

Tierische Anspannung für den Antrieb stationärer Arbeitsmaschinen unter besonderer Beachtung des Einflusses der Baumlänge auf den Wirkungsgrad des Systems Tier/Göpel

Hans-Peter Lührlein¹

1 Problematik

Konstruktives Ziel des Systems Tier/Göpel, speziell im Kontext der Entwicklungszusammenarbeit, ist die kostengünstige Bereitstellung von Rotationsenergie.

Inwieweit die Tierische Anspannung als Energiequelle zum Betrieb kleiner Nacherntemaschinen im ländlichen Raum sog. Entwicklungsländer geeignet ist, hat die Agrartechnik Witzenhausen im Auftrag der GTZ in Witzenhausen und an verschiedenen Standorten Boliviens untersucht.

Entscheidend bei den doch recht geringen Leistungen, die der Einsatz von Tieren im Vergleich zum Einsatz von Diesel- oder Elektromotoren bietet, ist deren weitgehende Umsetzung, da man sich größere Verluste kaum leisten kann.

Betrachtet man ausschließlich den Göpel, so ist es relativ einfach, einen Wirkungsgrad zu ermitteln. Obgleich es nicht möglich ist (LÖHRLEIN, 1993), eine absolute Leistung für ein einzusetzendes Tier anzugeben, so darf dennoch auch dem Tier ein gewisser Wirkungsgrad unterstellt werden, der im Wesentlichen durch das Leistungsvermögen und den Leistungswillen des Tieres sowie deren beeinflussenden Komponenten charakterisiert wird. Dieser "Wirkungsgrad Tier" ergebe sich dann aus der tatsächlichen Leistung geteilt durch die maximal mögliche Leistung mal 100 in Prozent.

¹ Dr. Hans-Peter Lührlein, Universität Kassel Gesamthochschule, FB 11, FG Agrartechnik
(Leiter: Prof. Dr.-Ing. R. Krause), Nordbahnhofstr. 1a, 37213 Witzenhausen

Der Wirkungsgrad des Systems Göpel/Tier setzt sich dann aus den beiden vorge-nannten Wirkungsgraden und dem Wirkungsgrad der Schnittstelle Göpel/Tier zu-sammen, die man allgemein auch als Anspannung bezeichnen kann. Wesentlichen Einfluß auf die Leistungsausbeute üben hierbei die tiergerechte Form der Anspan-nung und der Ansatz der Krafrichtung am Göpel aus.

Je nach Art der Anspannung wird die nutzbare Zugkraftkomponente festgelegt, die sich aus dem Produkt der Zugkraft und der Kosinuse der abweichenden Win-kel von der tangential zur Kreisbahn und senkrecht zur Rotation verlaufenden Idealkrafrichtung ergibt.

Dieser Sachverhalt ist u.a. bei Dippon (DIPPON, 1993, S.47) illustriert, so daß an dieser Stelle nicht neuerlich darauf eingegangen werden soll. Es sollte allerdings angemerkt werden, daß es durchaus Lösungen, wie zum Beispiel den Witzenhäu-ser Planetengöpel, gibt, wo die Idealkrafrichtung praktisch verwirklicht ist.

Interessant bleibt jedoch weiterhin der Einfluß der Baumlänge auf den Wirkungs-grad des Gesamtsystems Tier/Getriebe. Grundsätzlich läßt sich die Tendenz ab-schätzen:

Je länger der Baum, desto angenehmer die Arbeit für das Tier und so höher "sein" Wirkungsgrad, da Leistungswillen und Leistungsver-mögen gefördert werden.

Ein kürzerer Baum dagegen führt zu höheren Drehzahlen, die die Getriebekon-struktion vereinfachen und somit billiger machen. Dies ist allerdings zuerst nur ein wirtschaftlicher Aspekt, doch die daraus resultierende Einschränkung der Ma-növrierfähigkeit des Tieres setzt einer Verkürzung des Baumes Grenzen.

