

## **Erschütterungs- und Körperschalluntersuchung beim Schienenverkehr in der Schweiz – eine Standortbestimmung**

M. Birchmeier, D. Gsell, ZC Ziegler Consultants AG, Zürich, CH

### **Abstract**

Die Anzahl der durchzuführenden Untersuchungen bezüglich der Erschütterungs- und Körperschallimmissionen (kurz ESK-Immissionen) durch Schienenverkehr im Rahmen von Bahnprojekten hat in den letzten Jahren stark zugenommen. Grund ist die striktere Forderung durch die Behörden nach einer vollständigen Sachverhaltsabklärung, auch bei Projekten ohne zu erwartende Veränderungen der Immissionen und konsequenterweise auch bei Projekten von kleineren Bahnbetreibern. Dies führt bei allen mit solchen Bahnprojekten beschäftigten Stellen wie Ingenieurbüros, Bahnbetreiber und Behörden zu teils grossem Mehraufwand bei oftmals geringem Ertrag. Ziel dieses Beitrags ist die vielseitige Thematik und die damit verbundenen Probleme bei der Bearbeitung eines solchen Projekts aus Sicht der bearbeitenden Ingenieurbüros aufzuzeigen, wobei auch die Blickwinkel der anderen Beteiligten nicht ausser Acht gelassen werden sollen. Es soll damit das Verständnis für die Komplexität der Problemstellung und deren Lösung auf allen Seiten gefördert werden und einen Anstoss geben, das heutige Verfahren kritisch zu hinterfragen und pragmatisch an neuen Ansätzen für die wirklichen Problemfälle zu arbeiten, dies am besten in Zusammenarbeit mit allen Beteiligten.

## **Erschütterungs- und Körperschalluntersuchung beim Schienenverkehr in der Schweiz – eine Standortbestimmung**

M. Birchmeier, D. Gsell, ZC Ziegler Consultants AG, Zürich

### **1 Einleitung**

Die Anzahl der durchzuführenden Untersuchungen bezüglich der Erschütterungs- und Körperschallimmissionen (kurz ESK-Immissionen) durch Schienenverkehr im Rahmen von Bahnprojekten hat in den letzten Jahren stark zugenommen. Grund ist die striktere Forderung durch die Behörden nach einer vollständigen Sachverhaltsabklärung, auch bei Projekten ohne zu erwartende Veränderungen der Immissionen und konsequenterweise auch bei Projekten von kleineren Bahnbetreibern. Dies führt bei allen mit solchen Bahnprojekten beschäftigten Stellen wie Ingenieurbüros, Bahnbetreiber und Behörden zu teils grossem Mehraufwand bei oftmals geringem Ertrag. Ziel dieses Beitrags ist die vielseitige Thematik und die damit verbundenen Probleme bei der Bearbeitung eines solchen Projekts aus Sicht der bearbeitenden Ingenieurbüros aufzuzeigen, wobei auch die Blickwinkel der anderen Beteiligten nicht ausser Acht gelassen werden sollen. Es soll damit das Verständnis für die Komplexität der Problemstellung und deren Lösung auf allen Seiten gefördert werden und einen Anstoss geben, das heutige Verfahren kritisch zu hinterfragen und pragmatisch an neuen Ansätzen für die wirklichen Problemfälle zu arbeiten, dies am besten in Zusammenarbeit mit allen Beteiligten.

Der vorliegende Beitrag soll möglichst objektiv sein, ist jedoch auch subjektiv durch unsere Tätigkeiten und von uns bearbeiteten Projekte geprägt. Dieser Text hat daher keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern ist vor allem als Diskussionsgrundlage gedacht, in dem Punkte angesprochen werden, welche unseres Erachtens nicht geklärt oder nicht optimal sind.

Im Folgenden wird der sekundär abgestrahlte Luftschall vereinfacht als Körperschall bezeichnet. Wo nicht anders beschrieben sind mit Richtwerten sowohl die Anhaltswerte für Erschütterungsimmisionen gemäss DIN 4150-2 wie auch die Richtwerte für Körperschallimmissionen gemäss BEKS gemeint.

### **2 Ausgangslage**

Bekanntlich gibt es in der Schweiz die BEKS [1], welche die Vorgehensweise zur Beurteilung von Erschütterungs- und Körperschallimmissionen bei Schienenverkehrsanlagen beschreibt. Darin wird bezüglich der Erschütterungen auf die DIN 4150-2 [2] verwiesen, beim Körperschall sind Richtwerte angegeben. Es bestanden viele Unklarheiten zum Beispiel bei der Beurteilung von bestehenden Bahnanlagen oder dem Umgang mit den Maximalwerten bei den Erschütterungen.

Im August 2022 hat das Bundesamt für Verkehr (BAV) und das Bundesamt für Umwelt (BAFU) eine neue «Checkliste Umwelt für Eisenbahnanlagen» herausgegeben [3]. Darin sind einige Punkte nun klar beschrieben, welche die Bestimmung und Beurteilung der ESK-Immissionen erleichtern.

Kurz zusammengefasst müssen für die Beurteilung der ESK-Immissionen folgende Punkte bearbeitet werden, wobei die folgende Aufzählung nicht als allgemein gültig zu betrachten ist:

1. Ermittlung der ESK-Immissionen für den aktuellen/projektierten Zustand mittels Berechnung wie z.B. VIBRA-1 und Beurteilung mit Berücksichtigung des Unsicherheitsbereichs des Modells. Für grössere Projektperimeter lohnt es sich eine Grenzdistanz zu berechnen, ab welcher die Richtwerte eingehalten sind, und nur die Gebäude innerhalb zu untersuchen.

