

Interaktive Planung von U-Bahn Tunnels: Automatisierte Berechnung der Änderung des normierten Energieverbrauchs eines U-Bahn Zuges bei Änderung des zu Grunde liegenden Trassenverlaufs

Matthias Flurl¹, Javier Jubierre², Carlo Monjarez, Ricardo Morelos, Er kai Watson

¹Lehrstuhl für Computation in Engineering, Technische Universität München

²Lehrstuhl für Computergestützte Modellierung und Simulation, Technische Universität München
flurl@bv.tum.de, jubierre@bv.tum.de

Im Rahmen des DFG Projekts „3DTracks“ werden Methoden und Konzepte entwickelt, welche den kollaborativen Planungsprozess von U-Bahn Tunnels unterstützen und verbessern sollen. Nachdem zunächst unter anderem Strategien zur synchronen geometrischen Modellierung des Tunnels über eine Kollaborationsplattform untersucht wurden, steht nun die Erforschung von Methoden zur generischen Integration von Simulationen in den Planungsprozess im Mittelpunkt. Dabei sollen insbesondere sogenannte autonome Simulationen über die Kollaborationsplattform integriert werden. Bei selbigen handelt es sich um Simulationenwerkzeuge, die im Hintergrund laufen und automatisiert bei (relevanten) Modelländerungen gestartet werden. Als Beispiel für eine solche autonome Simulation soll hier die automatisierte Neuberechnung des normierten Energieverbrauchs bei Änderung des Trassenverlaufs untersucht werden. Eine derartige Änderung mag zwar im Einzelfall vernachlässigbar gering sein, kann aber im Laufe des langjährigen Betriebs einer U-Bahnstrecke signifikante Änderungen in den Unterhaltskosten ergeben.

1. Einleitung

Die Erforschung kollaborativer Prozesse und insbesondere die Entwicklung hierfür geeigneter Werkzeuge sind seit langem im Fokus wissenschaftlicher Untersuchungen (Munson 2005, Ellis 1998). Im Bereich der kollaborativen Planung von U-Bahn Tunnels wurden in den letzten Jahren im Rahmen des DFG Projekts „3DTracks“ Strategien und Methoden entwickelt, welche diesen Prozess unterstützen können. Insbesondere wurden Konzepte entwickelt, welche es verschiedenen Planern ermöglichen an einem zentral von einer Kollaborationsplattform verwalteten Planungsmodell zu arbeiten. Diese Kollaborationsplattform gewährt den Planern verschiedener Fachrichtungen, wie etwa Trassierungsexperten, Modellierungsspezialisten und GIS Experten, Zugriff auf das zentral verwaltete Modell und erlaubt ihnen eine synchrone Bearbeitung des selbigen (Borrmann 2012, Flurl 2012). Bei der Evaluierung der resultierenden Modelle sind Simulationen von signifikanter Bedeutung. In dieser Arbeit soll ein Konzept zur Integration einer autonomen Simulation zur Berechnung der Änderung des normierten Energieverbrauchs vorgestellt werden. Als autonome Simulation läuft diese im Hintergrund auf der Kollaborationsplattform und berechnet im Falle einer Trassierungsänderung automatisiert die Veränderung im Energieverbrauch. Diese Berechnung gibt den beteiligten Fachplanern dann instantan Rückmeldung bezüglich der hierdurch verursachten Änderung der Betriebskosten, welche zwar im Einzelfall gering, aber über die gesamte Betriebszeit gesehen doch beachtlich sein können.

Im Folgenden stellen wir zunächst das zu Grunde liegende physikalische Modell detailliert vor und beschreiben dann eine Softwarearchitektur, welche eine flexible Integration der auf diesem Modell basierenden autonomen Simulation in die Kollaborationsplattform und damit in den kollaborativen Planungsprozess ermöglicht.

