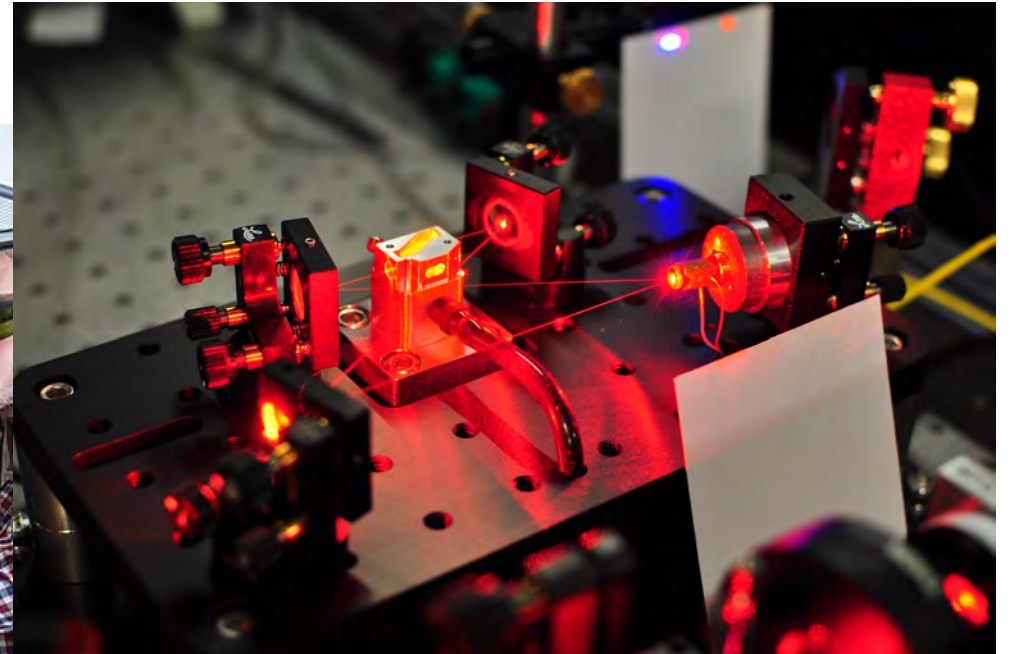
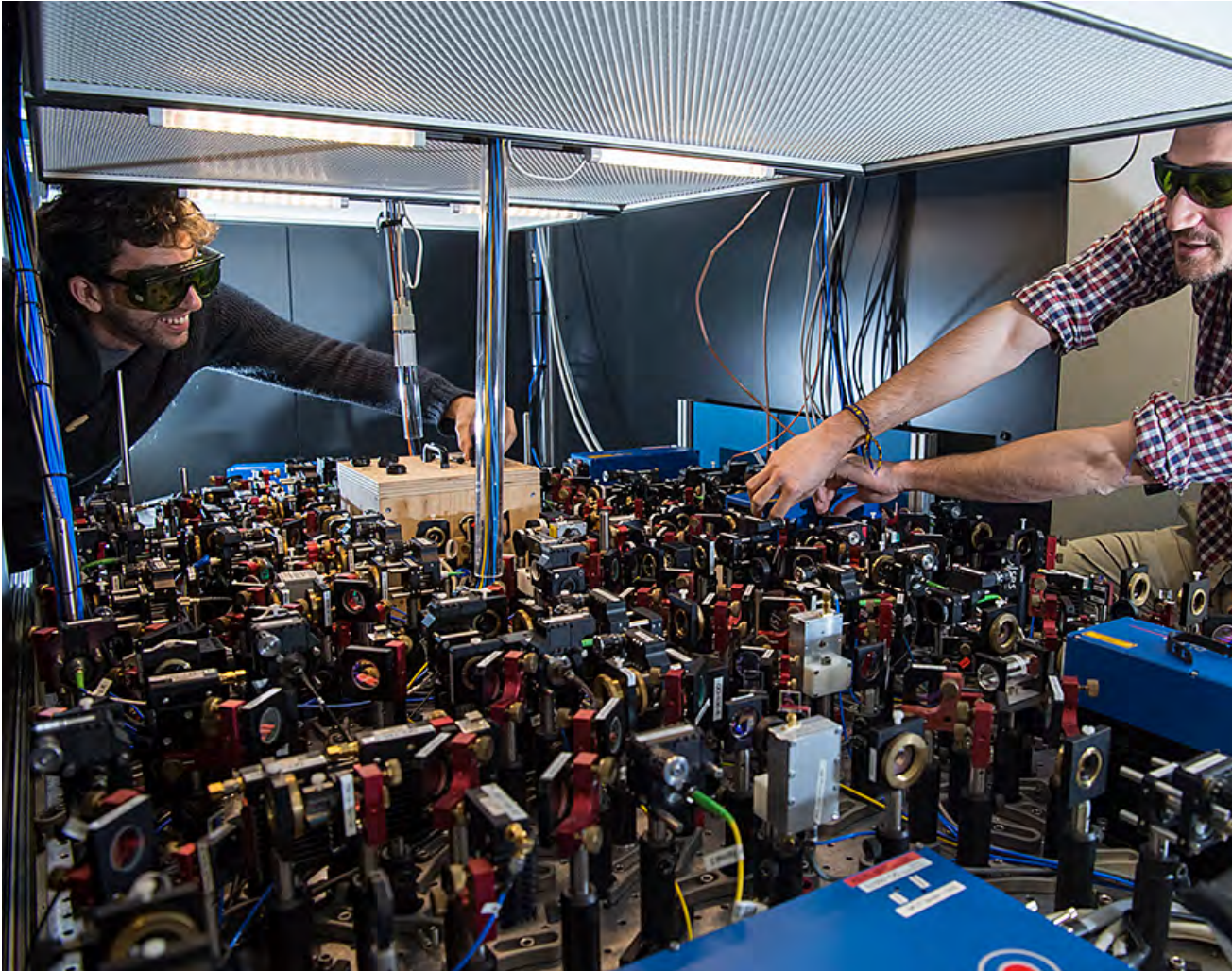


Rev. Mod. Phys., Vol. 71, No. 2, Centenary 1999

- Selbstgebautes Gerät
- Bisher: Labore im Keller
- Extreme Vibrationsbedingungen:
Je stiller desto besser
- Mehrere Stunden pro Bild

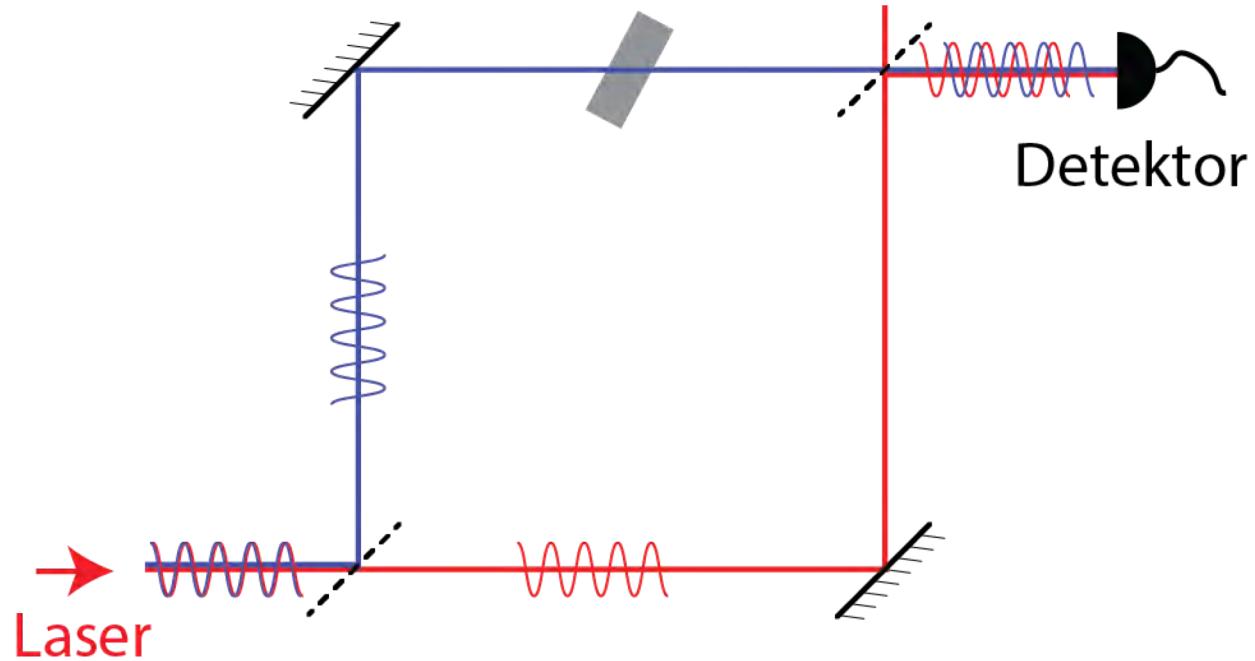
Vibrationssensitive Anwendungen

Laser Labore



- Selbstgebaute Versuchsanlagen
- Bisher: Labore im Keller, optische Tische
- Unbekannte Anforderungen
- Mehrere Sekunden pro Versuch