Daß die uneingeschränkte Verlängerung des Baumes, die irgendwann zum physio-logisch wünschenswerten Geradeauslauf des Tieres führen würde (Abb. 1), ihre Grenzen hat, ist ebenfalls einleuchtend.

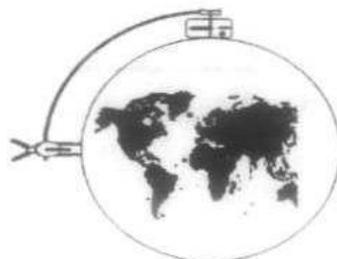


Abb. 1: Verlängerung des Baumes bis zum Eintritt des physiologisch wünschenswerten Geradeauslaufes

Noch bevor es zu einer wirtschaftlich/rechtlichen Limitierung dieser Ideallinie kommen wird, werden andere Faktoren die Baumlänge begrenzen. Sollte das Tier, was zu erwarten ist, seine Schrittgeschwindigkeit nicht in gleichem Maße steigern können wie der Bahnumfang wächst, muß ein höheres Übersetzungsverhältnis gewählt werden, um die an der Abtriebsseite benötigte Drehzahl aufrecht zu halten. Da ein Getriebe mit einem höheren Übersetzungsverhältnis in aller Regel einen schlechteren Wirkungsgrad aufweist als ein solches mit einem niedrigeren, könnte man sich vorstellen, daß das System konstruktiv bedingt eine Selbsthemmung anstrebt und die um den Wirkungsgrad bereinigte Leistungskurve somit ein Maximum aufzeigen würde, das zur Freude eines jeden Ingenieurs das Optimum der Baumlänge markierte.

Bei andersartigem Sachverhalt allerdings würde sich die Leistungskurve asymptotisch einem Grenzwert nähern, und meßtechnische oder wirtschaftliche Unzulänglichkeiten müßten die Länge des Baumes definieren.

2 Material und Methoden

Um den Einfluß der Baumlänge auf das Gesamtsystem zu ermitteln, wurde ein beliebiger Göpel auf einen speziell für den Göpel entwickelten Leistungsprüfstand gestellt und von einem beliebigen Esel angetrieben. Der Ausdruck "beliebig" ist in diesem Zusammenhang gewählt, um nochmals darauf hinzuweisen, daß die tatsächliche Zugkraft, bzw. die um den Wirkungsgrad bereinigte, am Göpelausgang zur Verfügung stehende Leistung in keinsten Weise interessiert (da sie ja auch bei jedem anderen Tier, Göpel, Treiber zu anderen Ergebnissen führen würde), sondern nur die Abhängigkeiten als Folge unterschiedlicher Baumlängen untersucht werden sollen. (Zur Relativierung der Absolutwerte sei dennoch darauf hingewiesen, daß es sich um einen 11-jährigen Eselwallach mit einem Stockmaß von 120 cm und einer Masse von 210 kg handelt.)

Der Versuchsaufbau hierzu entspricht der klassischen Leistungsbremse mit einer Kraftmeßdose zur Aufnahme des Rückdrehmomentes. Als Bremse wurde ein bürstenloser Gleichstrommotor, dessen Geschwindigkeit und Drehmoment durch einen PC regelbar ist, eingesetzt.

3 Ergebnisse

3.1 Leistung und Wirkungsgrad

Die erforderliche Abtriebsdrehzahl wird durch das jeweils angeschlossene Gerät bestimmt, was eine Anpassung des Übersetzungsverhältnisses an die jeweilige Baumlänge bei gegebener Eingangsdrehzahl (d.h. Schrittgeschwindigkeit) erfor-