2. Energieverbrauch eines U-Bahnzugs

Zunächst gilt es ein Modell zur Berechnung des normierten Energieverbrauchs, d.h. des Verbrauchs in Bezug auf eine bestimmte Masseneinheit, eines U-Bahnzuges zu entwickeln. Hierzu wurden zunächst verschiedene Komponenten identifiziert, welche in das Modell aufgenommen werden sollen: Kinetische Energie E_{kin} , potentielle Energie E_{pot} , Reibungsverluste infolge der Krümmung des Trassenverlaufs E_{Kr} sowie infolge der Reibung zwischen den Flanschen der Räder und den Gleisen E_{RG} , der Luftwiderstand E_{Lu} und Energierückgewinnung bei Bremsvorgängen $E_{Rü}$ (Lukascewicz 2001). Die benötigte (minimale) Gesamtenergie E_{min} ergibt sich dann als Summe dieser einzelnen Komponenten

$$E_{min} + E_{Rü} = \underbrace{\frac{1}{2}mv_{max}^2}_{E_{kin}} + \underbrace{mgh}_{E_{pot}} + \underbrace{\sum_{j=1}^n \left[\int_0^{s=l_{c_j}} F_{Kr} ds \right]}_{E_{Kr}} + \underbrace{\sum_{i=0}^m \left[\int_0^{s=l_i} F_{RG} + F_{Lu} ds \right]}_{E_{RG} + E_{Lu}}. \quad (1)$$

Dabei ist v_{max} die maximale angenommene Reisegeschwindigkeit, h die überwundene Höhe, F_{Kr} die Reibungskraft, die infolge der Krümmung der Trasse auftritt, F_{RG} die Kraft infolge von Reibung zwischen den Flanschen der Rädern und Gleisen und zuletzt F_{Lu} die Kraft infolge des Luftwiderstandes. Dabei gilt $F_{Kr} \sim \frac{1}{r}$, $F_{RG} \sim v$ und $F_{Lu} \sim v^2$ (Lukascewicz 2001).

Offensichtlich von grundlegender Bedeutung bei der Berechnung der einzelnen Komponenten ist die Trassierung des Tunnels, das sogenannte Alignmentmodell (Amann 2013, Rebolj 2006). In einem solchen Modell wird der konkrete Verlauf der Trasse durch die Überlagerung des horizontalen sowie des vertikalen Alignments beschrieben (Abbildung 2). Im horizontalen Alignment wird dabei die Projektion der Trasse auf die xy -Ebene abgebildet, während das vertikale Alignment die z -Koordinate in Abhängigkeit der Stationierung s angibt, welche die im horizontalen Alignment zurückgelegte Strecke angibt.

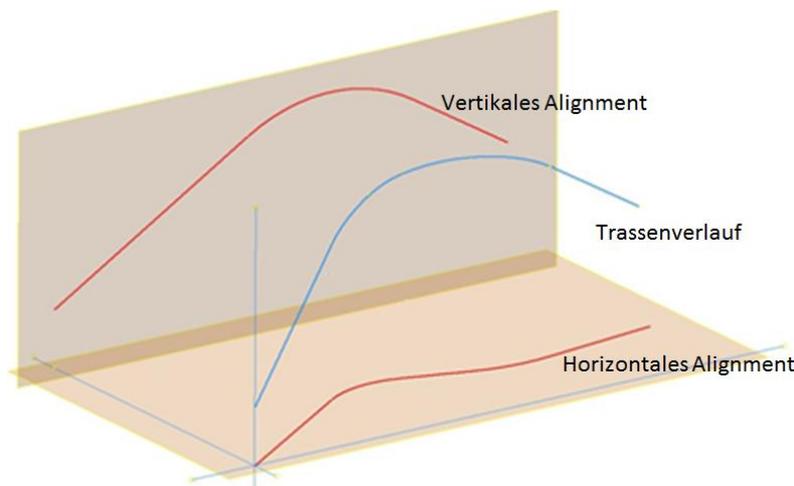


Abbildung 1: Die Überlagerung des horizontalen und des vertikalen Alignments ergeben den dreidimensionalen Trassenverlauf

Die zweite entscheidende Berechnungsgröße bildet das Geschwindigkeitsprofil (Abbildung 2), in welchem die Zuggeschwindigkeit v , mit der die Strecke durchfahren wird, gegeben ist. Dabei besteht ein funktionaler Zusammenhang zwischen der Stationierung s und der Ge-

geschwindigkeit v , d.h. man besitzt eine Darstellung $s \mapsto v(s)$. Dabei nehmen wir (vereinfachend) an, dass Beschleunigungen, welche zu einer Geschwindigkeitsänderung führen, stets konstant sind.