2. In Zweifelsfällen sind Messungen durchzuführen und die Prognose der ESK-Immissionen entsprechend den Messdaten anzupassen oder zu verfeinern.
3. Bei Richtwertüberschreitungen sind Schutzmassnahmen zu prüfen. Falls sich diese als geeignet und verhältnismässig erweisen, sind diese umzusetzen, andernfalls kann der Bahnbetreiber im Einzelfall eine Erleichterung beantragen.

### 3 Feststellungen

In den letzten 10 Jahren haben wir (ZC Ziegler Consultants AG) für etwa 100 Projekte in über 250 Gebäuden mit hohen zu erwartenden ESK-Immissionen durch Schienenverkehr entsprechende Messungen durchgeführt. In Bild 3.1 ist eine einfache Auswertung all dieser Messungen dargestellt. Es zeigt sich Folgendes:

- Es wurde bei ca. 5 % der Gebäude eine Überschreitung der Anhaltswerte für Erschütterungen gemessen, bei nur ca. 1 % eine Überschreitung der Richtwerte für Körperschall. Meist betrifft eine Überschreitung nur einzelne Räume einer Wohnung oder eines Gebäudes.
- Die grosse Mehrheit der Gebäude mit Erschütterungsmissionen über oder knapp unterhalb der Anhaltswerte weisen Holzdecken mit tiefen Eigenfrequenzen auf (meist zwischen 12 und 20 Hz). Beim Körperschall sind es grösstenteils Gebäude mit Betondecken mit hohen Eigenfrequenzen (meist grösser 50 Hz).

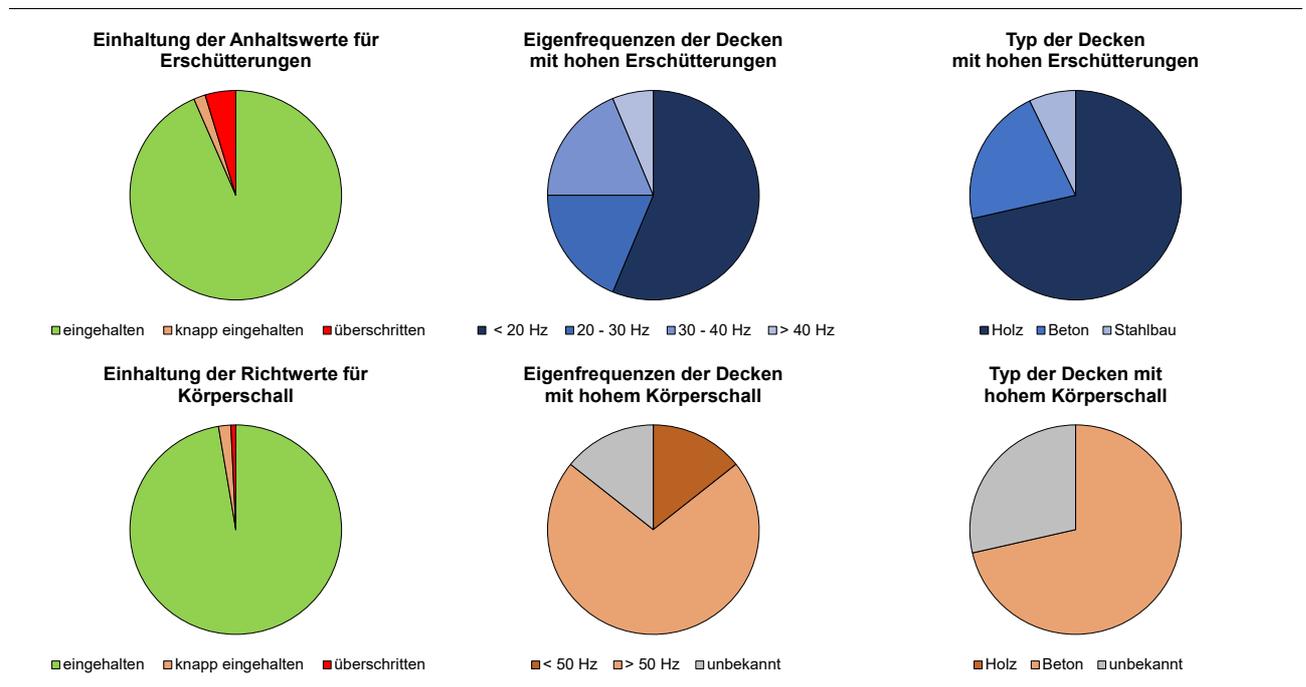


Bild 3.1 Auswertung von über 250 Messungen der ESK-Immissionen in Gebäuden neben Bahngleisen

Zudem sind uns folgende Punkte aufgefallen:

- Hohe Erschütterungsmissionen sind oftmals dann zu beobachten, wenn eine Deckeneigenfrequenz (bei gleichzeitig geringer Dämpfung) mit einer dominanten Anregungsfrequenz zusammenfällt (Resonanz-Phänomen).
- Einige Messungen wurden aufgrund störender ESK-Immissionen durchgeführt. Oftmals sind in diesen Fällen die Richtwerte aber eingehalten.

- Bei fast allen Bewohnern wurden die ESK-Immissionen als nicht störend eingestuft. Vielmehr waren sie überrascht, dass man dies überhaupt untersucht. Auch bei Gebäuden mit sehr geringem Abstand kommt meist die Antwort, man gewöhne sich daran und man wohne ja schliesslich neben der Bahn.
- Die Untersuchung von Massnahmen und deren Verhältnismässigkeit kann sehr aufwändig sein und es bestehen viele Unklarheiten bezüglich des Vorgehens.
- Es gibt teils grosse Unsicherheiten bei der Prognose der Wirkung von immissionsreduzierenden Massnahmen, eine positive Wirkung kann nicht immer garantiert werden.