Laser-Interferometer

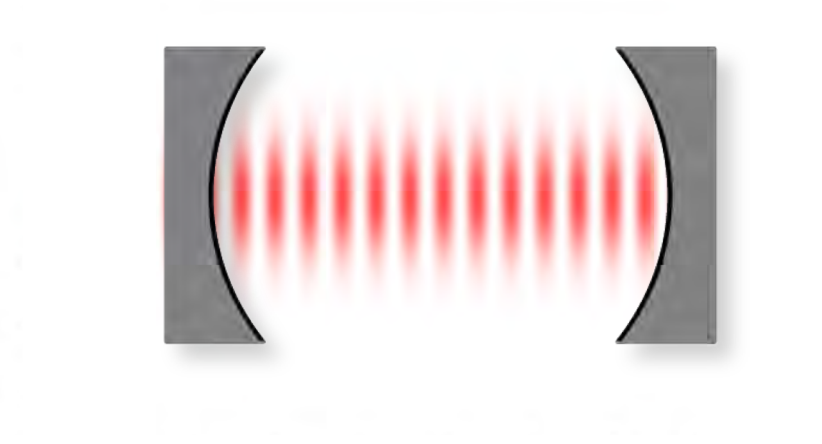
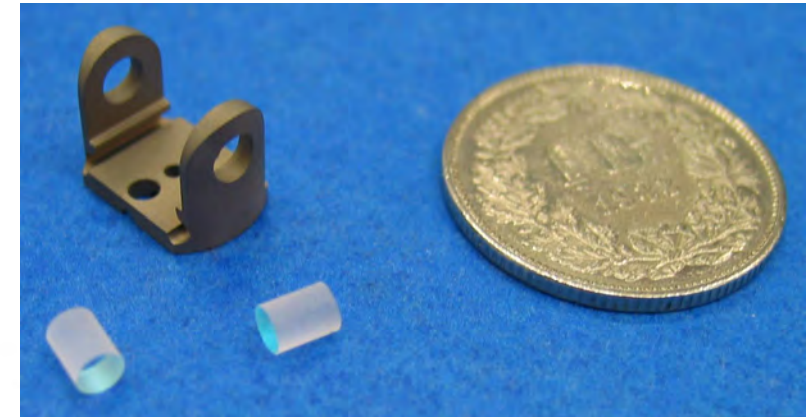


Mach-Zehnder Interferometer:

Misst Pfadlängenunterschiede $< 1\mu\text{m}$!

Meterlange optische Pfade

--> Hohe Empfindlichkeit auf Vibrationen.



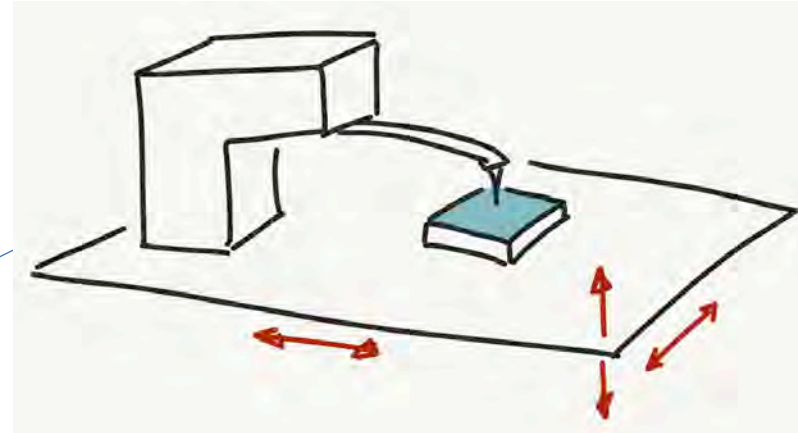
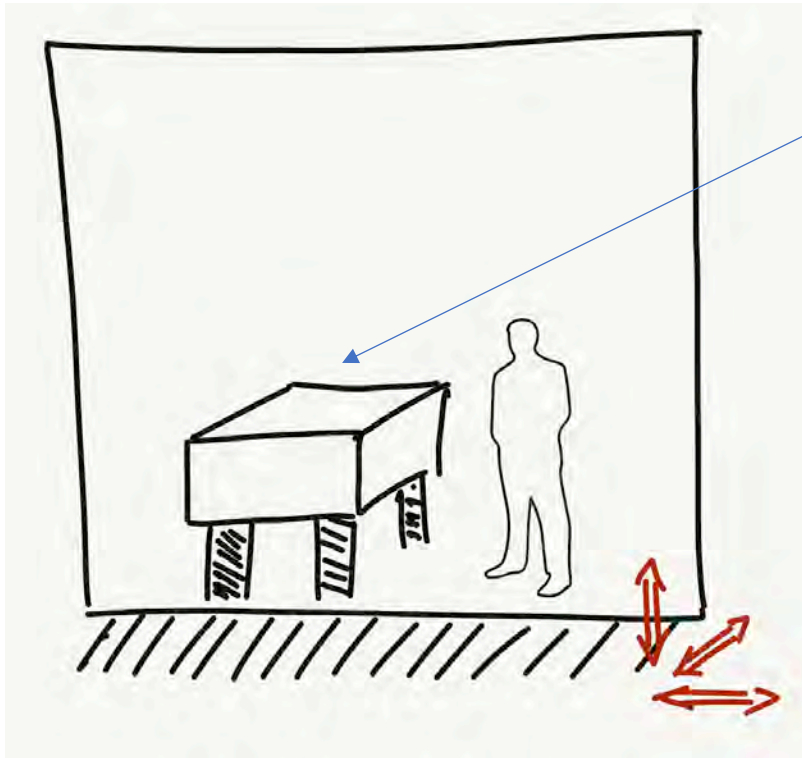
Optischer Resonator:

Misst Abstandsänderungen $< 1\text{nm}$

Steifer, kleiner Aufbau

-> Geringere Empfindlichkeit auf Vibrationen.

Vibrations-Messungen



In allen drei Raumrichtungen:

- Bewegungen des Bodens
- Bewegungen der Versuchs-Anlage

-> Messung von Amplitude als Funktion der Zeit

-> Sensoren übersetzen mechanische Bewegung in elektrisches Signal

Sensoren

- Weg-Messungen $x(t)$
- Geschwindigkeits-Messungen $v(t)$
- Beschleunigungs-Messungen $a(t)$

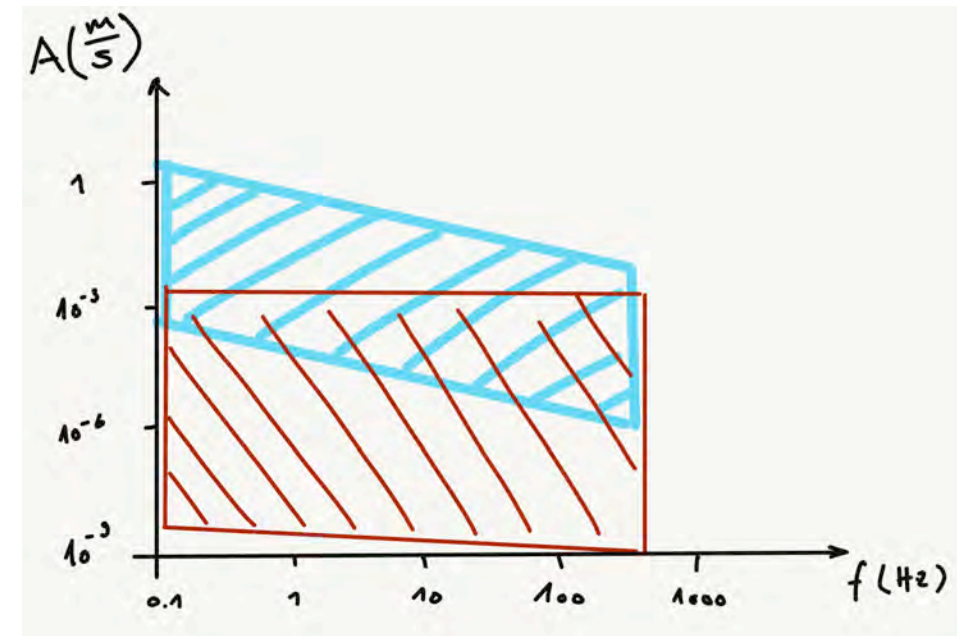
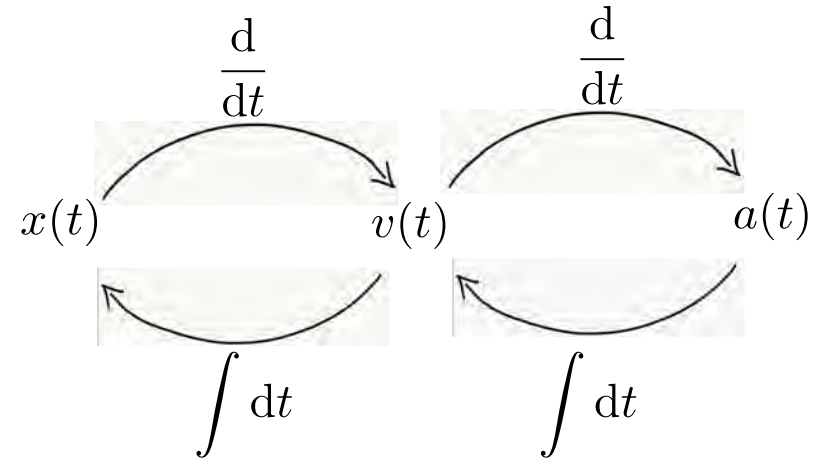
Alle drei Messgrößen sind mathematisch miteinander verknüpft. Bei der Wahl des Sensors ist daher die **Empfindlichkeit** und der **Frequenzbereich** entscheidend, weniger die Messgröße.

