

Rechnergestützte Animation, Konstruktion und Dimensionierung eines Roboter-Dinosauriers

Jakel, R.

Das Institut für Maschinenwesen entwickelt in einem ungewöhnlichen CRAFT-Forschungsprojekt die Mechanik eines lebensgroßen Roboter-Dinosauriers. Man erhofft sich von einer solchen Maschine eine erhebliche Steigerung der Besucherzahlen in den naturkundlichen Museen und Freizeitparks der Europäischen Union. Im Gegensatz zu auf dem Markt vorhandenen sehr primitiven Systemen soll sich dieser neuartige Roboter durch besonders hohe Mobilität, realitätsnahe Bewegungen und sensorgesteuertes, interaktives Verhalten auszeichnen. Die Entwicklungsarbeit geschieht eingebunden in das europäische PALAIOMATION-Konsortium (Palaeontology Science and Robotics for Extinct Species Replica Animation).

The IMW develops in a CRAFT-research-project the mechanical system of an original sized robot-dinosaur. This replica will be used to increase the number of visitors in the natural museums and holiday parks of the EU. Different from existing primitive systems, the new robot will have enhanced mobility, nearly realistic motions and sensor-based, interactive behaviour with the environment. The development is done in the European PALAIOMATION-consortium (Palaeontology Science and Robotics for Extinct Species Replica Animation).

1 Wahl der Dinosaurierspecies

Eines der Hauptprobleme bei der Entwicklung von Laufmaschinen ist das Erreichen statischer und vor allem der dynamischen Stabilität. Dies bedeutet insbesondere beim Animieren zweibeiniger Roboter erhebliche Schwierigkeiten, einen realistischen, der Natur ähnlichen Bewegungsablauf zu erzielen. In Zusammenarbeit mit namhaften Paläontologen wurde daher nach einem geeigneten Dinosaurier gesucht, der sich zumindest nicht ausschließlich zwei-, sondern auch vierbeinig fortbewegt hat und über den genügend Skelettinformationen vorliegen, die eine besonders realistische Nachbildung ermöglichen. Auch

sollten die Abmessungen des Tiers nicht zu groß sein, um eine technische Realisierung in einem relativ bescheidenen finanziellen Rahmen zu ermöglichen.

Die Wahl fiel daher auf den Iguanodon (**Bild 1**), einen pflanzenfressenden Dinosaurier, der vor etwa 120 Millionen Jahren in Europa gelebt hat. Charakteristisch an diesem Tier sind die spitzen, verhornten Daumen, denen dieser Saurier seinen Namen verdankt. Vom Iguanodon wird angenommen, daß er sich sowohl zwei- wie auch vierbeinig (**Bild 2**) fortbewegt hat. Um die mit der Steuerung verbundenen Schwierigkeiten eines solch komplexen und technisch hochanspruchsvollen Roboters nicht zu groß zu machen, soll nur ein vierbeiniger Gang sowie das Aufrichten auf die Hinterbeine nachgebildet werden.

Der in Bild 1 dargestellte „Iguanodon atherfieldensis“ dient als Vorlage für den Prototyp. Seine Gesamtlänge beträgt ca. 6 m, die Hüfthöhe 1,4 m. Die Lebendmasse wird auf etwa 1,6 t geschätzt. Dieser Saurier war jedoch noch nicht der größte dieser Species, der gefunden wurde: „Iguanodon bernissartensis“ war 9 m lang und vermutlich etwa 5,4 t schwer.