Es sei hier angemerkt, dass auch Messungen durchgeführt wurden im Vorfeld von Bahnprojekten (z.B. vor Einbau einer Weiche), folglich nicht zu erwarten war, dass die Immissionen immer über den Richtwerten liegen.

#### 4 Empirische Prognoseverfahren

Die Entstehung und Ausbreitung von Erschütterungen im Erdreich infolge Schienenverkehrs, die Übertragung der Erschütterungen auf Gebäude und Geschossdecken und die Umwandlung in hörbaren, Körperschall ist sehr komplex und mit vielen Unsicherheiten behaftet. Auch stellt jedes Gebäude wegen seiner Struktur (beim Körperschall sogar wegen der Inneneinrichtung), des Aufbaus des Untergrunds bis hin zur Erschütterungsquelle eine ganz neue Situation dar.

Um trotz der Komplexität mit vernünftigem Aufwand eine Aussage bezüglich der vom Schienenverkehr verursachten erschütterungsbedingten Immissionen in einem Gebäude machen zu können, benötigt man ein Rechenmodell. Als geeignete Lösungsansätze haben sich empirische Modelle erwiesen. Es gibt einfache frequenz-unabhängige Faktoren-Modelle (wie z.B. in VIBRA-1 verwendet) und frequenz-abhängige Terzbandspektren-Modelle (wie z.B. in VIBRA-2 verwendet). VIBRA-1-2 wurde durch ZIEGLER CONSULTANTS in Zusammenarbeit mit den SBB (Schweizerische Bundesbahnen) auf der Basis des ACCESS-Datenbanksystems als Software-Paket VIBRA-1-2-3 implementiert (VIBRA-3 ist eine Datenbank zur Ablegung und Aufbereitung von Messdaten).

Faktoren- oder Terzbandspektren-Modelle beschreiben grundsätzlich ein System mit einer Eingangsgrösse, welche mit mehreren Übertragungsfunktionen multipliziert wird um zur Ausgangsgrösse zu gelangen (siehe Bild 4.1). Als Eingangsgrösse wird die Erschütterung neben dem Gleis definiert, die Übertragungsfunktionen beschreiben u.a. die Ausbreitung der Erschütterung im gewachsenen Boden bis zu einem Gebäude, die Übertragung auf das Gebäudefundament, die Ausbreitung im Gebäude bis zur Geschossdecke und die Umwandlung in Körperschall. Sowohl Eingangsgrössen wie auch Übertragungsfunktionen werden empirisch aus einer Vielzahl von vergleichbaren Messungen bestimmt und können in der Form von Faktoren oder Spektren angegeben werden. Die Ausgangsgrösse ist ein Wert für die Erschütterung auf einer Geschossdecke oder ein Wert für den Körperschall in einem Raum im Gebäude, mit welchem die Immissionen gemäss den gültigen Richtlinien weiterverarbeitet und beurteilt werden können.

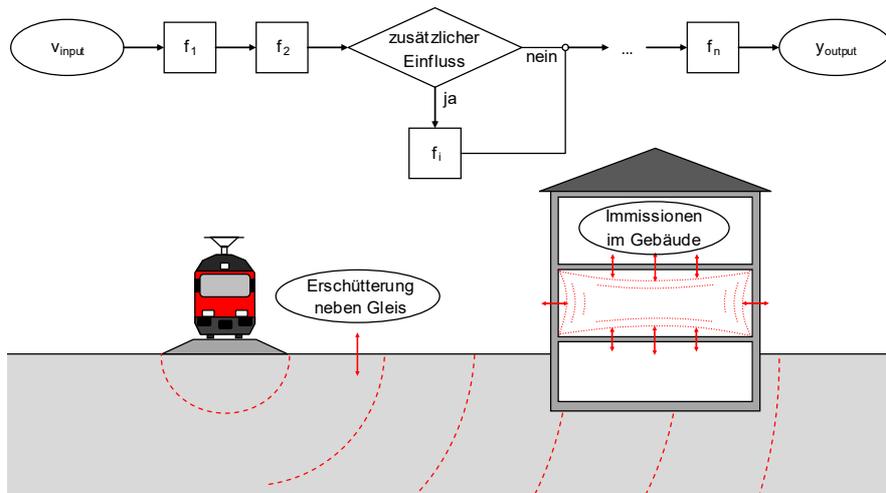


Bild 4.1 Konzept des Systems mit Eingangsgrösse, Übertragungsfunktionen und Ausgangsgrösse

Konkret zu den beiden Modellen VIBRA-1 und VIBRA-2 sind folgende wichtige Punkte hier hervorzuheben:

#### VIBRA-1

- Dieses Modell kann ohne Messung vor Ort angewendet werden, da es auf einer Vielzahl von Messungen basiert.
- Es lassen sich damit die Problembereiche erkennen, wo tiefere Untersuchungen erforderlich sind. Mit dem Sicherheitsfaktor 2 werden grob gesagt ca. 95 % aller Fälle abgedeckt (beim Körperschall ca. 85%).
- Frequenzabhängige Veränderungen können damit nicht abgebildet werden.

#### VIBRA-2

- Bei diesem Modell ist es zwingend erforderlich, den Frequenzgehalt der Anregung durch den Bahnverkehr vor Ort zu messen, da dieser stark standortabhängig ist (siehe Bild 4.2 mit verschiedenen Terzbandspektren, gemessen an unterschiedlichen Standorten) und ohne dieses Erkenntnis je nach Fragestellung falsche Schlussfolgerungen gezogen würden. Nach Möglichkeit sollen auch Übertragungsfunktionen bestimmt werden.