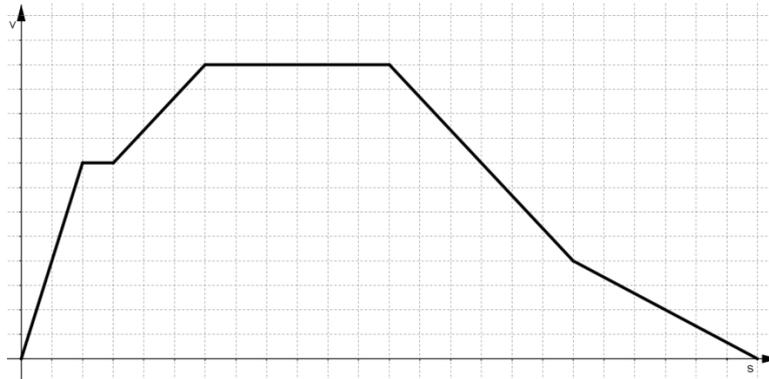


Abbildung 2: Geschwindigkeitsprofil eines Zuges - Geschwindigkeit v in Abhängigkeit der Stationierung s

2.1. Berechnung von potentieller und kinetischer Energie

Zunächst wird der Energieaufwand in Bezug auf Veränderung der Lage und der Geschwindigkeit berechnet. Hierbei gilt es folgendes zu beachten:

- Die Energie zur Beschleunigung von einer Geschwindigkeit v_1 auf eine Geschwindigkeit v_2 mit $v_2 > v_1$ ist (pro Masseneinheit) durch $\Delta E = \frac{1}{2}(v_2^2 - v_1^2)$ gegeben.
- Um den Zug von einer Höhe z_1 auf eine Höhe z_2 mit $(z_2 > z_1)$ zu bringen, ist die Energie (pro Masseneinheit) $\Delta E = g \cdot (z_2 - z_1)$ aufzuwenden.
- Bewegt sich der Zug abwärts, so ergeben sich zwei Fälle:
 - Beschleunigt der Zug gleichzeitig, so kann die potentielle Energie zur Beschleunigung genutzt werden,
 - fährt selbiger mit konstanter oder abnehmender Geschwindigkeit, so kann die potentielle Energie nicht genutzt werden, solange keine Mechanismen zur Energierückgewinnung beim Bremsen eingesetzt werden, wovon zunächst ausgegangen wird.

Um die angegebenen Fälle ausschöpfend zu berücksichtigen, muss das vertikale Alignment in Abhängigkeit der Stationierung s auf das Geschwindigkeitsprofil abgebildet werden (Abbildung 3).

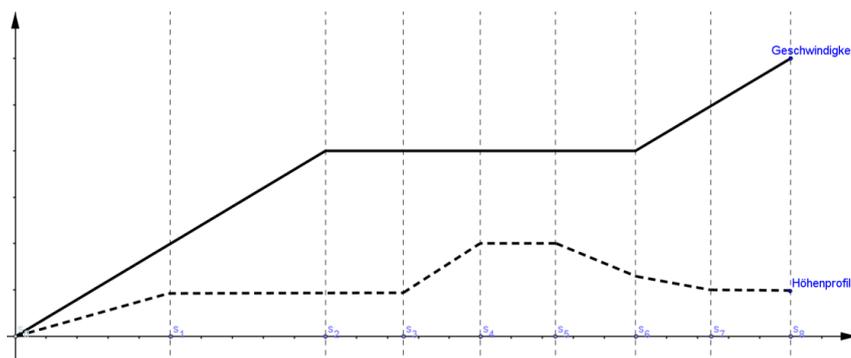


Abbildung 3: Überlagerung Geschwindigkeitsprofil und Höhenprofil (vertikales Alignment)

Exemplarisch betrachten wir die Bereiche $[s_0; s_1]$, $[s_1; s_2]$ und $[s_6; s_7]$ wobei wir $h_i = z(s_i)$ und $v_i = v(s_i)$ festlegen. Positives ΔE bedeutet in unserer Definition, dass wir dem Zug Energie zuführen müssen. Für die angegebenen Bereiche ergibt sich

- $[s_0; s_1]: \Delta E_{0;1} = 0,5 \cdot (v_1^2 - v_0^2) + g \cdot (h_1 - h_0)$,
- $[s_1; s_2]: \Delta E_{1;2} = 0,5 \cdot (v_2^2 - v_1^2) + g \cdot (h_2 - h_1) = 0,5 \cdot (v_2^2 - v_1^2)$, da $h_2 = h_1$ gilt,
- $[s_6; s_7]: \Delta E_{6;7} = \text{Max} \left(0; 0,5 \cdot (v_7^2 - v_6^2) + \frac{g \cdot (h_7 - h_6)}{<0, \text{ da } h_7 < h_6} \right)$.