Für unsere Anwendung:

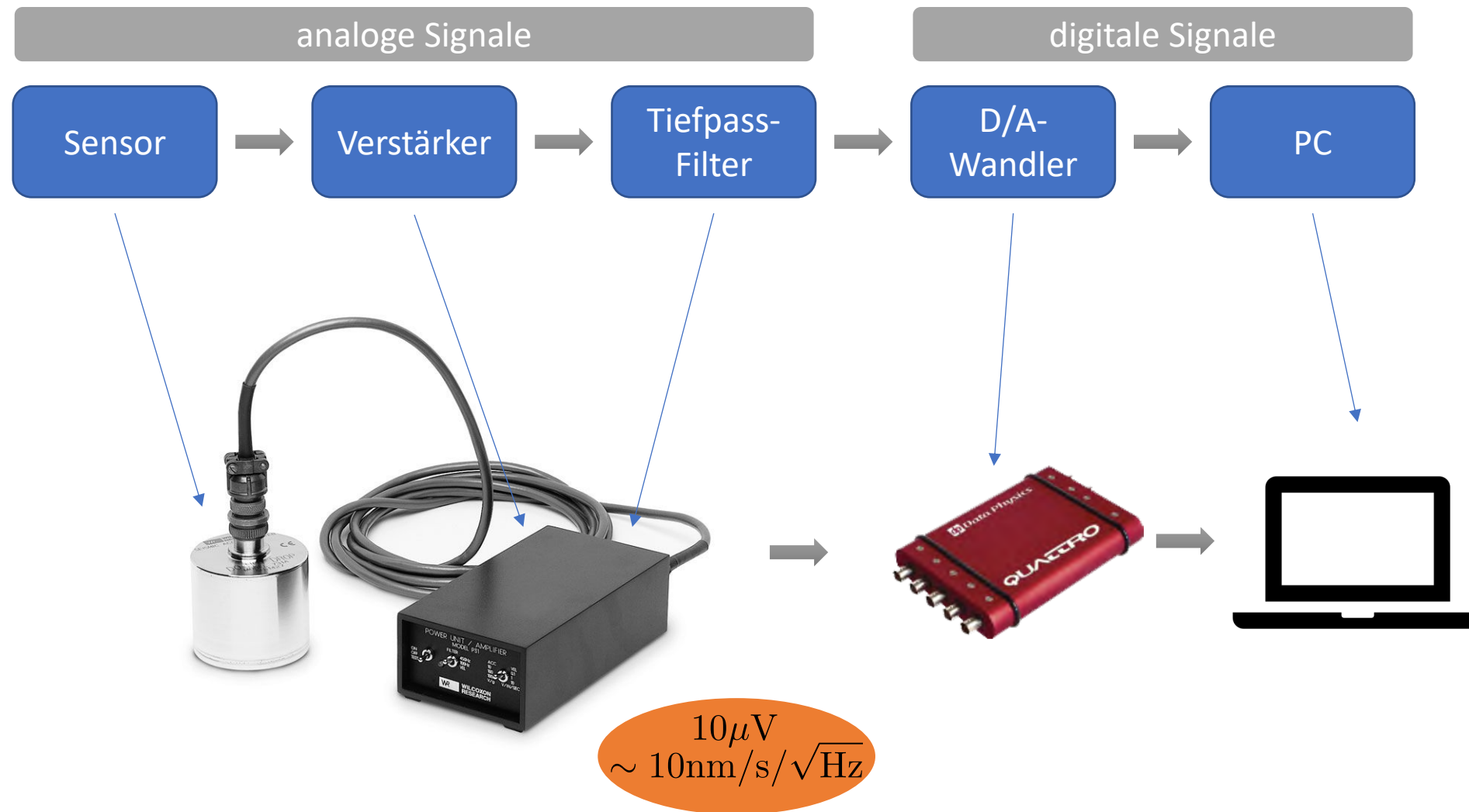
Höchste Sensitivität, niedriger Frequenzbereich

-> Beschleunigungssensoren:

- Rauschen bei $\sim 20 \text{ nm/s}/\sqrt{\text{Hz}}$
- Frequenzbereich 0.1 Hz bis 450 Hz