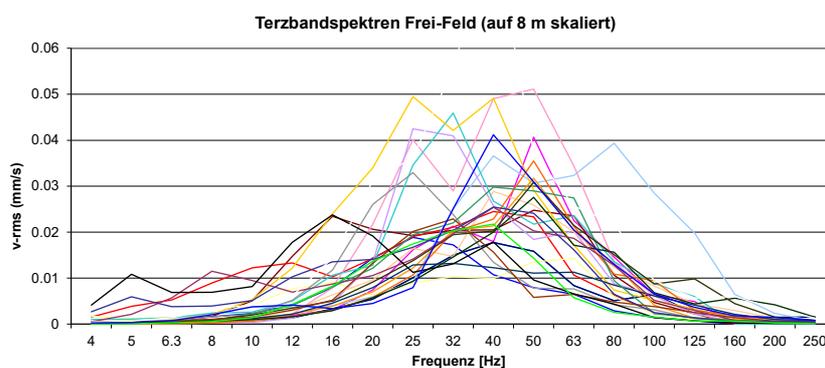


Bild 4.2 Terzbandspektren (jeweils gemittelt über eine Vielzahl von Zugdurchfahrten) an unterschiedlichen Standorten

Mit den obengenannten Modellen wird der Erwartungswert der Ausgangsgrösse bestimmt. Naturbedingt weichen die tatsächlich gemessenen Immissionen vom Erwartungswert ab, d.h. in 50 % der Fälle sind diese grösser oder eben kleiner als der Erwartungswert.

Mit Hilfe von Messungen vor Ort kann die Prognosegenauigkeit erhöht werden. Allerdings ist zu beachten, dass die Streuung von Gebäude zu Gebäude gross sein kann. Eine Kalibrierung einer VIBRA-1-Berechnung für eine Vielzahl von Gebäuden mit nur ganz wenigen Messungen ist daher meist nicht gerechtfertigt.

Eine Berechnung mit VIBRA-2 muss aufgrund der vor Ort gemessenen Emissionen nicht grundsätzlich eine kleinere Streuung aufweisen als eine Berechnung mit VIBRA-1, da mit der Berücksichtigung der Frequenzabhängigkeit neue Variablen und Unsicherheiten hinzukommen.

## 5 Physikalische Komplexität

Die Entstehung und Übertragung von Erschütterungen von fahrenden Zügen bis auf die Geschossdecken in angrenzenden Häusern ist frequenzabhängig. Zur Veranschaulichung ist das System mit Eingangs- und Ausgangsgrössen und Übertragungsfunktionen in Bild 5.1 qualitativ dargestellt. Auch wenn nur schematisch gezeichnet, so entsprechen die Verläufe der Spektren durchaus realen Situationen. Das Eingangsspektrum kann je nach Standort, Ober-/Unterbau (auch Alter der Gleise), Rollmaterial (auch Fahrgeschwindigkeit), Untergrund und Messpunkt stark variieren (siehe auch Bild 4.2). Im Bild 5.1 ist nur die Übertragung vom Fundament eines Gebäudes auf dessen Geschossdecken dargestellt. Diese Übertragungsfunktionen können bereits in einem einzelnen Gebäude, so wie im Bild dargestellt, stark variieren (z.B. Betondecken über UG, Holzdecken über EG/OG) und natürlich auch von Gebäude zu Gebäude aufgrund unterschiedlicher Masse, Aussteifung, Grösse (z.B. kleines Gebäude mit weichen Holzdecken neben grossem Gebäude mit steifen Betondecken). Folglich resultieren am Ausgang Spektren mit stark unterschiedlichen Frequenzinhalten.

Die Wirkung einer Massnahme (z.B. Unterschottermatte) ist im Allgemeinen ebenfalls frequenzabhängig. Die blaue dicke Linie in Bild 5.1 stellt ein elastisches System dar, welches im unteren Frequenzbereich bis zum 1.4-fachen der Abstimmfrequenz der Massnahme zu einer Verstärkung führt (Faktoren  $> 1$ ) und darüber zu einer Abminderung (Faktoren  $< 1$ ). Im dargestellten Beispiel würde diese Massnahme in der Situation «schwarz» zu einer Zunahme der Ausgangsgrösse im Vergleich zur Situation ohne Massnahme führen (Multiplikation der beiden Spektren), in der Situation «rot» zu einer Abnahme. Um für alle Situationen eine Abnahme zu erreichen, muss die Abstimmfrequenz klar unterhalb der tiefsten massgebenden Frequenzen im Ausgangsspektrum liegen (diese entsprechen meist den tiefsten Eigenfrequenzen der Decken). Dies ist der Grund, warum oftmals nur ein schweres Masse-Feder-System als Massnahme in Frage kommt, da wie oben in Abschnitt 3 festgestellt in den meisten Fällen diejenigen Gebäude mit tieffrequenten Decken die grössten Erschütterungsmissionen aufweisen.

Für eine optimale Massnahme wäre ein System wünschenswert, welches über den gesamten Frequenzbereich eine Reduktion bewirkt (blau gepunktete Linie), am besten mit einem Faktor  $< 0.5$  (d.h. mindestens eine Halbierung der Immissionen). Diese Massnahme wurde aber leider bis heute noch nicht gefunden.

Mit einer Massnahme, welche zumindest im tieffrequenten Bereich nicht zu einer Verstärkung führt, könnte man die Körperschallmissionen reduzieren ohne gleichzeitig die Erschütterungsmissionen zu erhöhen.