Die gesamte in unserem Beispiel (zuzuführende) Energie ergibt sich dann aus der Summe der (positiven) Einzelenergien $\sum_{i=0}^7 E_{i;i+1}$.

2.2. Berechnung von Reibungseinflüssen

Bezüglich Reibung werden Verluste infolge der Krümmung E_{Kr} der Trasse sowie infolge der Reibung zwischen Rädern und Gleisen E_{RG} und durch den Luftwiderstand E_{Lu} berücksichtigt. Reibung infolge der Krümmung des Trassenverlaufs kann als indirekt proportional zum Krümmungsradius angenommen werden (Lukasewicz 2001), d.h. es gibt eine Konstante c_R mit $F_{Kr} = \frac{c_R}{r}$, wenn r den Krümmungsradius angibt. Diese Konstante c_r kann wie alle im Folgenden auftretenden Konstanten den einschlägigen ingenieurtechnischen Nachschlagewerken entnommen werden. Der Krümmungsradius kann dem horizontalen Alignmentprofil entnommen werden. Prinzipiell ist dieser konstant auf kreisförmigen Abschnitten und auf den Klothoiden, welche am häufigsten für einen Übergang Gerade-Kreis eingesetzt werden, linear von einem Startwert r_s zu einem Endwert r_E ansteigend, während auf geradlinigen Abschnitten kein solcher Einfluss berücksichtigt werden muss. Somit erhält man auf einer Klothoide für den Krümmungsradius den Zusammenhang

$$r \rightarrow r_s + s \cdot \frac{r_E - r_s}{l}, \quad (2)$$

wobei s aus dem zugehörigen Stationierungsbereich zu wählen ist, während l die Länge des entsprechenden Klothoidenabschnitts angibt. Gibt es insgesamt n bzw. m relevante Abschnitte bestehend aus Klothoiden bzw. Kreisen, so kann E_{Kr} folgendermaßen berechnet werden

$$\sum_{j=1}^{n+m} \left[\int_0^{s=l_j} F_{Kr} ds \right] = \sum_{j=1}^n \left[\int_0^{x=l_j} \frac{c_R}{r_{s_j} + s \cdot \frac{r_E - r_{s_j}}{l_j}} ds \right] + \sum_{j=1}^m \left[\int_0^{x=l_j} c_R ds \right]. \quad (3)$$

Für die Reibung zwischen den Flanschen der Räder und den Gleisen kann ein zur Geschwindigkeit proportionaler Zusammenhang angenommen werden, d.h. es gilt $F_{RG} = c_{RG} \cdot v$, während der Luftwiderstand proportional zum Geschwindigkeitsquadrat angesetzt wird, d.h. es gilt $F_{Lu} = c_{Lu} \cdot v^2$ (Lukasewicz 2001). Gibt es n bzw. m Abschnitte konstanter bzw. sich linear ändernder Geschwindigkeit, so erhält man für die sich hier ergebenden Reibungsverluste

$$\sum_{i=1}^{n+m} \left[\int_0^{s=l_i} F_{RG} + F_{Lu} ds \right] = \sum_{i=1}^n \left[\int_0^{s=l_i} c_{RG} \cdot v(s) ds \right] + \sum_{i=1}^m \left[\int_0^{s=l_i} c_{Lu} \cdot v^2(s) ds \right]. \quad (4)$$

2.3. Bremsenergierückgewinnung

Eine sehr effiziente Methode um Energie zurückzugewinnen, basiert auf sogenannten regenerativen Bremsen. Bei dieser Methode werden die elektrischen Motoren des Zuges als Generator eingesetzt (Hasegawa 1999). Bis zu maximal 40% Bremsenergie können zurück in die Stromleitungen eingespeist werden (Painter 2006, Metro Bilbao 2014). Weil durch diese Art von Bremsen der Zug nicht vollständig abgebremst werden kann, verwenden die Züge zusätzlich mechanische Bremsen, weshalb in unserem Model nur Bremsenergien $E_{Rü}$ für Geschwindigkeiten über $20 \frac{km}{h}$ berücksichtigt werden.