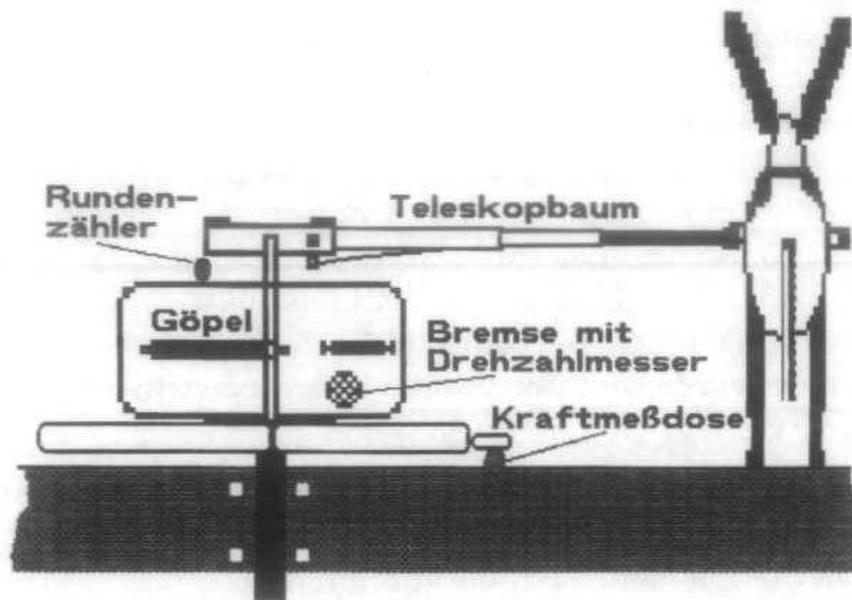


Abb. 2: Versuchsaufbau zur Ermittlung der Leistungen am Getriebeein- und ausgang

dert. Das für Zugarbeit nutzbare Geschwindigkeitsspektrum der Tiere ist recht schmal und nicht geeignet, trotz tiergerechterer Baumlänge, sich dem unterschiedlichen Bahnumfang derart anzupassen, daß die Ausgangsdrehzahl konstant gehalten werden kann.

Meßwerte zum Spektrum der Schrittgeschwindigkeit des in Witzenhausen eingesetzten Zugtieres sind folgender Tabelle zu entnehmen. Hierbei wurde konstant eine Zugkraft von 250 N eingehalten.

Tab. 1: Abhängigkeit der Schrittgeschwindigkeit "unseres" Esels vom Bahndurchmesser unter konstanter Zugkraft von 250 N

Bahndurchmesser [m]	Drehzahl [min ⁻¹]	Schrittgeschwindigkeit [m/s]	Leistung [W]
9	1,62	0,76302	191
8	1,77	0,74104	185
7	1,92	0,70336	176
6	2,23	0,70022	175

Ob eine Reduzierung der Zugkraft bei gleichzeitiger Vergrößerung des Radius zu einer Leistungssteigerung aufgrund höherer Schrittgeschwindigkeit führen kann, sollte im folgenden Versuch untersucht werden. Kommt dem Zugtier bei Verlängerung des Baumes nicht nur der tiergerechtere Radius, sondern auch die deutliche Verringerung der Zugkraft zugute, führt dies, wie in Tabelle 2 ersichtlich,

nicht zu einer entsprechend erhöhten Schrittgeschwindigkeit. Somit ergibt sich zwangsläufig ein Leistungsrückgang.

Tab. 2: Abhängigkeit der Schrittgeschwindigkeit vom Bahndurchmesser unter konstantem Drehmoment von 750 Nm

Bahndurchmesser [m]	Zugkraft [N]	Schrittgeschwindigkeit [m/s]	Drehzahl [min^{-1}]	Leistung [W]
9	165	0,83838	1,78	138,39
8	187	0,81640	1,95	152,27
7	215	0,78762	2,15	169,41
6	250	0,70022	2,25	176,70

Streicht man die Meßwerte mit einer Zugkraft von weniger als 200N aufgrund der dann doch stark gefallen Leistung heraus, so bleibt ein nutzbares Geschwindigkeitsband von 0,7 bis 0,76 m/s.

Um den Einfluß der Übersetzung auf den Leistungsverlust zu bestimmen, wurden die beiden sich auch im Bolivienprojekt befindlichen Göpel vermessen (Tab. 3). Andere in Witzenhausen vorhandene Göpel, darunter zwei historische Typen und zwei Reibradgöpel, wurden aufgrund der extrem schlechten Wirkungsgrade aus der Messung genommen.