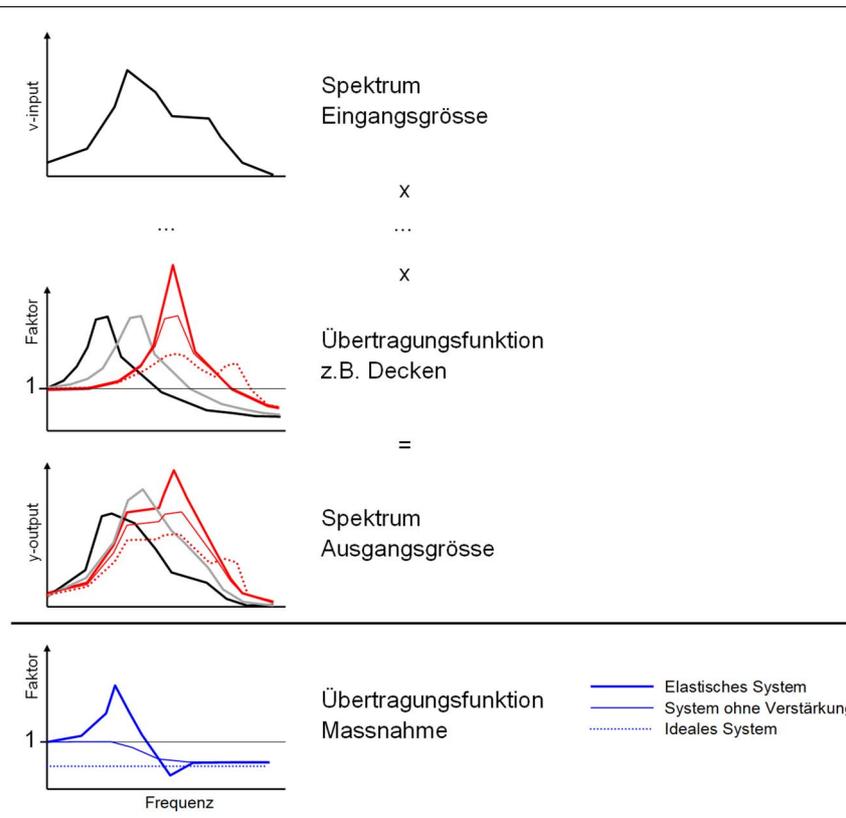


Bild 5.1 Qualitative Darstellung des Systems mit Frequenzabhängigkeit

Das stark vereinfachte Beispiel zeigt bereits, wie komplex und vielseitig die Thematik ist. Zusätzlich sind folgende Punkte zu erwähnen, welche für die Planung von Massnahmen entscheidend sein können:

- **Bodeneigenschaften (Bodenkennwerte, Bodenaufbau):** Diese sind meist nicht bekannt und müssen entweder angenommen oder vor Ort bestimmt werden (Messaufwand) um vertiefte Untersuchungen durchführen zu können (z.B. Modellierung mit Finite-Elemente-Methode). Zudem variieren diese je nach Standort, was v.a. bei langen Projektperimetern zu beachten ist und daher meist zusätzliche Messungen erfordern.
- **Dynamisches Verhalten der Gebäude:** Sofern nicht baugleich verhält sich jedes Gebäude anders, wobei hier sicher die Ankopplung des Gebäudes an den Untergrund und die Ausbreitung im Gebäude und auf die Geschosdecken und Wände (Stichwort Körperschallabstrahlung) zu erwähnen ist. Um dies einigermaßen richtig zu erfassen, sind meist zusätzliche Messungen erforderlich.
- **Unsicherheiten bei der Übertragungsfunktion der Massnahme (Einfügedämmung):** Neben allen anderen Unsicherheiten ist auch die Wirkung einer Massnahme nicht eindeutig bekannt und hängt auch von den lokalen Gegebenheiten ab.

Im Unterschied zu anderen wissenschaftlichen Gebieten finden bei dieser Thematik entsprechende Versuche immer draussen im Feld statt und nicht im Labor, wo im Idealfall alle Parameter bekannt und beeinflussbar sind. Kommt auch hinzu, dass bei Feldversuchen im Rahmen von Bauprojekten meist auch andere Parameter zwangshalber verändert werden (z.B. Unterschottermatte und neuer Oberbau/Gleise). Dies erschwert oder verunmöglicht die genaue Bestimmung der Wirksamkeit einer Massnahme in der entsprechenden Situation.

## 6 Projektbedingte Komplexität

Neben den rein physikalischen Schwierigkeiten, welche bereits eine einfache Situation mit einem Gebäude neben den Gleisen mit sich bringt, ergeben sich zusätzliche im Rahmen realer Projekte. Hier hat man meist mehrere ganz unterschiedliche Situationen unmittelbar nebeneinander (z.B. ganz unterschiedliche Gebäudetypen unmittelbar nebeneinander). Dies kann eine für alle Situationen positiv wirkende Massnahme verunmöglichen.

Zusätzlich kommen die verschiedenen Beteiligten ins Spiel, welche unterschiedliche Ansprüche und Erwartungen an die ESK-Untersuchung haben. Das Bild 6.1 versucht das Umfeld aufzuzeigen.