3. Softwaretechnische Umsetzung des Modells

Um das physikalische Modell innerhalb des Planungsprozesses nutzen zu können, wurde zunächst eine flexible Softwarearchitektur (Abbildung 4) entworfen, welche in einer Bibliothek zur Integration in die Kollaborationsplattform prototypisch umgesetzt wird.

In dieser Architektur werden zunächst Klassen definiert, welche die vorgegebenen Geschwindigkeits-, Horizontal- und Höhenprofile beschreiben. Zusätzlich wurde eine Klasse zur Darstellung des Energieprofils, d.h. der Beschreibung des Energieverbrauchs in Abhängigkeit der Stationierung, entworfen.

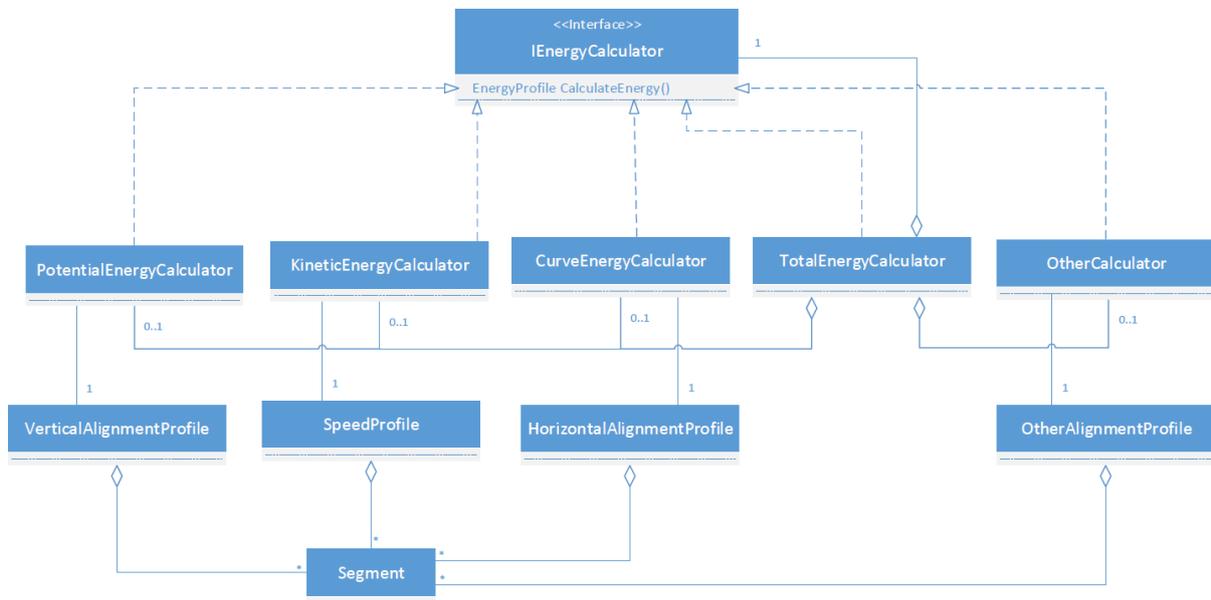


Abbildung 4: UML der beschriebenen Softwarearchitektur

Zur Berechnung des Energieverbrauchs wurden für die oben beschriebenen Fälle spezialisierte Klassen, wie etwa der *CurveEnergyCalculator* (Formel 4), entworfen, welche allesamt das Interface *IEnergyCalculator* implementieren (Abbildung 4). Bei der Initialisierung bekommen diese die zur Berechnung benötigten Profile, wie das Geschwindigkeitsprofil oder Höhenpro-

fil, übergeben. Dabei wird das Horizontal- und Höhenprofil (*HorizontalAlignmentProfile*, *VerticalAlignmentProfile*) automatisiert von der Kollaborationsplattform generiert, während (momentan) das Geschwindigkeitsprofil (*SpeedProfile*) vom Benutzer interaktiv definiert wird. Als Ergebnis der konkreten Berechnungen geben die verantwortlichen Klassen ein Energieprofil zurück. Um dann aus den Ergebnissen der einzelnen Klassen zum Gesamtenergieverbrauch zu gelangen, werden die einzelnen -Klassen in einer *TotalEnergyCalculator* Klasse aggregiert, welche die konkreten Einzelberechnungen anstößt und das Gesamtenergieprofil erzeugt und zurückliefert. Insbesondere ist das Hinzufügen von weiteren *Calculator*-Klassen, welche noch nicht berücksichtigte Effekte behandeln, durch die Verwendung der Aggregation der Einzelklassen in der *TotalEnergyCalculator* Klasse einfach handzuhaben.