Interessant an dieser Betrachtung ist das Produkt aus Verlustdrehmoment und Übersetzungsverhältnis, welches in Tabelle 3 als "Bezogenes Drehmoment" bezeichnet wird. Dieser Wert sollte auch zu einer qualitativen Beurteilung von Göpeln herangezogen werden, da ein solcher Vergleich wesentlich objektiver ist, als die Gegenüberstellung von Gesamtwirkungsgraden, indem das Übersetzungsverhältnis beachtet wird. Je kleiner der Wert für das Bezogene Drehmoment, desto besser ist der Wirkungsgrad des Göpels. Der durchschnittliche Wert aus Tabelle 3 liegt bei 0,94 Nm und ist als gut zu bezeichnen, wenn man bedenkt, daß ein, mit einer Übersetzung von 1:50 und einem Eingangsdrehmoment von ca. 1500 Nm ausgelegtes Getriebe, einen Wirkungsgrad von 96,9 % erreicht.

Inwieweit man in Bezug auf eine Beurteilung von Göpeln überhaupt den Terminus "Wirkungsgrad" bemühen sollte, ist sowieso fraglich. Der Getriebewirkungsgrad als Abtriebsleistung durch Antriebsleistung mal 100 in Prozent gilt nur für einen Betriebszustand und ist insoweit irreführend, daß man auf der Grundlage der umgekehrten Proportionalität von Wirkungsgrad und Übersetzungsverhältnis allzuerne bereit ist, den Betriebszustand außeracht zu lassen und nur die Leistung, nicht jedoch deren Abhängigkeit als Produkt aus Drehmoment und Drehzahl zu berücksichtigen.

Tab. 3: Erforderliches Drehmoment zum lastfreien Lauf zweier ausgewählter Göpeltypen bei verschiedenen Übersetzungsstufen und zugtiertypischen Eingangsdrehzahlen

Getriebe-Göpel			
Messung 1: mit Kette am Abtrieb (Übersetzungsverhältnis 1:3,33)			
Gang	Übersetzung	Verlustdrehmoment	Bezogenes Drehmoment
R-Gang	1 : 50	55 Nm	1,10 Nm
1. Gang	1 : 57,5	50 Nm	0,87 Nm
2. Gang	1 : 31,5	30 Nm	0,95 Nm
3. Gang	1 : 19	19 Nm	1,00 Nm
4. Gang	1 : 13,5	15 Nm	1,10 Nm
Messung 2: ohne Kettentrieb			
R-Gang	1 : 15	16 Nm	1,07 Nm
1.-Gang	1 : 17,3	12 Nm	0,70 Nm
2. Gang	1 : 9,5	9 Nm	0,95 Nm

Da jedoch, wie bereits eingangs des Kapitels erwähnt, bei der Auslegung von Tier/Göpel - Systemen die Abtriebsdrehzahl den für das Verfahren entscheidenden Parameter darstellt, haben wir es zusammen mit dem extremen Drehmomentanstieg bei Vergrößerung der Göpelbahn mit einem Sonderfall zu tun, wobei durchaus eine Verbesserung des Wirkungsgrades mit einer Erhöhung des Übersetzungsverhältnisses einhergehen kann.

3.2 Leistungsmessung bei konstanter Zugkraft oder konstantem Drehmoment mit steigenden Bahnradien

Um die Ergebnisse einer Leistungsmessung, vor allem auf der Basis der Wiederholbarkeit und Nachhaltigkeit miteinander vergleichen zu können, mußten verschiedene Voraussetzungen und Parameter geschaffen bzw. festgelegt werden. Hierzu zählt die Häufigkeit der Arbeitseinsätze sowie deren Regelmäßigkeit und Dauer. Desweiteren bietet es sich an, bei gleichbleibendem Drehmoment oder gleichbleibender Zugkraft unter jeweils veränderlicher Baumlänge Leistungskurven zu fahren.