Bild 1: Das Skelett des Iguanodon atherfieldensis im Brüsseler Museum des Sciences Naturelles, das als Vorlage für den Roboterprototypen dient

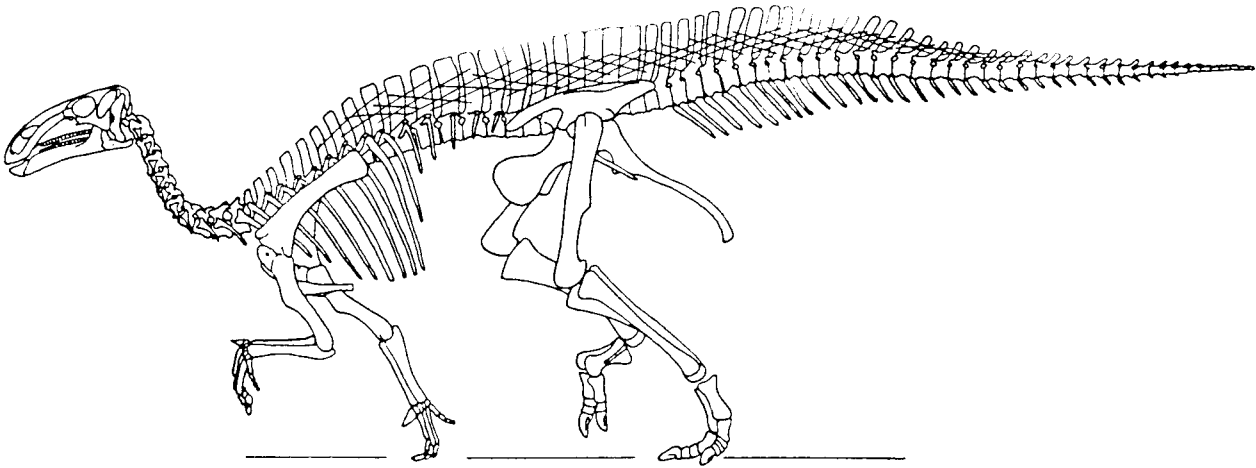


Bild 2: Rekonstruktion eines Iguanodonskelettes im vierbeinigen Gang nach Norman (1986)

2 Computeranimation als Feasibility-Studie

Nach Festlegung der Saurierspecies mußte man klären, welche elementaren Bewegungen bei einem vierbeinigen Gang ausgeführt werden und vor allem, welche Motormomente und Motorleistungen dazu notwendig sind. Mit diesen Informationen kann man dann die erforderliche Antriebstechnik festlegen. Zu diesem Zweck wurde das Gehen im Computer mit Hilfe eines Kinematikprogrammes unter Annahme einfachster Randbedingungen simuliert. Damit sind Drehwinkel und Geschwindigkeiten der einzelnen Antriebe ermittelbar.

2.1 Mechanisches Ersatzsystem

Für die Berechnung werden eine Reihe an Annahmen getroffen, die den in der Natur viel komplizierteren Bewegungsablauf dem Computer zugänglich machen:

- Alle wesentlichen Körperteile werden als massebehaftete geometrische Grundkörper nachgebildet (Zylinder und Platten, siehe **Bild 3**);
- Wirbelsäule, Hals, Kopf und Schwanz sind fixiert;
- Arme und Beine haben nur einen rotatorischen Freiheitsgrad pro Gelenk senkrecht zur Bewegungsebene (Bolzgelenke);
- in Armen und Beinen sind Stoßdämpfer untergebracht;
- der Saurier kann sich in Gehrichtung in einem Plannargelenk (zwei translatorische, ein rotatorischer Freiheitsgrad) bewegen; er läuft sozusagen als Schutz gegen Umfallen „zwischen zwei Glasplatten“.

Die geschätzte Massenbelegung der elementaren Teile des Roboters kann **Tabelle 1** entnommen werden. Die Robotergesamtmasse wird zunächst auf 400 kg festgelegt.