4. Integration der autonomen Simulation in die Kollaborationsplattform

Um das oben vorgestellte Model bzw. die hieraus resultierende Softwarekomponente wirkungsvoll im Planungsablauf einsetzen zu können, wird selbige direkt in die Kollaborationsplattform integriert. Die Kollaborationsplattform verwaltet das zu einem Tunnelmodell gehörende Alignmentmodell und das darauf basierende prozedurale Geometriemodell (Flurl 2014). Zur Bearbeitung des prozeduralen Modells können die Bearbeiter das CAD Werkzeug ihrer Wahl verwenden, prototypisch wurden hierfür drei Werkzeuge integriert. Für die Modifikation des Alignments wurde ein eigenes Tool, der sogenannte *Alignmenteditor* entwickelt, welcher einen Zugriff auf das zugrundeliegende Alignmentmodell bietet und den verschiedenen Planern ermöglicht, sowohl das Alignmentmodell als auch (implizit) das Geometriemodell synchron zu bearbeiten (Abbildung 5).

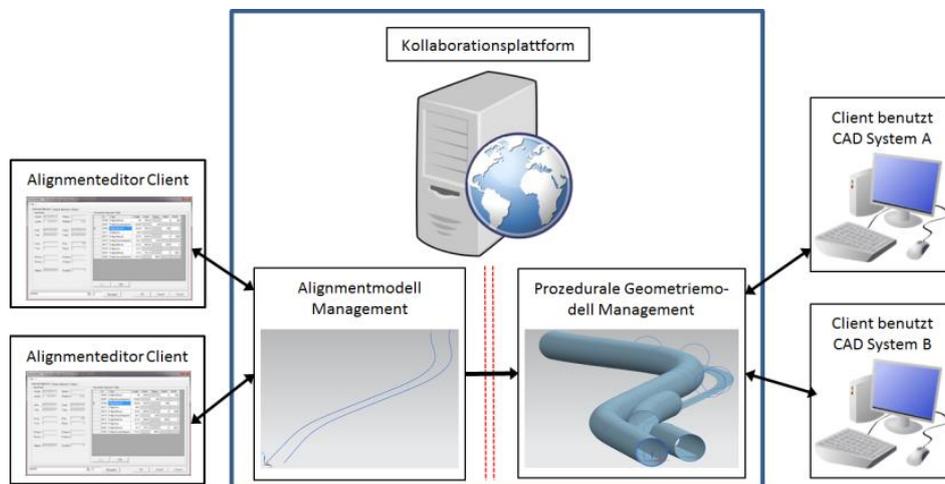


Abbildung 5: Synchrone Arbeit zwischen Trassierungsclient und Modellierungsclient

Nachdem das Alignmentmodell in die Plattform geladen wurde und das zugehörige Geschwindigkeitsprofil durch den Anwender festgelegt wurde, wird zunächst der ursprüngliche Energieverbrauch berechnet. Bei jeder über den *Alignmenteditor* vorgenommenen Änderung wird automatisch der Server benachrichtigt. Die vom Benutzer lokal vorgenommenen Änderungen werden in das zentrale Modell integriert und an alle anderen teilnehmenden Planer instantan weitergeleitet.

Sobald diese Änderungen in das zentrale Modell integriert wurden, löst selbiges einen Event aus, für welchen sich die Energieberechnungskomponente bei Systemstart registriert hatte.