Um die äußeren Einflüsse so gering wie möglich zu halten, wurde ein bereits an die Arbeit am Göpel gewöhnter Esel 3 Wochen vor Meßbeginn unter den immer gleichen Bedingungen durch ein und die selbe Person vorbereitet und auch während der gesamten, späteren Messung eingesetzt, wodurch die bereits eingangs

erwähnten wesentlich größeren Einflüsse der "Individuen" auf die Meßergebnisse minimiert wurden.

Die eigentliche Meßphase erstreckte sich dann über 7 Tage, wobei je 4 Tage bei konstanter Zugkraft und 4 Tage bei konstantem Drehmoment Göpelbaumlängen von 3m, 3,5m, 4m, und 4,5m eingestellt und durchfahren wurden. Die Arbeitszeit dauerte, wie bereits während der Eingewöhnungsphase, täglich 3 Stunden, nämlich exakt von 9:00 - 10:00, von 12:00 -13:00 und von 15:00 - 16:00 Uhr.

Durch Überschneidung der Parameter bei Baumlänge 3m konnte ein Meßtag eingespart werden.

Tabelle 4 zeigt die Meßergebnisse bei konstanter Zugkraft und Tabelle 5 bei konstantem Drehmoment.

Tab. 4: Verhalten von Drehzahl und Leistung bei konstanter Zugkraft und veränderlicher Baumlänge, im Mittel und zu unterschiedlichen Tageszeiten

Baumlänge [m]	Zugkraft [N]	Durchschnitt		9 ⁰⁰ - 10 ⁰⁰		12 ⁰⁰ - 13 ⁰⁰		15 ⁰⁰ - 16 ⁰⁰	
		Drehzahl [1/min]	Leistung [kW]	Drehzahl [1/min]	Leistung [kW]	Drehzahl [1/min]	Leistung [kW]	Drehzahl [1/min]	Leistung [kW]
4,5	250	1,62	0,191	1,68	0,197	1,63	0,191	1,57	0,185
4,0	250	1,77	0,185	1,77	0,185	1,78	0,187	1,76	0,184
3,5	250	1,92	0,176	1,88	0,173	1,90	0,174	1,98	0,181
3,0	250	2,23	0,175	2,25	0,177	2,17	0,170	2,28	0,179

Tab. 5: Verhalten von Drehzahl und Leistung bei konstantem Drehmoment und veränderlicher Baumlänge, im Mittel und zu unterschiedlichen Tageszeiten

Baumlänge [m]	Zugkraft [N]	Durchschnitt		9 ⁰⁰ - 10 ⁰⁰		12 ⁰⁰ - 13 ⁰⁰		15 ⁰⁰ - 16 ⁰⁰	
		Drehzahl [1/min]	Leistung [kW]	Drehzahl [1/min]	Leistung [kW]	Drehzahl [1/min]	Leistung [kW]	Drehzahl [1/min]	Leistung [kW]
4,5	165	1,78	0,139	1,78	0,139	1,77	0,137	1,80	0,140
4,0	187	1,95	0,153	1,94	0,152	1,94	0,152	1,97	0,154
3,5	215	2,15	0,169	2,12	0,167	2,15	0,169	2,18	0,171
3,0	250	2,24	0,176	2,25	0,177	2,17	0,170	2,28	0,179

4 Diskussion der Ergebnisse

Aus den Tabellen 3 und 4 ist ersichtlich, daß die Tageszeit bei entsprechenden Erholungspausen keinen Einfluß auf die Leistung (Arbeit) genommen hat. Wiederholungen zu unterschiedlichen Tageszeiten bei ansonsten unveränderten Bedingungen führten zwar zu gering unterschiedlichen Meßergebnissen, jedoch war keine Tageszeit signifikant leistungssteigernd. Die geradezu auffällige Wiederhol-

barkeit der Meßwerte zeugt von einem vorbildlichen Zusammenspiel der Komponenten Mensch, Tier und Maschine, wobei sich schon fast der Gedanke an das bewußte Uhrwerk aufdrängt.