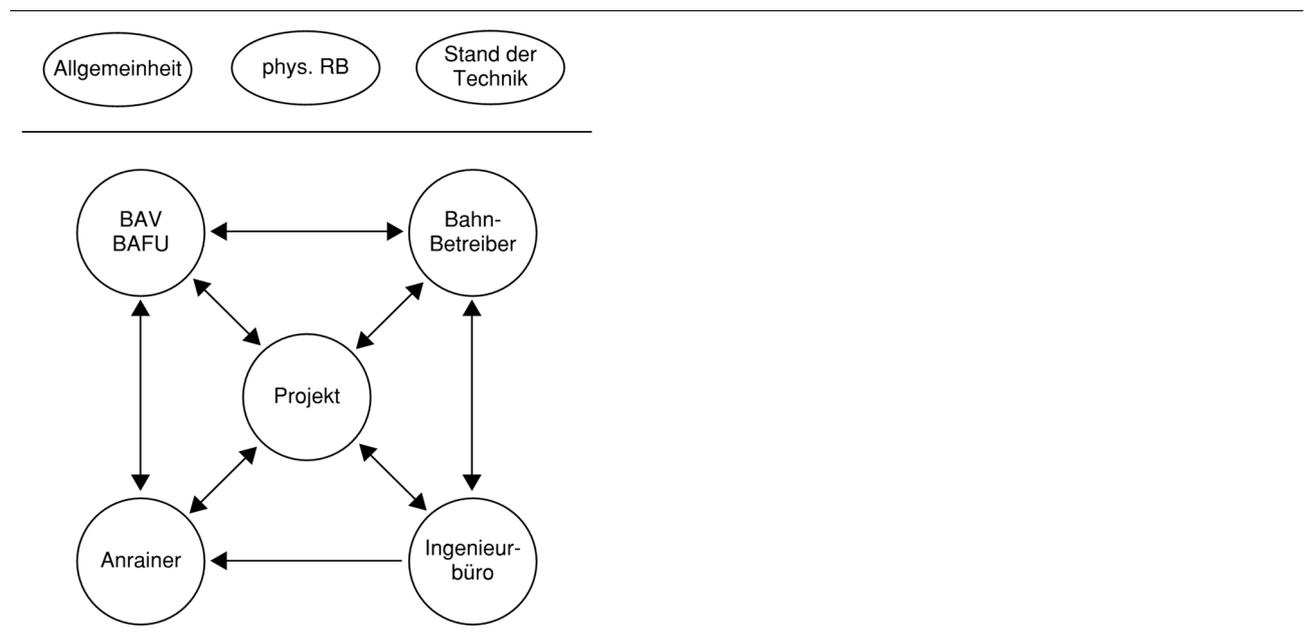


Bild 6.1 Umfeld aller Beteiligten bei einem Bahnprojekt

Übergeordnet sind folgende drei Punkte aufzuzählen:

- **Allgemeinheit:** Sie will Bahn fahren, sie will keine störenden Immissionen, sie will Kosteneffizienz, ...
- **Physikalische Randbedingungen:** Wie oben aufgeführt gibt die Physik den möglichen Spielraum vor, je nach Situation kann dieser variieren und ist oftmals nicht hinreichend bekannt (z.B. unbekannte Bodeneigenschaften).
- **Stand der Technik:** Es gibt zahlreiche Untersuchungen zur Wirksamkeit von immissionsreduzierenden Massnahmen. Die Resultate streuen teilweise stark, zudem gibt es kein einheitliches und einfaches Berechnungsverfahren zur Abschätzung der Wirkung von Massnahmen. Viele Studien sind für ein Ingenieurbüro nur schwer zugänglich.

Zu den verschiedenen Akteuren lässt sich Folgendes sagen:

- **Behörde (BAFU/BAV):** Sie muss das Umweltschutzgesetz umsetzen, sie muss sich an die gesetzlichen Vorgaben (soweit vorhanden) halten.
- **Anrainer:** Sie wollen/müssen geschützt werden, sie müssen bei Messungen Zugang zum Gebäude gewähren, sie wissen oftmals nicht, dass ESK-Immissionen störend sein können.

- Ingenieure/Planer:
  - Umweltingenieure: ESK-Immissionen sind nur einer von vielen Aspekten einer Umweltverträglichkeitsprüfung, je nach Projekt kann die ESK-Untersuchung einen Grossteil der Kosten ausmachen.
  - Fahrbahnplaner: Sie wollen möglichst konkrete Angaben zu Massnahmen, auch um die Kosten zu schätzen und einzuplanen, dies möglichst früh im Projektverlauf.
  - ESK-Fachleute: Wir müssen möglichst sicher sein, dass eine vorgeschlagene Massnahme auch eine positive Wirkung zeigt. Hierzu sind wie aufgezeigt meist viele Messungen durchzuführen.
- Bahnbetreiber: Sie müssen zuverlässige Grundlagen an die Projektbearbeiter liefern, sie wollen möglichst früh wissen, ob Massnahmen erforderlich sind, welche Massnahme und ob diese verhältnismässig ist. Sie wollen a priori keine unnötigen Massnahmen umsetzen, auch um nicht ein Präzedenzfall zu schaffen.

Es bestehen Zielkonflikte und die Ansprüche von allen Beteiligten sind vielschichtig und oftmals zeitlich nicht auf eine Linie zu bringen. Eine möglichst frühe Bearbeitung der ESK-Thematik ist sicher hilfreich, bedeutet aber auch, dass bei möglichen Projektänderungen Untersuchungen angepasst werden müssen, je nach dem sind erneute Messungen erforderlich.