Basierend auf den neuen Trassierungsdaten wird der Energieverbrauch erneut berechnet und an die Benutzer, welcher sich für diese Berechnung registriert haben, rückgemeldet. Das Rückgabeergebnis umfasst dabei die verschiedenen Energieprofile, die vom Benutzer bei der Anmeldung als (für ihn) berechnungsrelevant festgelegt wurden, etwa der Aufwand an kinetischer Energie oder potentieller Energie in Abhängigkeit der Stationierung, sowie die aggregierten Werte. Um dieses Rückgabeergebnis interpretieren zu können, wurde in den Aligneditor eine graphische Schnittstelle integriert. In dieser können die Energieprofile graphisch und tabellarisch visualisiert werden. Dabei kann sowohl der Energieverbrauch der einzelnen modellierten Komponenten als auch der Gesamtenergieverbrauch in Abhängigkeit der Stationierung graphisch dargestellt werden. Zusätzlich ist es möglich von der Kollaborationsplattform ältere Energieprofile anzufordern. Die Überlagerung verschiedener solcher Profile erlaubt dann insbesondere einen qualitativen und quantitativen Vergleich selbiger.

5. Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit haben wir gezeigt, wie eine autonome Simulationen zur Berechnung der Änderung des Energieverbrauchs infolge der Modifikation einer Trasse flexibel in den Planungsprozess von Infrastrukturbauwerken integriert werden kann. Zunächst haben wir den Energieverbrauch des Zuges im vorgestellten Modell in verschiedene Komponenten aufgeteilt, welche die separate Berechnung auf Basis von sogenannten *Calculators*-Modulen ermöglichen. Dieser flexible Ansatz erhöht das Erweiterungspotenzial des Energiemodells, welches in dieser Arbeit basierend auf vier verschiedenen Energiekomponenten vorgestellt wurde.

Schließlich haben wir die resultierende Bibliothek zur Energieberechnung in eine vorhandene Kollaborationsplattform integriert und hierüber mit einem Tool zur Trassenplanung gekoppelt. Auf diese Art und Weise wird infolge jeder Änderung der Trassierung automatisch eine Neuberechnung des Energiebedarfs gestartet, womit die Planer konsequent in ihrer Entscheidungsfindung unterstützt werden.

Momentan wird das zu Grunde gelegte Geschwindigkeitsprofil vom Benutzer manuell angelegt – was auch der heutigen Planungspraxis entspricht. In Zukunft wollen wir Wege erforschen, dieses automatisiert aus den Modelldaten unter Berücksichtigung vorgegebener (ingenieurstechnischer) Randbedingungen zu erzeugen, insbesondere sollen hier automatisiert Vorschläge für die Überhöhungen der einzelnen Gleisabschnitte berechnet werden.

Quellen

Amann, Borrmann, Hegemann, Jubierre, Flurl, Koch, König, (2013). A Refined Product Model for Shield Tunnels Based on a Generalized Approach for Alignment Representation. In: ICCBEI, Tokyo, Japan.

Borrmann, Ji, Jubierre, (2012). Multi-scale Geometry in Civil Engineering Models: Consistency Preservation through Procedural Representations, In: Proc. of the ICCBE 2012, Moscow, Russia.

Ellis, Gibbs, (1989). Concurrency control in groupware systems, In: Proc of the ACM SIGMOD international conference on Management of Data, 399–407.

Flurl, Mundani, Rank, (2014). Graph-based Concurrency Control for Multi-Scale Procedural Models, In: Proc of the ECCPM 2014, Wien, Austria.

Flurl, Mundani, Borrmann, Rank, (2012). A collaborative multi-scale planning platform: Concept and implementation approach, In: Proc of the ICCBE 2012, Moscow, Russia.

Hasegawa, Uchida, (1999). Railway Technology Today, Braking Systems. In: Japan Railway & Transport Review 20, EJRCF, pp. 52-59

Lukasewicz, (2001). Energy Consumption and Running Time for Trains – Modelling of running resistance and driver behaviour based on full-scale testing. TRITAFKT 2001:25. Doctoral thesis, KTH Railway Technology, Stockholm.

Metro Bilbao presenta un proyecto de recuperación de energía, (2014). Via libre, la revista del ferrocarril. Available at: <http://www.vialibre-ffe.com/noticias.asp?not=5458> (Accessed: 30th June 2014)

Munson, Dewan, (2005). A concurrency control framework for collaborative systems. In: Proc. of the ACM conference on Computer supported cooperative work, 278-287.

Painter, (2006). Recovering railroad diesel-electric locomotive dynamic brake energy. Master thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois

Rebolj, Tibaut, Čuš-Babič, Magdič, Podbreznik, (2008). Development and application of a road product model; In Automation in Construction, Volume 17, pp. 719-728