Die Vergrößerung des Bahnradius führte bei konstanter Zugkraft zu einen deutlichen Leistungsgewinn von bis zu 9 %. Die Vergrößerung des Bahnradius bei konstantem Drehmoment erscheint aufgrund der fallenden Leistung als wenig sinnvoll. Dennoch könnte man dem Tier zu Liebe sich eine solche Kombination auch in der Praxis vorstellen, wenn es sich um Verfahren mit geringem Leistungsbedarf handelt. Hier hatte es sich gezeigt, daß das Tier nicht willens, bzw. unter ethisch vertretbarem Einsatz nicht in der Lage war, den geringeren Zugkraftanspruch in Geschwindigkeit umzusetzen und so den Drehzahlabfall auszugleichen.

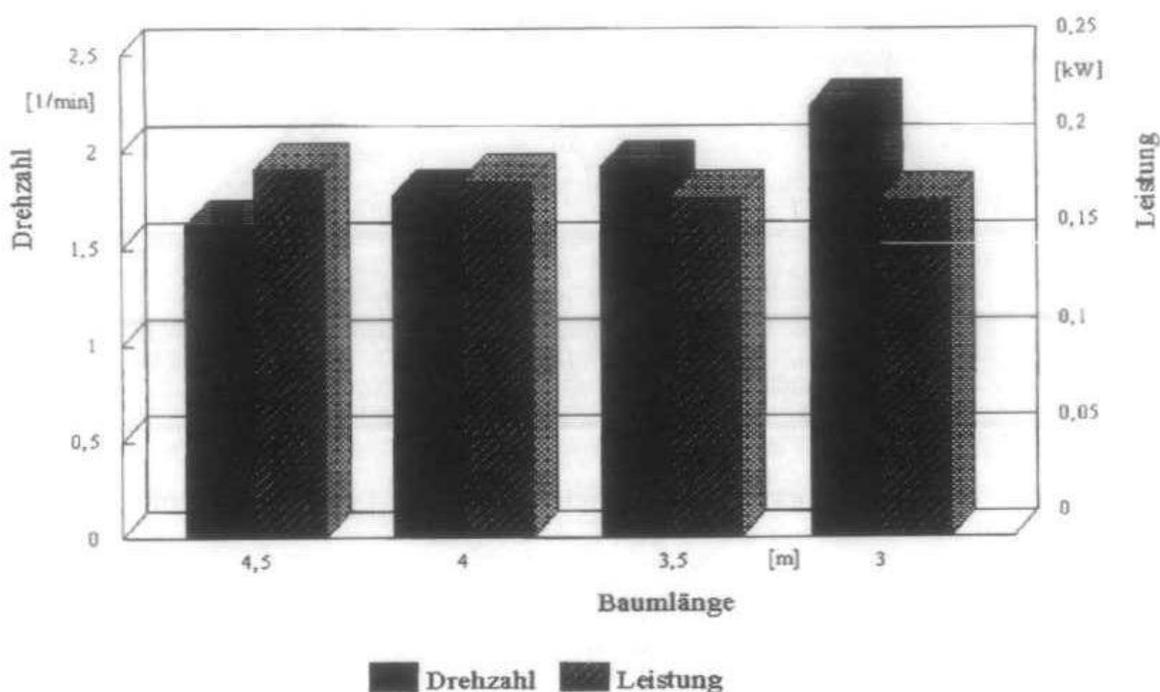


Abb. 3: Entwicklung von Drehzahl und Leistung in Abhängigkeit von der Baumlänge bei konstanter Zugkraft

Bedingt durch den sich vergrößernden Umfang sinkt in Abhängigkeit von der Baumlänge, wie in Abbildung 3 ersichtlich, die Eingangsdrehzahl. Die dennoch positive Leistungsbilanz wird durch den tiergerechteren, größeren Radius erreicht, der einen Anstieg der Schrittgeschwindigkeit (Abb. 4) ermöglicht.