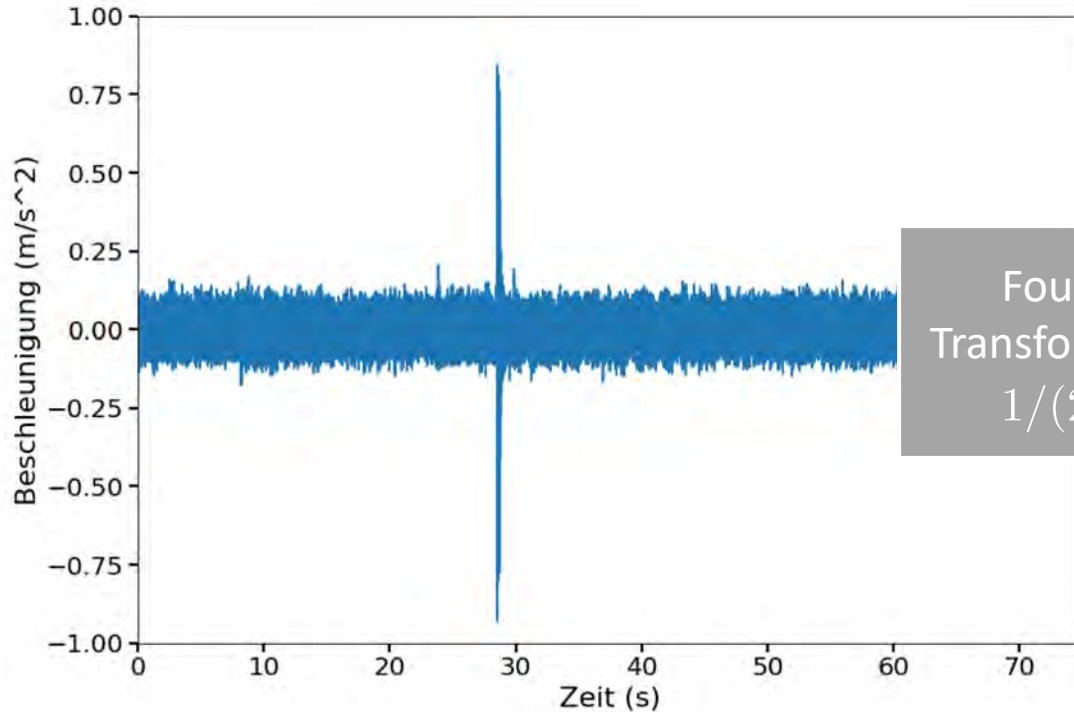


Messkette

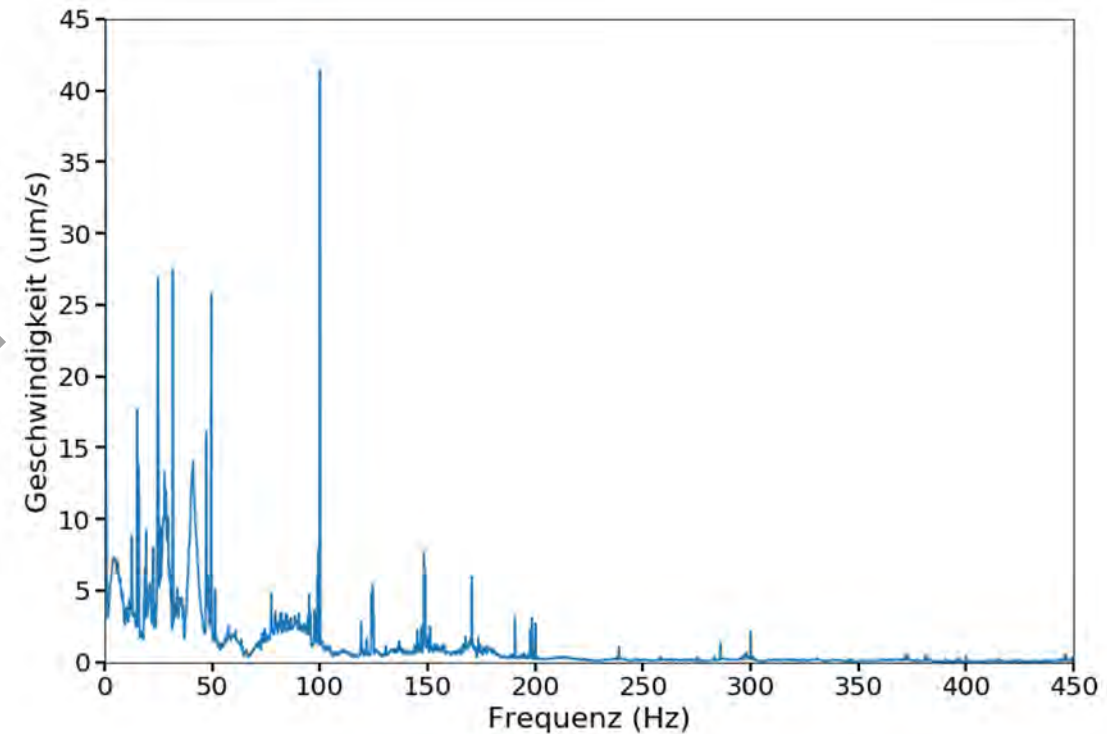


Analoger Teil der Messkette ist empfindlich auf externe Störungen wie elektromagnetische Felder!

Signalauswertung: Frequenzspektren

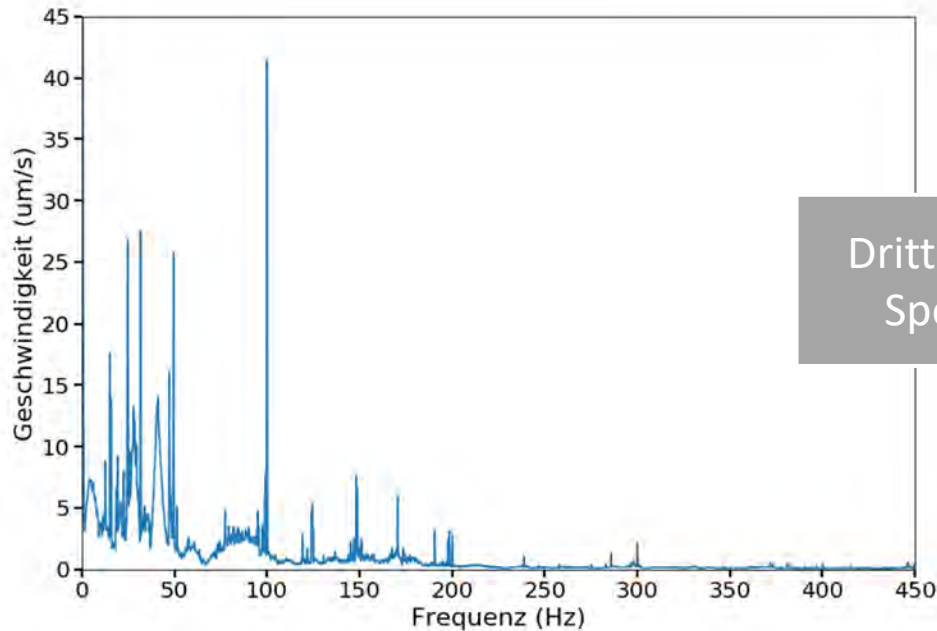


Fourier-
Transformation
 $1/(2\pi f)$

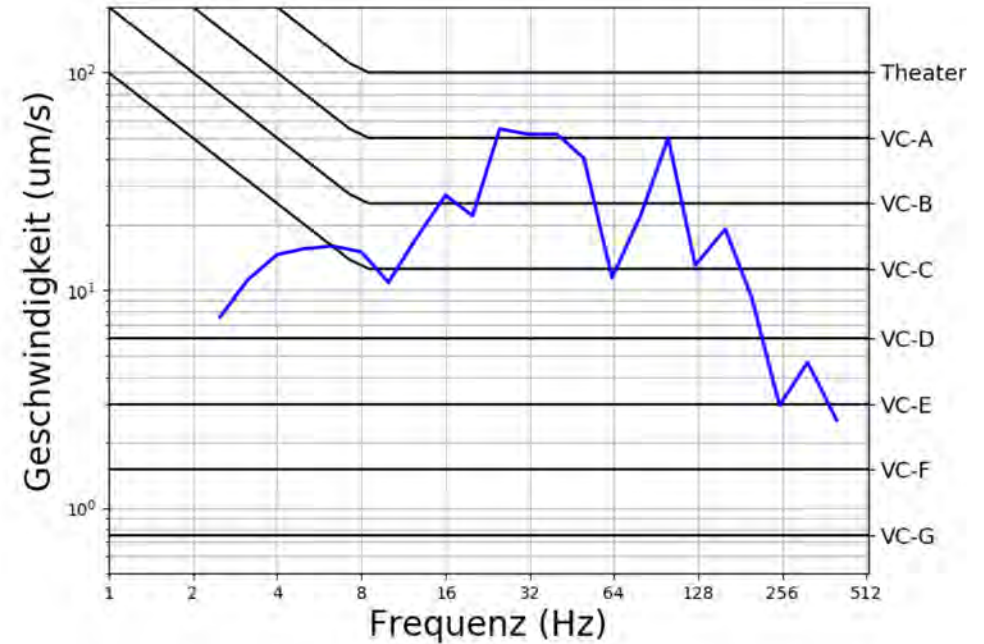


- Rohsignal (Beschleunigung als Funktion der Zeit) wird Fourier-transformiert
- Umrechnung von Beschleunigung in Geschwindigkeit im Frequenzraum: $1/(2\pi f)$
- Amplitude ist abhängig von der gewählten Frequenzauflösung