## 7 Erforderlicher Aufwand

Stellt sich nach den ersten rechnerischen Abklärungen heraus, dass die ESK-Immissionen kritisch sein können, wird der Aufwand für die weiteren Untersuchungen schnell gross, v.a. wenn dann auch noch Massnahmen untersucht werden müssen. Es stellt sich die Frage, ob dieser Aufwand reduziert werden kann. Folgend einige Gedanken dazu:

- Ist tatsächlich eine komplette Untersuchung der ESK-Immissionen inkl. Untersuchung von Massnahmen (Wirkung und Verhältnismässigkeit) erforderlich, wenn die Immissionen im Rahmen eines Projekts (auch wenn die Gleise erneuert werden) nicht oder nur unmerklich zunehmen oder sogar abnehmen?
- Sind Messungen zwingend erforderlich? Ja, denn ansonsten fehlen wesentliche Informationen (quantitative Grösse der ESK-Immissionen, Frequenzinhalt, Eigenfrequenzen der Geschossdecken, ...), ohne diese keine Massnahmen geplant werden können. Zudem können damit Unsicherheiten minimiert und die Prognosemodelle verbessert werden.
- Können vereinfachte Messungen durchgeführt werden? Der grosse Aufwand bei einer Messung ist die Organisation (Kontakt mit Eigentümer/Anwohner) und die Installation der Messgeräte. Die Messung selbst kann automatisch erfolgen. Da die gemessenen Immissionen von Zug zu Zug stark streuen und oftmals nur die Züge in der Nacht stören, ist eine Messung über Nacht sinnvoll. Damit deckt man auch einen sinnvollen Querschnitt über das unterschiedliche Rollmaterial ab. Um die richtigen Massnahmen planen zu können, reicht es nicht, nur auf der Geschossdecke zu messen, da man damit den Frequenzinhalt der Anregung und die Übertragungsfunktionen nicht hinreichend genau beschreiben kann.
- Können Massnahmen und Kosten mit vereinfachter, rein rechnerischer Untersuchung (z.B. Stufe VIBRA-1) durchgeführt werden? Da für die Wirksamkeit einer Massnahme wie im Abschnitt 5 aufgezeigt der Frequenzinhalt der Anregung und die Form der Übertragungsspektren massgebend

sind und diese je nach Situation stark variieren, kann auf eine Messung vor Ort unseres Erachtens nicht verzichtet werden. Um auszuschliessen, dass negative Effekte auftreten (d.h. eine Verstärkung der Immissionen aufgrund der Massnahme), ist im Prinzip in jedem Gebäude eine Messung erforderlich, es sei denn, es handelt sich um baugleiche Gebäude.

- Können die Unsicherheiten verringert werden? Da auch in einer konkreten Situation nie alle Einflussparameter bestimmt werden können, werden immer Unsicherheiten bestehen. Je mehr Parameter bestimmt werden können, desto kleiner wird die Unsicherheit. Unsicherheiten können mit möglichst vielen Erfahrungswerten besser quantifiziert werden.
- Kann der Aufwand bei der Prüfung der Massnahmen auf ihre Verhältnismässigkeit reduziert werden? Mit allgemein akzeptierten Richtpreisen für typische Massnahmen und klaren Vorgaben, auf was die Kosten bezogen werden sollen (z.B. Anzahl zusätzliche Gebäude, bei denen durch die Massnahme die Richtwerte eingehalten werden), könnte die Verhältnismässigkeit zumindest grob beurteilt und evtl. die eine oder andere Massnahme a priori ausgeschlossen werden.
- Soll eine Massnahme weiter untersucht werden, wenn diese zwar für einige Gebäude eine positive Wirkung hat, ein Gebäude jedoch dadurch mit höheren Immissionen belastet wird?

Oftmals ist auch nach umfangreichen Abklärungen das Resultat relativ ernüchternd, meist gibt es aus oben aufgeführten Gründen keine Massnahme, welche für alle betroffenen Gebäude garantiert eine Verbesserung bringt oder verhältnismässig ist. Oder es stehen Massnahmen zur Diskussion, deren Wirkung nicht quantifiziert und garantiert werden können. Grundsätzlich sind wir der Meinung, dass dort Zeit und Geld investiert werden soll, wo auch der Ertrag stimmt. Eine Massnahme vertieft zu untersuchen, die a priori nichts bringen wird (physikalische Randbedingungen), gehört sicher nicht dazu.

## 8 Weitere Aspekte und offene Fragen

Im Folgenden werden einige weitere Gedanken aufgeführt:

- Wenn keine baulichen Eingriffe am Gleis geplant sind (z.B. nur Erhöhung Zugzahlen oder Fahrgeschwindigkeit), kann auf eine vertiefte Untersuchung (damit gemeint sind auch Messungen zur Sachverhaltsabklärung) verzichtet werden? Unseres Erachtens soll der entsprechende Streckenabschnitt «vorgemerkt» werden können und erst dann vertieft untersucht werden müssen, wenn bauliche Eingriffe geplant sind.
- Was ist das Ziel von Massnahmen? Es ist erwiesen, dass eine gewisse Veränderung der Immissionen, v.a. wenn dazwischen noch eine Umbauzeit vorhanden ist, von den Anwohnern nicht wahrgenommen werden kann. Eine Massnahme die eine Reduktion von 20 % bringt, ist unseres Erachtens nicht zielführend und rechtfertigt die hohen Investitionskosten nicht.
- Sind Massnahmen in einem betroffenen Gebäude selbst (z.B. bauliche Eingriffe) rechtlich überhaupt möglich?
- Wie ist mit der Situation umzugehen, wenn eine Massnahme nicht für jedes Haus eine Verbesserung bringt oder in einem Haus evtl. sogar eine Verschlechterung zu erwarten ist?
- Welche ESK-Immissionen und in welchen Gebäuden sind zumutbar? Es gibt durch Umnutzungen immer mehr Gebäude, welche ursprünglich für die Bahn gebaut wurden, heute aber bewohnt oder als Büro genutzt werden. Oftmals sind es genau diese Gebäude, welche hohe ESK-Immissionen aufweisen. Hier muss unseres Erachtens ein neuer Eigentümer oder Mieter klar mit erhöhten Immissionen rechnen. Entsprechend sollte es hier keinen Anspruch auf Schutzmassnahmen geben.