Wie aus der Grafik ersichtlich, kann das Tier seine Schrittgeschwindigkeit erhöhen, was bei gleichbleibender Zugkraft zu einer Erhöhung der Leistung führt. Eine wesentliche Steigerung tritt von 7 auf 8m Bahndurchmesser ein. Der Bereich von 6 auf 7m zeigt nur geringen Leistungsanstieg, jedoch ist der Bereich unter 7m aus

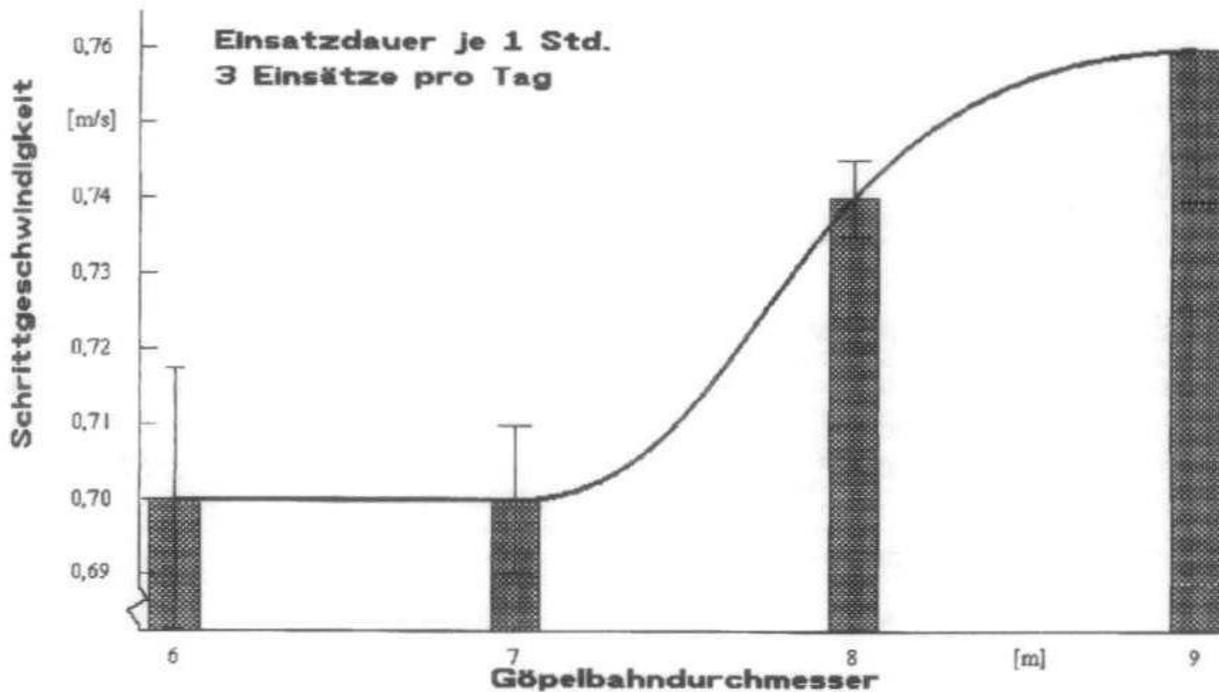


Abb. 4: Anstieg der Schrittgeschwindigkeit bei Vergrößerung des Bahndurchmessers

der Sicht des Tierhalters (und sicherlich auch aus der des Tieres) nicht akzeptabel, da der geringe Durchmesser zu Verletzungen im Bereich der Fesseln des Tieres führen kann. Von 8 - 9m Bahndurchmesser flacht der Geschwindigkeitszuwachs und mit ihm der Leistungsgewinn wieder ab, um sich asymptotisch einem Maximum zu nähern, was jedoch im Versuch aufgrund der Unverhältnismäßigkeit des Aufwandes nicht ermittelt wurde. Eine Praxisrelevanz besteht für den Bereich 8+ sowieso kaum, da die auftretenden Drehmomente die Konstruktion schnell spürbar verteuern würden. Für den Fall, daß eine Überdachung der Göpelbahn gewünscht wird, steigen die Kosten ebenfalls überproportional.