Signalauswertung: 1/3-Oktav-Spektren

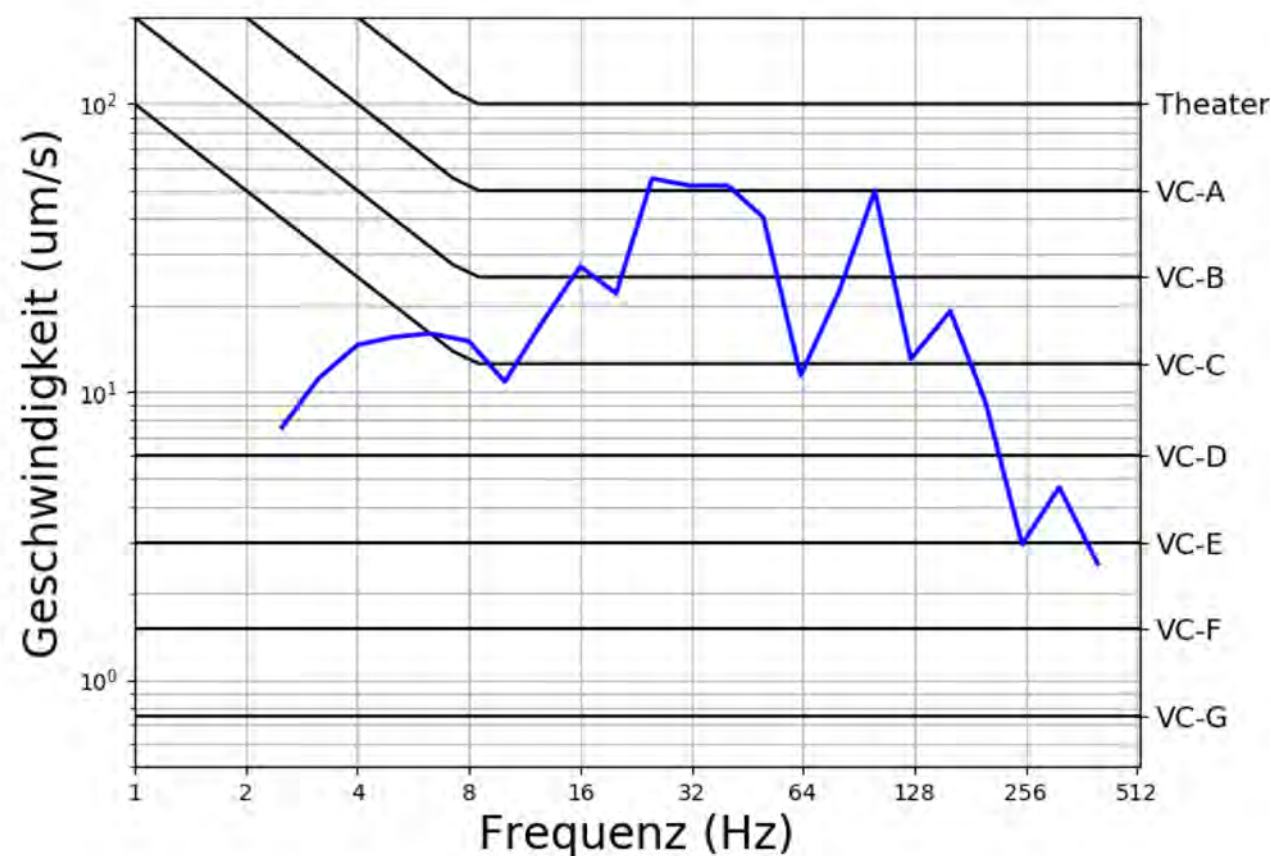


Drittel-Oktav-Spektrum



- Feinaufgelöstes Frequenzspektrum wird in Drittel-Oktav-Spektrum konvertiert
- Darstellung auf doppelt-logarithmischer Skala
- VC-Normen erlauben Einordnung des Vibrations-Niveaus
- Feinaufgelöste Spektren sind weiterhin wichtig um Resonanzen zu finden!

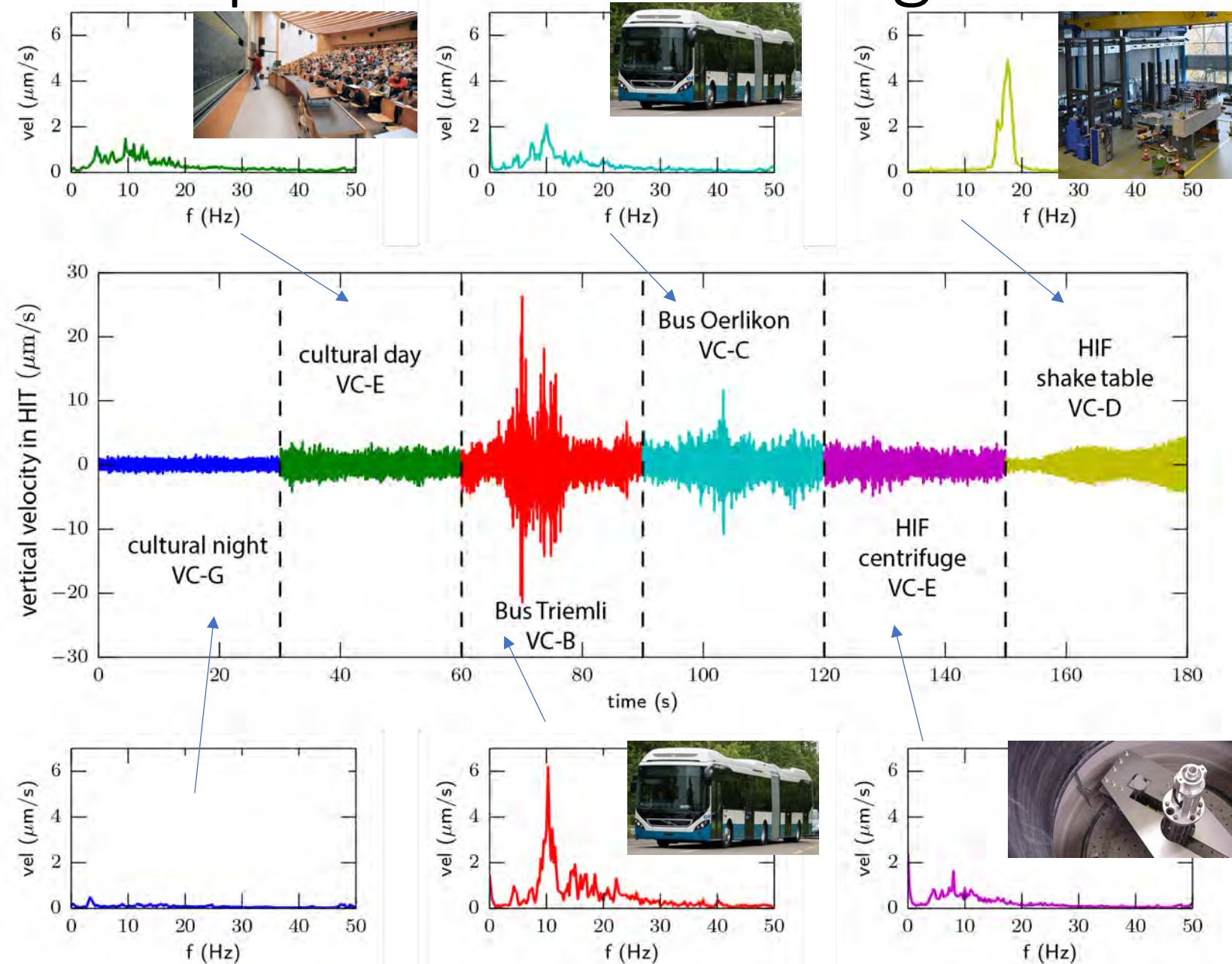
VC-Werte (Vibration Criteria nach Gordon)



Im gezeigten Beispiel: “Theater”

VC-Stufe	Pegel in RMS-Spektren (8-100Hz)	Typische Nutzung	Strukturgröße
Theater	100 µm/s	Fühlschwelle	30 µm
VC-A	50 µm/s	Opt. Mikroskope 400x	8 µm
VC-B	25 µm/s	Opt. Lithographie	3 µm
VC-C	12.5 µm/s	Opt. Mikroskope 1000x	1 µm
VC-D	6.25 µm/s	Elektronen-Mikroskope	0.3 µm
VC-E	3.1 µm/s	Elektronenstrahl-Lithographie	<0.1 µm
VC-F	1.6 µm/s	Extrem ruhige Bedingungen	n/a
VC-G	0.78 µm/s	Extrem ruhige Bedingungen	n/a
VC-...	...		

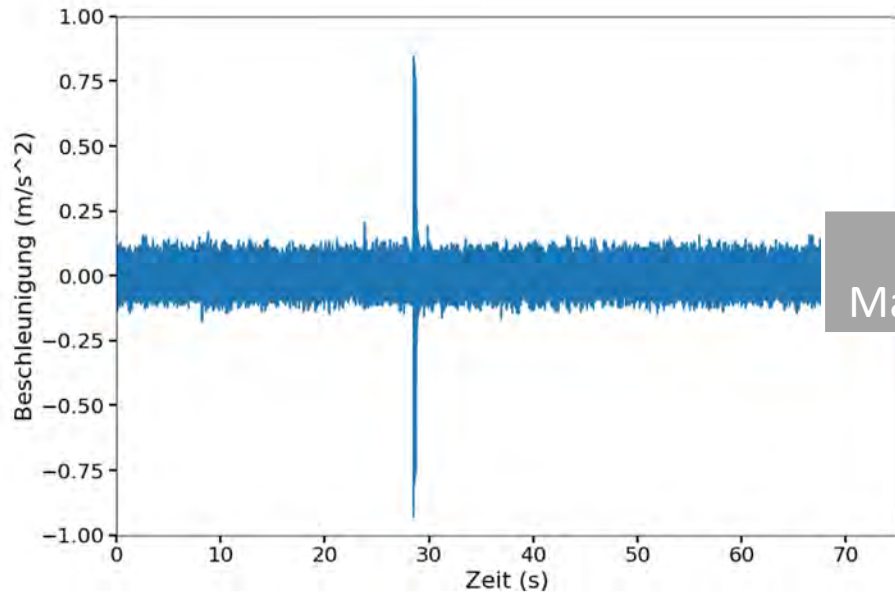
Campus – Untersuchungen



- Vibrationsquellen sind zeitabhängig
- Vibrationsquellen haben ihre eigene Charakteristik

-> Statistische Aufbereitung der Daten ist notwendig!