2.2 Beschreibung des Gehens

Für die Simulation des vierbeinigen Gehens werden nur 10 Antriebe modelliert. Alle Antriebe arbeiten mit Cosinusfunktionen nach der Beziehung

$$\text{Position} = \text{Amplitude} \cdot \cos(2\pi x / \text{Periode} + \text{Phase}) + \text{Offset}$$

Die einzelnen Werte können **Tabelle 2**, die Lage der Motoren **Bild 4** entnommen werden. Diese Bewegungsfunktionen simulieren ein sehr langsames Traben, d.h., linkes Vorderbein und rechtes Hinterbein werden jeweils gleichzeitig angehoben und vorwärts-

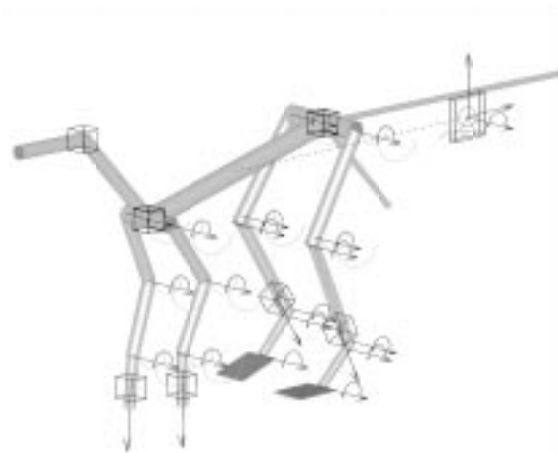


Bild 3: Das mechanische Ersatzmodell für die Computersimulation

Körperteil	Länge [mm]	Masse [kg]	Anzahl
Kopf	500	20	1
Hals	750	30	1
Wirbelsäule	1380	111	1
Schwanz	2850	20	1
Schultern	350	20	1
Becken	500	40	1
Ischium	760	5	1
Oberschenkel	650 (675)	25	2
Schienbein	700	4	2
Wadenbein	700	4	2
Mittelfuß	290 (315)	5	2
Zehen	260 (Platte)	4	2
Oberarm	450	15	2
Unterarm	420	13	2
Hand	175	4	2
Finger	125	3	2
Gesamtrobotermasse:	400		

Tabelle 1: Angenommene Massenbelegungen für die Computersimulation

bewegt (siehe auch Bild 2). Ein statisch stabiler Gang, bei dem mindestens drei Beine gleichzeitig auf dem Boden sein müssen, kann nicht mit solch elementaren Bewegungsfunktionen beschrieben werden. Das Umfallen, was beim modellierten „quasidynamischen Gang“ unweigerlich die Folge wäre, wird wirksam durch die Randbedingung(e) verhindert. Damit erlaubt dieses Modell allerdings nicht die Berechnung der Motorenleistungen, die für das Abstrecken bzw. Heranziehen der Beine vom Körper weg bzw. zum Körper hin erforderlich sind.

Da man bei vielen Säugetieren beobachtet, daß Oberschenkel und Mittelfuß immer nahezu parallel gehalten werden, kann ein zusätzlicher Antriebsmotor für den Mittelfuß durch Anbringen eines Parallelgestänges eingespart werden (Bild 4).

Antrieb	Amplitude		Phase [rad]	Offset [rad]	Periode [s]
	[rad]	[°]			
Hüfte rechts (1)	$\pi/16$	11.25	$0.9+\pi$	-0.5	1.6
Hüfte links (2)	$\pi/16$	11.25	0.9	-0.5	1.6
Knie rechts (3)	0.15	8.594	2.8	-0.5	1.6
Knie links (4)	0.15	8.594	$2.8-\pi$	-0.5	1.6
Schulter rechts (5)	$\pi/16$	11.25	0	0.6	1.6
Schulter links (6)	$\pi/16$	11.25	π	0.6	1.6
Ellbogen rechts (7)	0.25	14.32	1.5	-0.9	1.6
Ellbogen links (8)	0.25	14.32	$1.5+\pi$	-0.9	1.6
Hand rechts (9)	$\pi/16$	11.25	0	0.35	1.6
Hand links (10)	$\pi/16$	11.25	π	0.35	1.6

Tabelle 2: Werte der Cosinusfunktionen für die Beinanimation (siehe auch Bild 4)

Die Zehen der Hinterbeine werden nicht aktiv animiert, da dies mittels einfacher Cosinusfunktionen nicht mehr möglich ist. Sie sind lediglich über ein Feder/Dämpfersystem am Fußballen befestigt.