Auch die für ein bestimmtes Verfahren benötigte Drehzahl muß bei größeren Bahndurchmessern aufgrund der daraus resultierenden, geringeren Eingangsdrehzahl, durch ein höheres Übersetzungsverhältnis erreicht werden, was wiederum die Göpelkonstruktion verteuert.

Ein höherer Leistungsverlust, wie man ihn vielleicht aufgrund des schlechteren Wirkungsgrades eines Getriebes mit einem höheren gegenüber eines solchen mit einem niedrigeren Übersetzungsverhältnis anzunehmen bereit war, tritt nicht auf. Durch die unterproportional fallende Drehzahl bei gleichzeitig steigendem Drehmoment und konstanter Abtriebsdrehzahl bleibt der absolute Verlust, wie in Tabelle 6 dargestellt, ziemlich konstant. Selbst ein geringfügiger, nicht signifikanter Anstieg des Wirkungsgrades bei gleichzeitigem Anstieg des Übersetzungsverhältnisses konnte beobachtet werden.

Tab. 6: Eingangsleistung, Ausgangsleistung und Verlust bei konstanter Abtriebsdrehzahl von 240 min^{-1}

Zugkraft [N]	Hebelarm [m]	Drehmoment [Nm]	Drehzahl min^{-1}	Eingangsleistung [W]	Ausgangsleistung [W]	Verlust [W]
250	4,5	1125	1,62	191	166,44	24,56
250	4	1000	1,77	185	160,39	24,61
250	3,5	875	1,92	176	151,39	24,61
250	3	750	2,23	175	150,42	24,58

Somit kommt es jedoch nicht zu dem unter 4.1 in Aussicht gestellten Maximum in der Leistungskurve, wodurch eine punktgenaue, technisch optimale Baumlänge zu definieren möglich gewesen wäre.

Allerdings gibt es auch weiterhin genügend, vor allem wirtschaftliche Gründe, um den asymptotischen Verlauf der Leistungskurve nicht zu weit gehen zu lassen. Die Göpelbaumlänge ist beim Einsatz eines Esels mit 4m ausreichend berücksichtigt, wobei für andere Zugtiere die ideale Baumlänge analog ermittelt werden müßte und sich selbstverständlich andere Idealkonstellationen ergeben können.

5 Zusammenfassung

Es hat sich im Rahmen dieser Untersuchungen gezeigt, daß unter Beachtung ergonomischer Komponenten, wie dies auf die Baumlänge und respektiv den Bahnradius zutrifft, durchaus Leistungsverluste in einer Größenordnung bis zu 10 % vermieden werden können. Inwieweit hierdurch jedoch eine Entscheidung pro oder contra Göpel zu fällen sein mag ist fraglich, da 10 % der Leistung im hier untersuchten Fall lediglich 18 Watt entsprechen und auch im Falle von stärkeren Tieren oder einer Zugtiergruppe eine Leistungsdifferenz von 100 Watt kaum überschritten werden wird

Ist jedoch die Tierische Anspannung als Antriebsform für stationäre Arbeitsmaschinen geplant, so sollte nicht zuletzt auch im Interesse der Zugtiere, auf eine möglichst ergonomische Anspannungsform geachtet werden.

Summary

Detailed controlled tests with an animal driven power transmission (capstan) / or post harvest machinery demonstrate the effect of the length of the drive beam

(diameter of walking circle) on animal welfare, walking speed, power output and overall efficiency.

In spite of the low power range of less than 200 Watt for a donkey, up to 10% of efficiency can be gained by optimizing the length of the beam.

6 Literatur

1. DIPPON, K. (1993): Tierbetriebene Antriebssysteme für Nacherntearbeiten. Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft (225), Hohenheim.
2. LÖHRLEIN, H.-P. (1993): Göpelantrieb für die Nacherntetechnologie? 4. VDI/MEG Kolloquium Agrartechnik, Heft 15, Giessen.