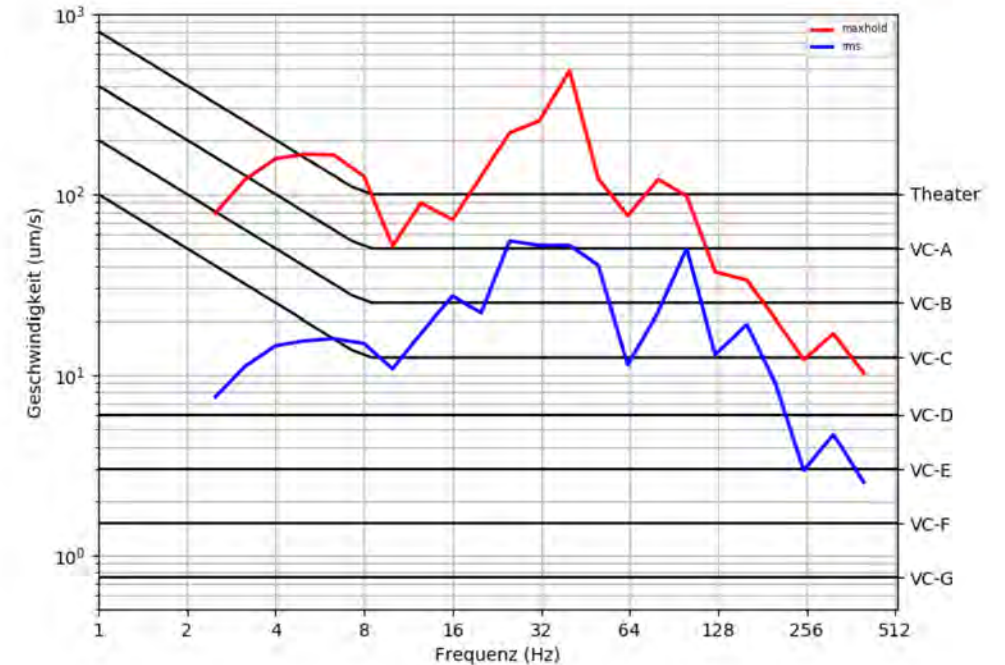
Statistische Aufbereitung



RMS oder
Maximalausschlag?

Fragestellungen:

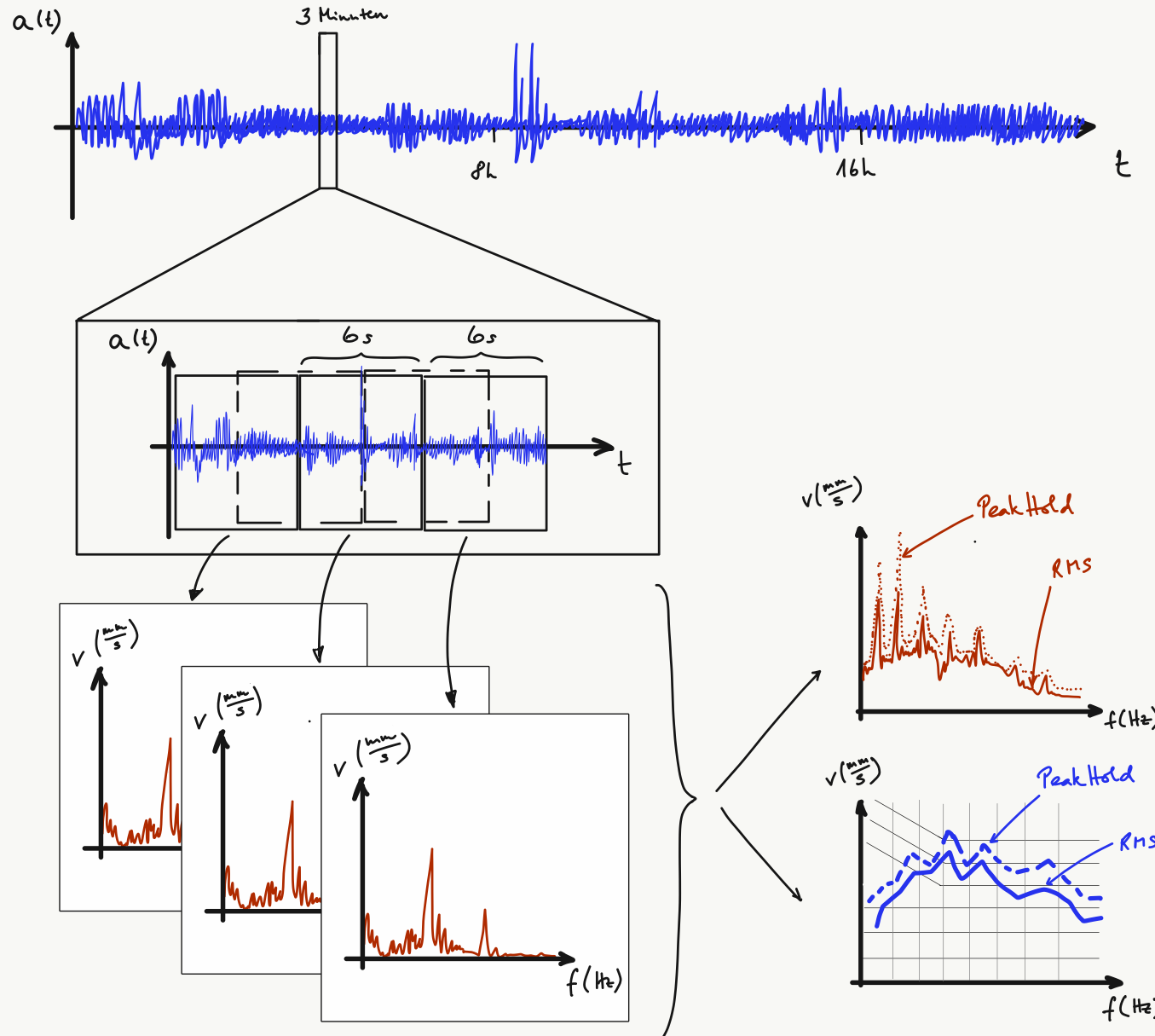
- Wird der Mittelwert oder das Maximum betrachtet?
- Über welche Zeitintervalle soll gemittelt werden?
- Wie wird die Statistik von Ausschlägen dargestellt?



Problematik:

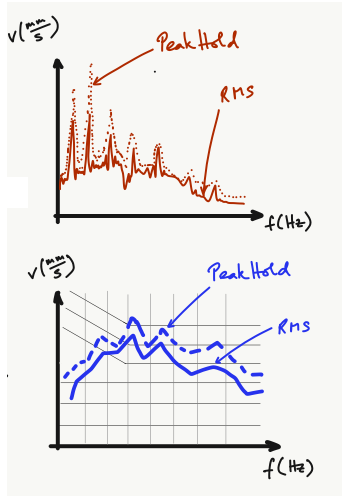
Es gibt keine genormte Vorgaben für die Auswertung. Hier ist es wichtig, dass der Nutzer selber genügend Expertise entwickelt, um sowohl mit den Spezialisten für die Messungen als auch mit den Planern reden zu können