- Sollen Anwohner befragt werden, ob die Immissionen störend sind? Es ist wie beim Kühlschrank, den man erst hört, wenn man darauf hingewiesen wird, dann nimmt man ihn aber als störend wahr. Das bringt am Ende leider auch für die Anwohner nichts. Eventuell wäre nicht eine aktive Befragung, sondern ein Vorgehen sinnvoll, bei dem Anwohner von sich aus aktiv werden müssen, so dass nur diejenigen erfasst werden, welche sich auch tatsächlich gestört fühlen.
- Spielt es eine Rolle, wie lange ein Gebäude schon neben der Bahn steht? Es sind hier auch neue Gebäude erwähnt, welche ohne die etablierten Schutzmassnahmen (z.B. elastische Gebäudelagerung) gebaut wurden und dann bei Bahnprojekten der Bahnbetreiber in der Pflicht ist, die Richtwerte einzuhalten.
- Sind andere Immissionen bei der Beurteilung mit zu berücksichtigen? Erwähnt sei hier eine naheliegende Strasse, deren Lärmimmissionen unseres Erachtens viel störender sein können (da permanent), oder Fluglärm, Warnsignale von Bahnübergängen, Industrieimmissionen, etc.
- Können mehr Pilotversuche gemacht werden um Erfahrungswerte zu sammeln? Meist ist die Unsicherheit bezüglich der Wirksamkeit einer Massnahme zu gross und niemand will die Verantwortung oder die Kosten übernehmen, wenn eine hinreichende Wirkung nicht garantiert werden kann.
- Im Allgemeinen verursacht das Rollmaterial über die letzten 20 Jahre gesehen immer weniger Immissionen, u.a. wegen den neuen Bremssystemen bei den Güterwagen oder der Ausmusterung alter Loks. Anwohner, die schon lange neben der Bahn wohnen, sagen häufig, heute sei es viel besser als früher.
- Hier noch nicht angesprochen sind die bautechnischen Aspekte, welche bei der Abklärung der Umsetzbarkeit von Massnahmen auch eine Rolle spielen und grundsätzlich mitberücksichtigt werden müssen.

## 9 Vorschlag für weiteres Vorgehen

Anzustreben ist ein von allen Seiten akzeptiertes und einfach anzuwendendes Verfahren zur Berechnung der Wirkungsweise von Massnahmen (d.h. situationsspezifische Bestimmung oder Vorgabe der Übertragungsfunktionen) und ein klares Vorgehen bezüglich der Auslegung der Beurteilung der Immissionen und der Verhältnismässigkeit von Massnahmen.

Um dieses Ziel zu erreichen, soll ein offener Austausch zwischen Behörden, Bahnbetreiber und Projektbearbeiter stattfinden. Es sollen neben dem obengenannten Ziel unter anderem auch folgende Punkte gemeinsam bearbeitet werden:

- Es sollen Massnahmen systematisch untersucht werden. Dazu gehört das aktive Bereitstellen von bereits vorhandenen und neuen Untersuchungsergebnissen von allen Seiten, das Zusammentragen und Aufarbeiten dieser Resultate und das Koordinieren von zusätzlichen Untersuchungen zu Massnahmen (z.B. Pilotversuche, FE-Studien, ...). Die Resultate sollen allen zur Verfügung gestellt werden.
- Vertiefte ESK-Untersuchungen sollen auf relevante Projekte beschränkt werden, wobei es noch abzuklären ist, wie dies definiert werden soll. Folgend ein Vorschlag für relevante Projekte:
  - Projekte, durch die eine starke Zunahme der ESK-Immissionen zu erwarten ist bei gleichzeitigem baulichem Eingriff bei den Gleisen (neue Weiche, neue nähere Gleise, wesentlich mehr Züge/Güterzüge, wesentlich höhere Fahrgeschwindigkeiten).

- Projekte, durch die keine starke Zunahme zu erwarten ist, aber die Immissionen im Ist-Zustand bereits hoch sind. Dies dürfte da der Fall sein, wo bereits der rein rechnerisch ermittelte Erwartungswert (z.B. VIBRA-1-Berechnung ohne Sicherheitsfaktor) über den Richtwerten liegt.
- Zur Reduktion der ESK-Immissionen soll der Fokus auch auf die Verursachung der Emissionen gelegt werden. So soll z.B. bereits bei der Beschaffung von Rollmaterial auch auf die Erschütterungsemissionen Wert gelegt werden, das Rollmaterial und der Oberbau soll so gewartet werden, dass weniger Emissionen entstehen oder neue Weichen sollen fern von Gebäuden geplant werden.

## 10 Schlusswort

Im vorliegenden Text wird die Komplexität der Fragestellung bei bahninduzierten Erschütterungs- und Körperschallimmissionen etwas beleuchtet. Es werden viele Aspekte angesprochen und Fragen gestellt, welche einen Anstoß geben sollen, das heutige Verfahren kritisch zu hinterfragen und pragmatisch an neuen und praktikablen Ansätzen für die wirklichen Problemfälle zu arbeiten. Es wäre begrüßenswert, wenn hier alle Beteiligten mithelfen und einen offenen Austausch ermöglichen. Es bleibt am Ende noch eine Frage offen: Wer übernimmt hierfür die Führung?

## Literatur

[1] BUWAL (1999). Weisung für die Beurteilung von Erschütterungen und Körperschall bei Schienenverkehrsanlagen (BEKS). Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft. Bern.

[2] DIN 4150-2: 1999-06 (1999). Erschütterungen im Bauwesen, Teil 2: Einwirkung auf Menschen in Gebäuden. Beuth-Verlag. Berlin.

[3] BAV/BAFU (2022). Checkliste Umwelt für Eisenbahnanlagen. Bundesamt für Verkehr (BAV) und Bundesamt für Umwelt (BAFU). Bern.