Diese Nachbildung des Gehens ist natürlich eine erhebliche Vereinfachung. In der Natur entsprechen die Bewegungen bei weitem keiner reinen Cosinusfunktion. Für eine ingenieurmäßige Abschätzung der zu erwartenden Drehmomente und Leistungen in den Hauptantrieben ist diese Näherung jedoch recht brauchbar.

Ein weiteres Problem bei der Simulation war die Modellierung des Hand- bzw. Fuß-Boden-Kontaktes. Da das verwendete Computerprogramm keine Kontaktberechnung zuließ, wurde der Boden als temporär wirkende harte Feder modelliert, die aktiv ist, wenn die Fußspitzen eine bestimmte Vertikalkoordinate überschritten haben. Die Feder muß stark bedämpft werden, um ein Zurückfedern des Sauriers („Trampolinspringen“) zu verhindern. Der in der Realität wirkende reibschlüssige Bodenkontakt, der die Vorwärtsbewegung ermöglicht, wurde durch an bestimmte Bedingungen geknüpfte geschwindigkeitsabhängige Dämpfer in Horizontalrichtung modelliert.

Zusammenfassend kann man sich das Simulationsmodell vorstellen als ein z.B. von einer aufgezogenen Feder angetriebenes Spielzeugtier, das seine Beine ausschließlich als Funktion der Zeit bewegt und dadurch eine Vorwärtsbewegung auf einem „gedämpften Trampolin“ ermöglicht. Es ist also nur eine Steuerung und keine Regelung des Systems modelliert.