Signalauswertung – unser Vorgehen



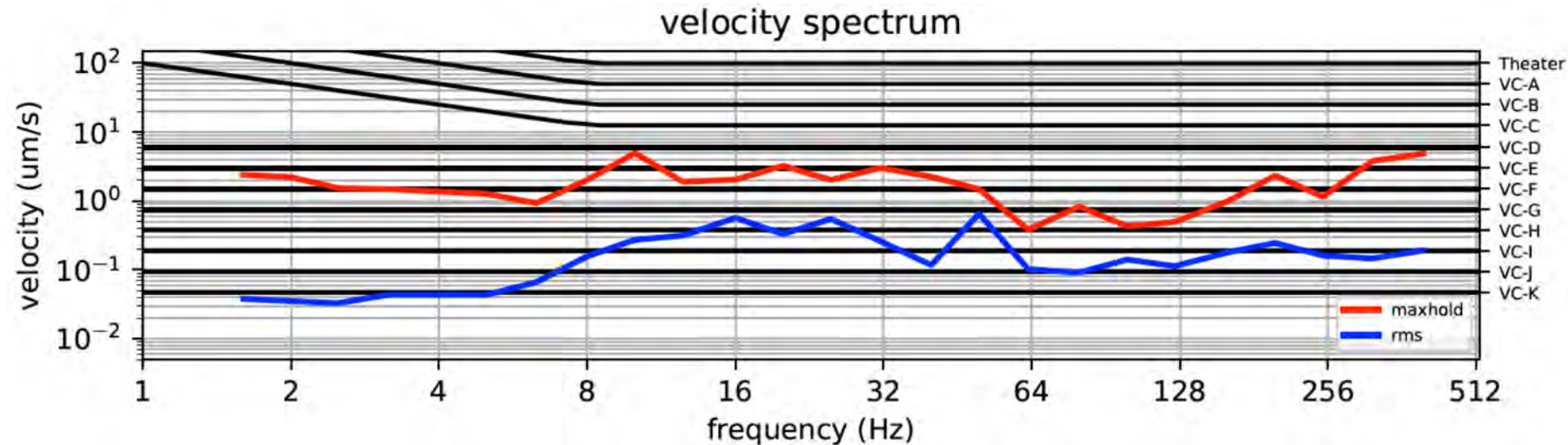
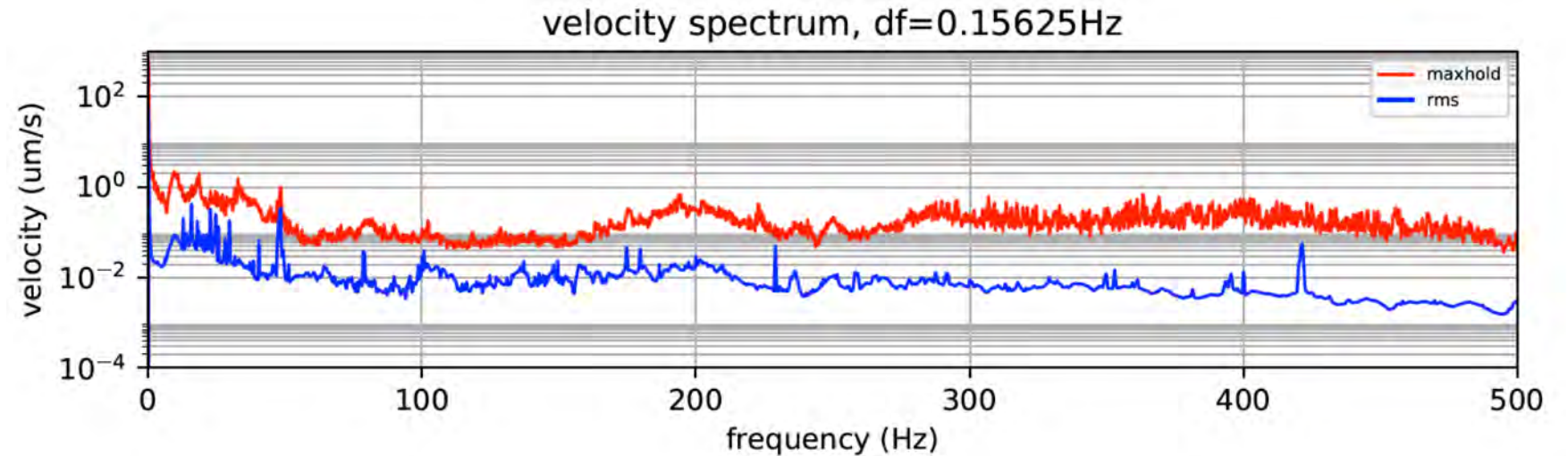
- 24 h kontinuierliche Aufnahme von Daten
- Unterteilung in 3-Minuten Segmente
- Weitere Unterteilung der Daten in Zeitfenster von 6s Länge, 50% Überlapp
- Berechnung der feinaufgelösten Spektren und Drittel-Oktav-Spektren für jedes Zeitfenster
- Quadratischer Mittelwert (RMS) der Spektren in 3-Minuten Intervallen
- Maximalwerte (PeakHold) der Spektren in 3-Minuten Intervallen
- Diese 3-Minuten-Spektren dienen als Grundlage für die weitere statistische Auswertung

Statistische Aufbereitung

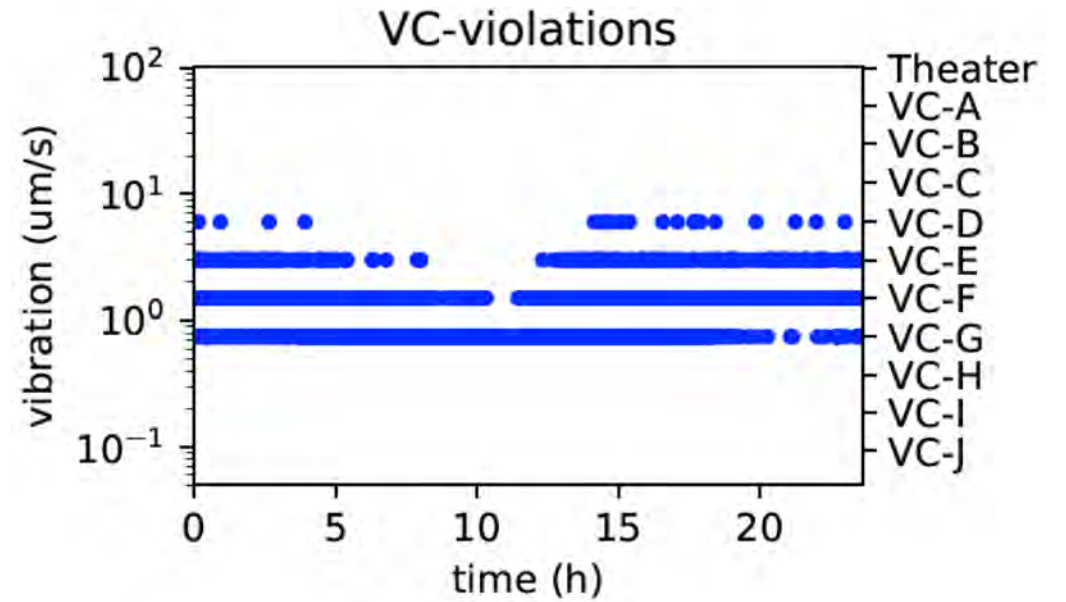
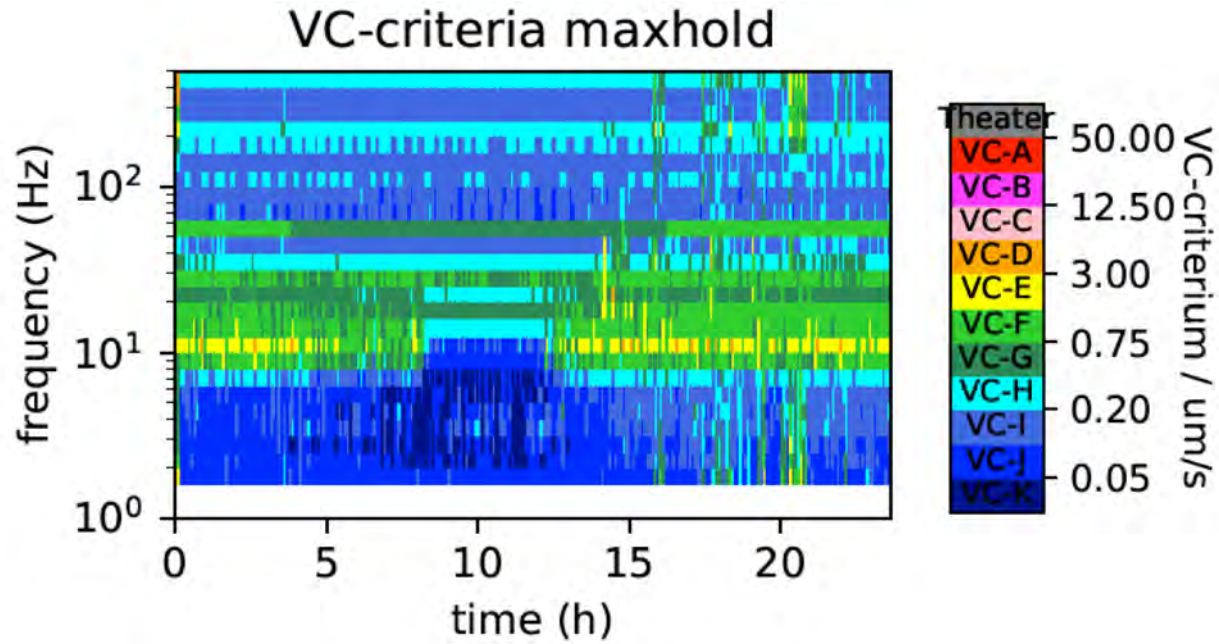


- Feinaufgelöste und Drittel-Oktav-Spektren über gesamte Messzeit:

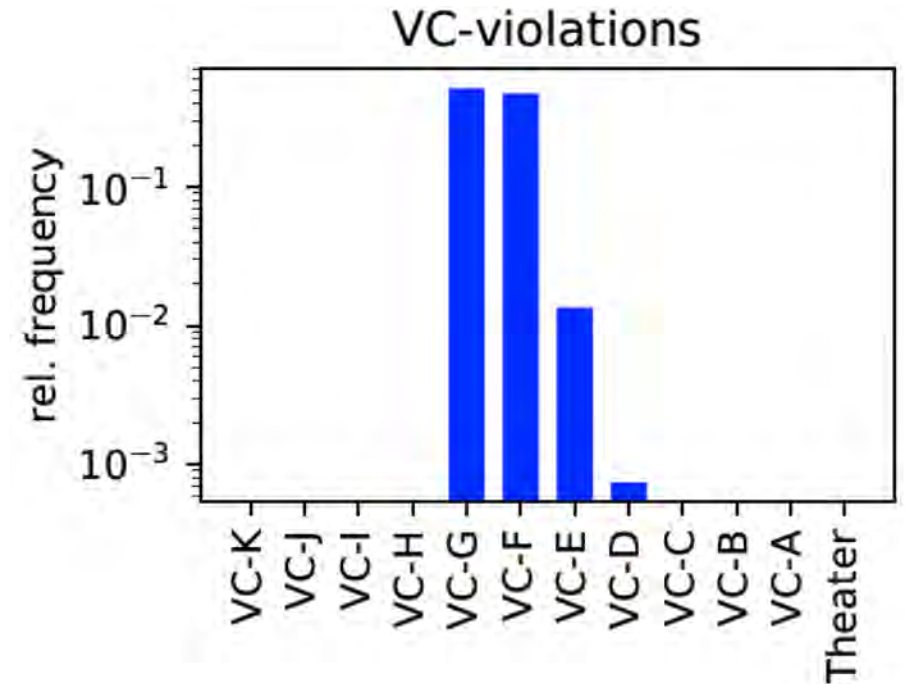
RMS- und PeakHold-Werte



Statistische Aufbereitung

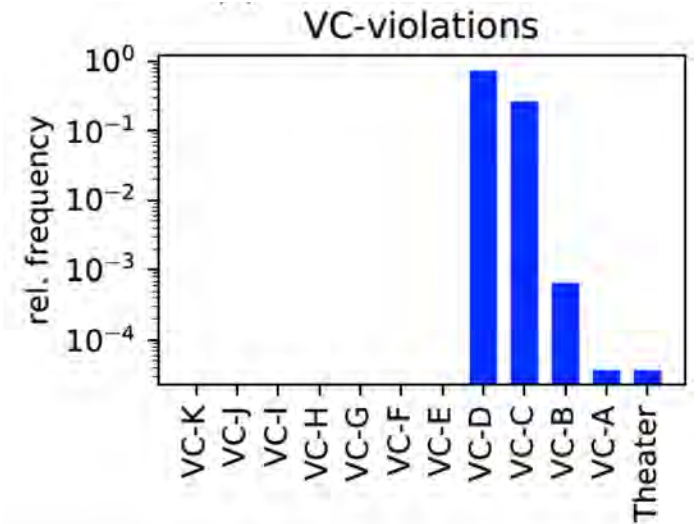
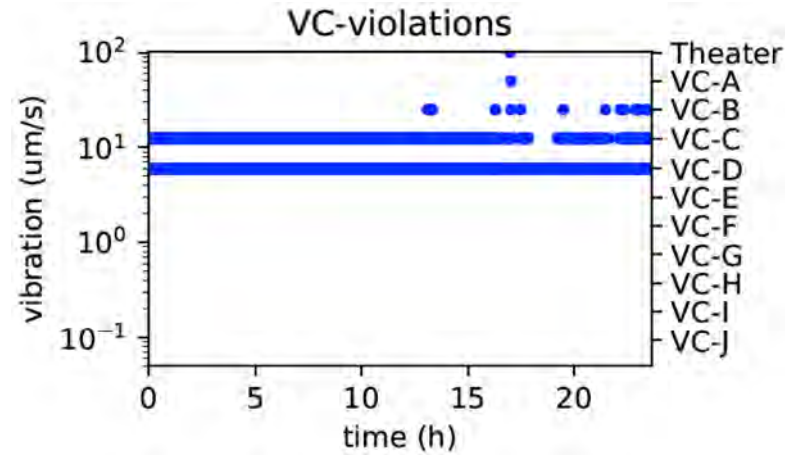
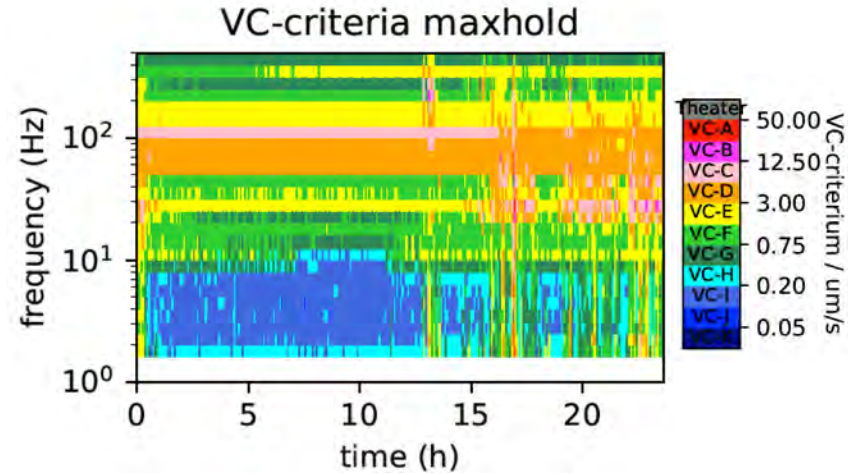


- 3-Minuten-Spektren als Funktion der Zeit
- Erreichtes VC-Kriterium als Funktion der Zeit
- Histogramm der erreichten VC-Kriterien

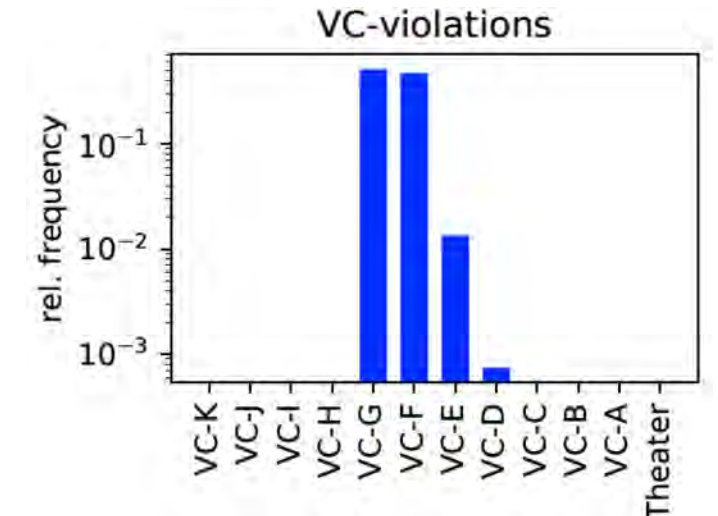
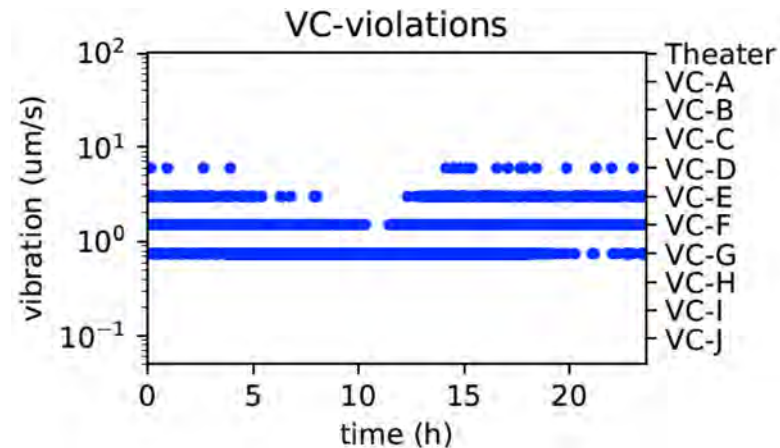
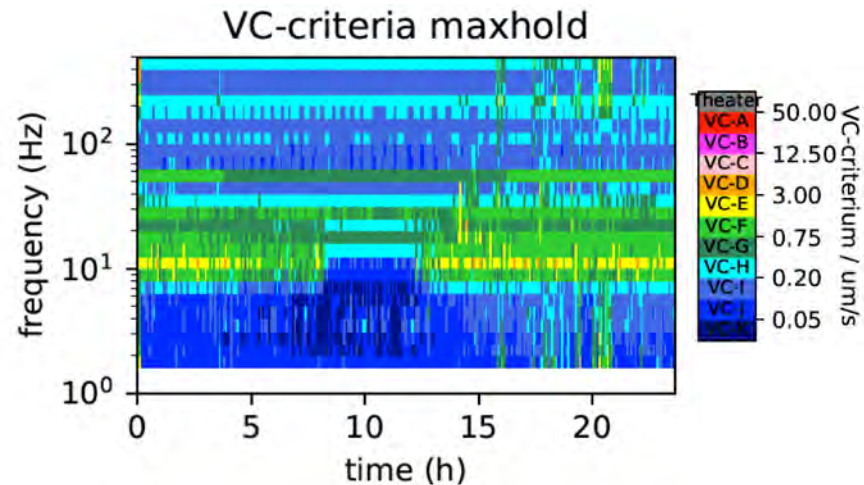


Vergleich zweier Stockwerke

4. Stockwerk



Keller



Quintessenz für den Nutzer

- Vibrationsthematik ist nicht mit einer Zahl zu erfassen
- Statistische Aufbereitung ist notwendig um Qualität eines Standorts zu bestimmen
- Manche Experimente lassen sich mit wenig Aufwand weniger sensitiv gegenüber Vibrationen machen
- Andere Experimente benötigen herausragende Bedingungen