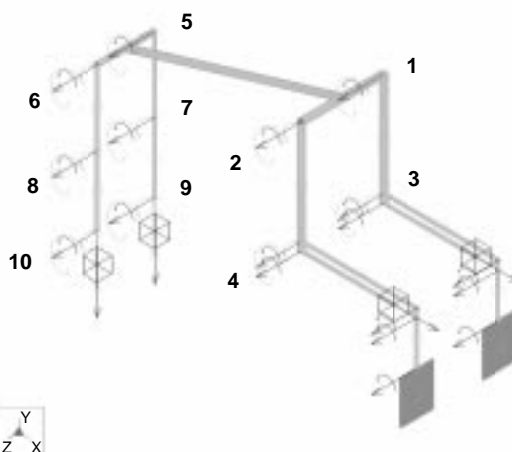


Bild 4: Nullposition der Beine und Lage der Antriebe

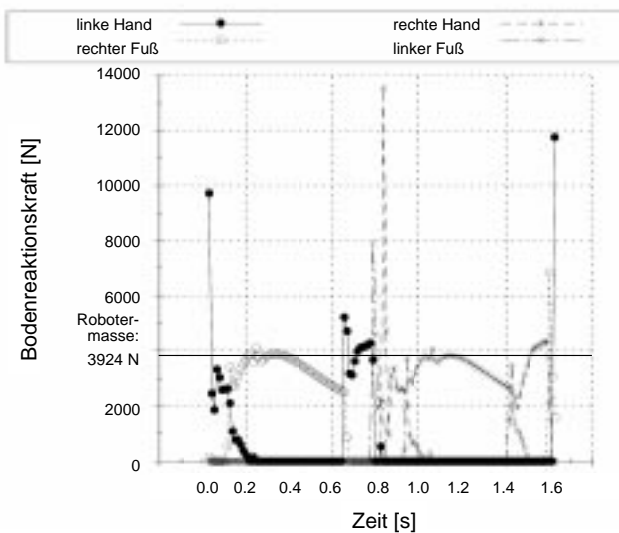


Bild 5: Bodenreaktionskraft als Funktion der Zeit

2.3 Ergebnisse der Bewegungssimulation

Die Modellierung mittels der in den beiden vorangehenden Abschnitten vorgestellten Annahmen und Randbedingungen ergibt in der Computersimulation einen Gang, der dem von einem Tier dieser Größe zu erwartenden schon recht ähnlich ist: Die Schrittweite liegt bei etwa 635 mm, die Gehgeschwindigkeit bei 0,7 m/s (der Paläontologe R. McNeill Alexander hat berechnet, daß *Iguanodon atherfieldensis* rund 1 m/s „schnell“ gegangen sein muß). Die Hüfthöhe beträgt etwa 1400 mm bei einer vertikalen Pendelbewegung von ca. 60 mm. Allerdings zeigen sich auch die Grenzen dieser Modellierung, wie an der zeitlichen Darstellung der Bodenreaktionskraft in **Bild 5** sichtbar wird: Von den vier Beinen hat oftmals nur jeweils ein einziges Bodenkontakt, obwohl es eigentlich zwei sein müssen. Dies zeigt, daß durch die fehlende Regelung des Systems insbesondere die Vorderbeine hart auf den Boden treffen und zurückgefedert werden. Über lange Zeiträume hinweg wird so die gesamte Last nur jeweils von einem Hinterbein getragen. Allerdings haben diese beim *Iguanodon* ohnehin rund 80% der Körpermasse getragen.

Die Berechnung der Drehmomente im Hinterbein ergibt daher zu hohe Werte, allerdings liegt man hiermit auf der sicheren Seite und erhält Anhaltswerte für die Motorauslegung sowie die Dimensionierung der Roboterteile. Die Berechnung des effektiven Drehmomentes ergab beispielsweise für die Hüfte den höchsten Wert aller Antriebe: Es beträgt etwa 1000 Nm, die maximale Drehzahl rund $7,5 \text{ min}^{-1}$.

Bild 6 zeigt die Winkelgeschwindigkeiten der Gelenkachsen. Es fällt besonders auf, daß rechte Hand und rechte Schulter sich genau in Phase bewegen, ihre absolute Position ist dagegen versetzt (siehe Spalte „Offset“ in Tabelle 2). Bei Wahl einer geeigneten Konstruktion sollte dieser Umstand das Einsparen eines weiteren Motors, nämlich den der Hand, möglich machen.

3 Entwurf

Die bei der Simulation gewonnen Größen fließen unmittelbar in die konstruktive Gestaltung des „Skelettes“ ein. Dabei muß unbedingt berücksichtigt werden, daß man in der Technik nicht über derart geniale Werkstoffe, Gelenke oder Regelkreise verfügt, wie sie die Natur hervorgebracht hat. Im Rahmen einer ingenieurtechnischen Realisierung müssen erhebliche Vereinfachungen und Veränderungen vorgenommen werden: So ist z.B. die Anzahl an Freiheitsgraden der Gelenke stark zu beschränken, um die Regelbarkeit des Gesamtsystems noch zu gewährleisten. Dies bedeutet u.a. den Verzicht auf Flexibilität in der Wirbelsäule oder auf den dritten rotatorischen Freiheitsgrad im Hüftgelenk. Auch müssen die in der Natur fast immer kraftschlüssigen Gelenke durch formschlüssige (z.B. Bolzengelenke) ersetzt werden.

3.1 Festlegung der Anzahl an Freiheitsgraden

Um die Position eines Körpers im Raum eindeutig zu beschreiben, sind genau 6 Freiheitsgrade notwendig:

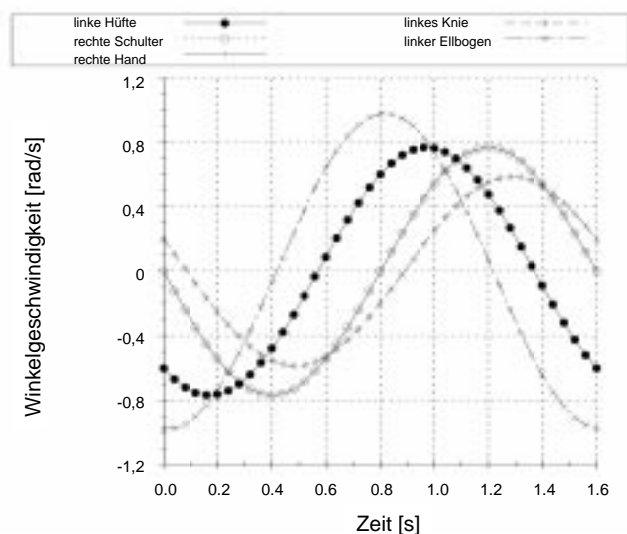


Bild 6 Winkelgeschwindigkeiten der Gelenke

drei translatorische und drei rotatorische. Möchte man beispielsweise seinen Fuß beliebig im Raum positionieren, so kann man sich dazu des Hüftgelenks (3 Freiheitsgrade), des Kniegelenks (1 Freiheitsgrad) und des Sprunggelenkes (mit Verdrehung von Schien- und Wadenbein 3 Freiheitsgrade) bedienen. Die Natur stellt also hier schon (mindestens) einen Freiheitsgrad mehr als theoretisch notwendig zur Verfügung. Bei den vier Beinen des Sauriers würde dies die regelungstechnische Beherrschung von $4 \times 7 = 28$ Freiheitsgraden allein nur für die Funktion „Füße positionieren“ bedeuten, dazu kämen noch die Freiheitsgrade für Schwanz- und Kopfbewegungen.

Bereits zu Beginn wurde erwähnt, daß das Pflichtenheft nur vierbeiniges, statisch stabiles Gehen vorschreibt, d.h., es befinden sich immer mindestens drei Beine auf dem Boden und der Schwerpunkt des Sauriers liegt immer innerhalb des durch diese drei Beine gebildeten Stabilitätsdreiecks. Um nun die Anzahl an Freiheitsgraden zu reduzieren und dennoch eine ausreichende Mobilität sicherzustellen, kann man die Endpunkte der Arme bzw. Beine als Punkte im Raum betrachten, die keine flächige Ausdehnung haben (konstruktiv bedeutet dies z.B. einen abgerundeten Gummipuffer als Aufstandspunkt und keine oder allenfalls eine elastisch nachgiebige Trittpläche!). Damit reduziert sich die Anzahl an zur Positionierung notwendigen Freiheitsgraden auf drei pro Bein. Es müssen im Vorderbein also nur zwei rotatorische Freiheitsgrade in der Schulter und eines im Ellbogen aktiv animiert werden, um mit der Fingerspitze einen beliebigen Punkt im Raum erreichen zu können. Für die Positionierung des Fußballens am Hinterbein gilt bzgl. Hüfte und Kniegelenk selbiges. Um jedoch auch

ein Stehen auf den Hinterbeinen zu ermöglichen, müssen die Zehen durch einen weiteren Antrieb bewegt und arretiert werden können. Insgesamt sind also nur $4 \times 3 = 12$ Freiheitsgrade für das vierbeinige, statisch stabile Gehen des Sauriers notwendig und zwei weitere für das Aufrichten auf die Hinterbeine.

Im Roboter sollen noch folgende weitere Funktionen animiert werden:

- Auf- und Abwärtsbewegung des Schwanzes,
- seitliches Schwenken des Schwanzes,
- Auf- und Abwärtsbewegung des Halses,
- seitliches Schwenken des Halses,
- Drehen des Kopfes und
- Kauen.

Damit müssen insgesamt „nur“ 20 Freiheitsgrade geregelt werden, also eine erhebliche Vereinfachung gegenüber dem natürlichen Vorbild.

3.2 Konstruktive Ausführung

Ein als Handskizze vorgestellter erster Entwurf zeigt **Bild 7** mit der Anordnung der Antriebsmotoren. Man hat sich für hochdynamische Servomotoren entschieden, die ohne Getriebe direkt eine Kugelrollspindel antreiben. Diese Motoren zeichnen sich durch extrem niedriges Gewicht und hohe Leistungsdichte aus. Die Verwendung der im Roboterbau üblichen teuren Cyclo-Getriebe oder Harmonic-Drives wird damit überflüssig. Außerdem ist die räumliche Integration dieser Antriebe erheblich einfacher, da sie ähnlich wie ein biologischer Muskel eingebaut werden können.

Fast alle Körperteile des Sauriers werden als Rohrstrukturen aus Aluminiumlegierungen gefertigt. Dies

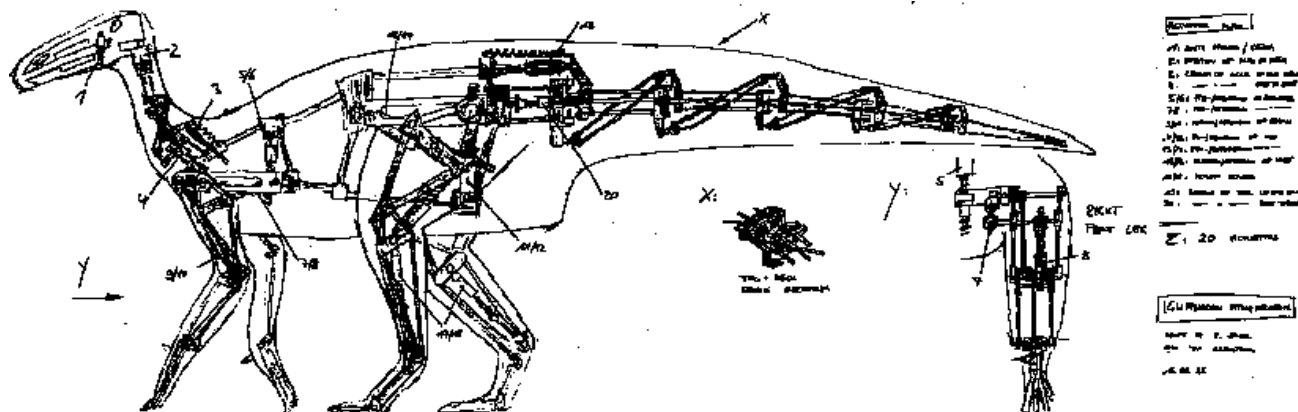


Bild 7: Verkleinerter handskizzlicher Entwurf des Dinosauriers mit Motorenplan

bedeutet eine nennenswerte Reduzierung des zunächst auf 400 kg geschätzten Gewichtes. Beim derzeitigen Entwicklungsstand scheint eine Gesamtroboter- masse von ca. 250 kg durchaus realistisch zu sein.

Bild 8 zeigt die Gestängemechanismen in Vorder- und Hinterbein. Im Vorderbein kommt eine gekreuzt geführte Pendelstütze zum Einsatz, die die sich aus der Computeranimation ergebende Forderung nach phasengleicher Bewegung von Hand und Oberarm erfüllt. Damit kann ein Antriebsmotor zur Handanimation eingespart werden. Im Hinterbein sorgt ein Parallelgestänge für die synchrone Bewegung von Oberschenkel und Mittelfuß.

Hals und Schwanz werden über ein räumliches

Getriebe bewegt. Durch Anpassung der Hebellängen kann erreicht werden, daß sich der Schwanz zur Spitze hin immer stärker krümmt. Dieser relativ aufwendige Mechanismus zeichnet sich durch recht elegantes Design aus, eine geforderte Eigenschaft, da auch ein Roboter ohne Haut zur Demonstration des erforderlichen technischen Aufwandes zum Einsatz kommen soll.

4 Ausblick

Der Abschluß der Konstruktionsphase im IMW ist zum Jahresende 1995 geplant; der Prototyp, der durch verschiedenste Partner in der EU realisiert wird, soll ein Jahr später lauffähig sein. Wir hoffen, auch ein Exemplar nach Clausthal zu bekommen...

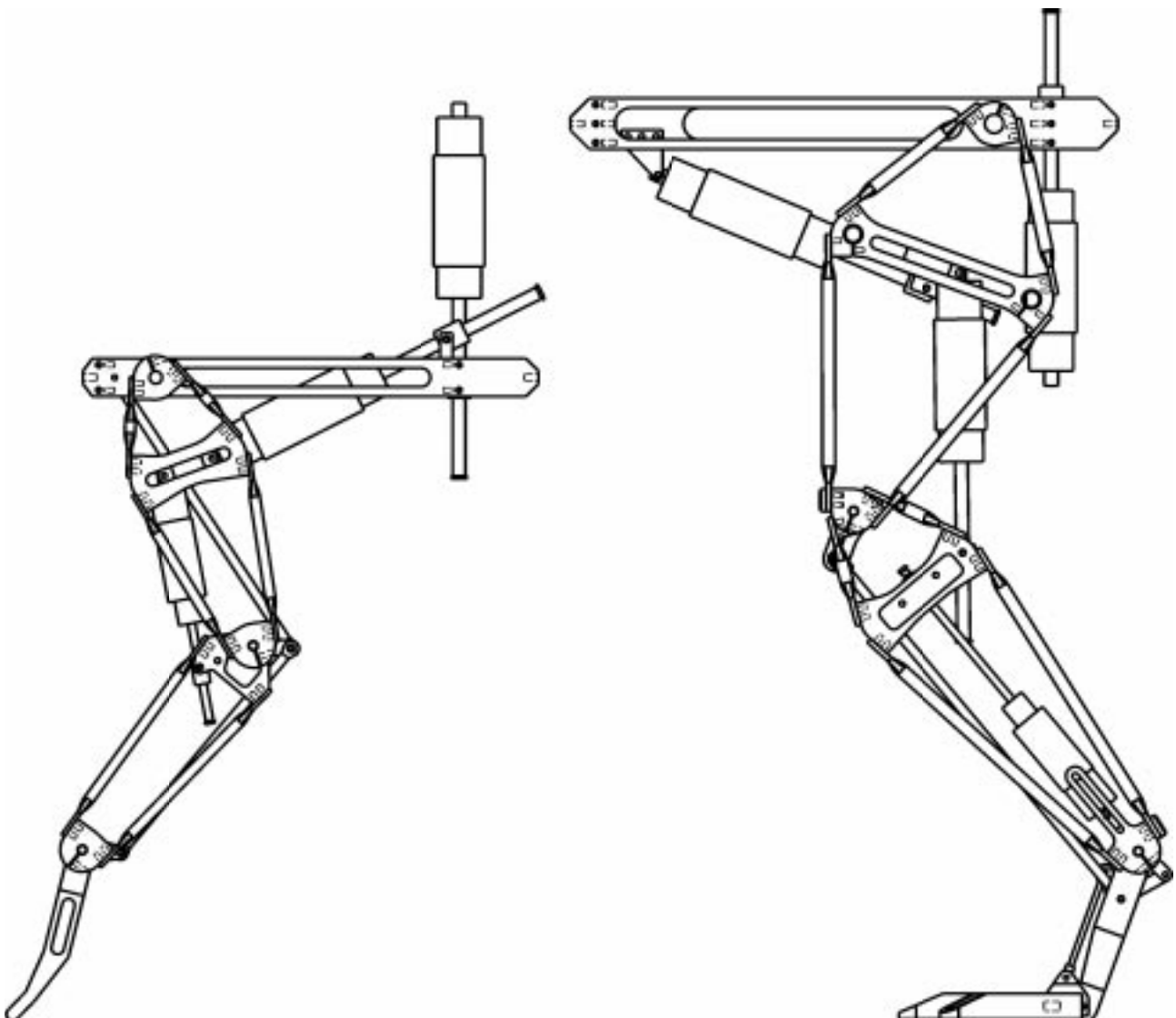


Bild 8: CAD-Entwurf von Vorder- und Hinterbein mit Gestängemechanismen zur Einsparung aktiv animierter Freiheitsgrade